



Univerzitet u Prištini
Fakultet tehničkih nauka

Ivica R. Čamagić

**Istraživanje uticaja eksploatacionih uslova na
procenu integriteta i preostalog veka posuda pod
pritiskom namenjenih za rad na povišenim
temperaturama**

Doktorska disertacija

Kosovska Mitrovica, 2013.

Identifikaciona stranica doktorske disertacije

<i>I. Autor</i>
Ime i prezime: Ivica Čamagić
Datum i mesto rođenja: 29.08.1974, Prokuplje
Sadašnje zaposlenje: Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, radno mesto saradnika u zvanju asistenta
<i>II. Doktorska disertacija</i>
Naslov: Istraživanje uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama
Broj poglavlja: 8
Broj stranica: 198
Broj slika i dijagrama: 200
Broj tabela: 36
Broj bibliografskih podataka: 89
Ustanova i mesto gde je rad izrađen: Vojnotehnički institut, Beograd
Naučna oblast (UDK):
Mentor: dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor, Mašinski fakultet, Beograd
<i>III. Ocena i odbrana</i>
Datum prijave teme: 04.02.2010.
Broj odluke i datum prihvatanja doktorske disertacije: 10-2/77, 09.07.2010.
Komisija za ocenu podobnosti teme i kandidata: dr Zijah Burzić, naučni savetnik, Vojnotehnički institut, Beograd dr Zlatibor Vasić, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica dr Vencislav Grabulov, naučni savetnik, IMS Institut, Beograd dr Dejan Čikara, docent, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
Komisija za ocenu doktorske disertacije: dr Zijah Burzić, naučni savetnik, Vojnotehnički institut, Beograd dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor, Mašinski fakultet, Beograd dr Dejan Čikara, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
Komisija za odbranu doktorske disertacije: dr Zijah Burzić, naučni savetnik, Vojnotehnički institut, Beograd dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor, Mašinski fakultet, Beograd dr Dejan Čikara, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
Datum odbrane disertacije:

Komisija za pregled, ocenu i odbranu:

Mentor: dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor,
Mašinski fakultet, Beograd

Članovi komisije: dr Zijah Burzić, naučni savetnik,
Vojnotehnički institut, Beograd

dr Dejan Čikara, vanredni profesor,
Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

Datum odbrane:

*Svima onima koji su mi neizmerno dragi i za
koje verujem da bar sličan osećaj imaju prema meni*

Predgovor

Ovaj rad je rezultat mog interesovanja u oblasti istraživanja ponašanja osnovnog metala, komponenti zavarenog spoja (metala šava i zone uticaja toplote), kao i samog zavarenog spoja niskolegiranog čelika, primenom parametara dobijenih ispitivanjima u uslovima delovanja statičkog, dinamičkog i udarnog opterećenja. Parametre mehanike loma kao što je kritični faktor intenziteta napona i parametre rasta zamorne prsline, primenjene na analizu ponašanja zavarenih komponentata procesne opreme izloženih eksploatacionim uslovima (povišeni pritisak, promenljivo opterećenje i povišena temperatura) moguće je primeniti i pri proceni integriteta ovih konstrukcija.

Koristim priliku da se zahvalim svima koji su pomogli izradu ove doktorske disertacije.

*Posebno se zahvaljujem **dr Zijahu Burziću**, naučnom savetniku Vojnotehničkog instituta u Beogradu, na korektnoj saradnji, na savetima i sugestijama, na nesebičnoj podršci, na pomoći u realizaciji eksperimenata i na usmeravanju do konačnog cilja.*

Zahvaljujem se dr Aleksandru Sedmaku, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Beogradu, koji je u velikoj meri usmerio moje interesovanje, koje kao posledicu ima rezultate istraživanja u ovoj oblasti i koji je radu dao konačnu formu.

Zahvaljujem se dr Dejanu Čikari, vanrednom profesoru Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, koji je uvek bio spreman, da savetima pomogne u rešavanju eventualnih dilema.

Zahvaljujem se dr Slobodanu Makragiću, vanrednom profesoru Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, koji je pažljivo pročitao rad i dao doprinos u kvalitetu tehničke obrade.

Zahvaljujem se svojim prijateljima, kolegama, rodbini i svima onima koji su na bilo koji način učestvovali i pomogli izradu ovog rada.

Na kraju, zahvaljujem se članovima svoje porodice, na razumevanju i podršci.

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1.	PREDMET ISTRAŽIVANJA	1
1.2.	CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
2.	OBEZBEĐENJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA	4
2.1.	STRUKTURNI I FAZNI PREOBRAŽAJI U ČELIKU PRI ZAVARIVANJU	4
2.1.1.	<i>Uzroci pojave različitih mikrostruktura pri zavarivanju</i>	<i>5</i>
2.1.2.	<i>Makrostruktura zavarenog spoja</i>	<i>6</i>
2.1.3.	<i>Mikrostruktura spojeva zavarenih postupcima topljenja</i>	<i>7</i>
2.1.3.1.	Zona topljenja	7
2.1.3.2.	Zona uticaja toplote	8
2.2.	GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA	12
2.2.1.	<i>Prsline u zavarenim spojevima</i>	<i>15</i>
2.2.1.1.	Tople prsline	16
2.2.1.2.	Hladne prsline	20
2.2.1.3.	Lamelarne prsline	24
2.2.1.4.	Prsline usled ponovnog zagrevanja (žarenja)	25
2.3.	STANDARDI ZA OBEZBEĐENJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA	26
2.3.1.	<i>Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja</i>	<i>28</i>
2.3.2.	<i>Nivoi kvaliteta i greške zavarenih spojeva</i>	<i>31</i>
2.4.	POREĐENJE POSTUPAKA ZAVARIVANJA-PREPORUKE ZA IZBOR	31
3.	OSNOVI MEHANIKE LOMA	34
3.1.	RAZVOJ MEHANIKE LOMA	34
3.2.	ZNAČAJ MEHANIKE LOMA	37
3.3.	OSNOVNE DEFINICIJE MEHANIKE LOMA	42
3.3.1.	<i>Osnovni oblici obrazovanja površine preloma</i>	<i>42</i>
3.3.2.	<i>Faktor intenziteta napona</i>	<i>44</i>
3.3.3.	<i>Koncept konturnog J-integrala</i>	<i>45</i>
3.3.4.	<i>Koncept otvaranja vrha prsline</i>	<i>50</i>
3.4.	ISPITIVANJA MEHANIKE LOMA	51
3.4.1.	<i>Primena mehanike loma na upotrebnu spremnost zavarenih spojeva</i>	<i>51</i>
3.4.2.	<i>Analiza zamora sa stanovišta mehanike loma</i>	<i>60</i>
3.4.2.1.	Koncept linearno-elastične mehanike loma (LEML)	60
4.	NAPONI I DEFORMACIJE KOD ZAVARENIH SPOJEVA.	66
4.1.	SOPSTVENI NAPONI U ZAVARENOM SPOJU	67
4.2.	DEFORMACIJE ZAVARENIH SPOJEVA.	70
4.2.1.	<i>Mere za sprečavanje i smanjenje deformacija i sopstvenih napona</i>	<i>71</i>
4.3.	TERMIČKA OBRADA POSLE ZAVARIVANJA	73
4.3.1.	<i>Oprema za termičku obradu posle zavarivanja</i>	<i>74</i>
5.	PRIKAZ I ANALIZA EKSPERIMENTALNO DOBIJENIH REZULTATA	77
5.1.	OSNOVNI MATERIJAL	78
5.2.	TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA LIMOVA OD NISKOLEGIRANOG ČELIKA	79
5.3.	UZORKOVANJE	80
5.4.	ODREĐIVANJE ZATEZNIH OSOBINA	81
5.4.1.	<i>Rezultati zateznih ispitivanja zavarenog spoja</i>	<i>83</i>
5.4.2.	<i>Rezultati zateznih ispitivanja osnovnog materijala</i>	<i>84</i>
5.4.3.	<i>Rezultati zateznih ispitivanja metala šava</i>	<i>86</i>
5.4.4.	<i>Diskusija zateznih ispitivanja</i>	<i>87</i>
5.5.	ISPITIVANJE SAVIJANJEM	89

5.6.	MERENJE TVRDOĆE	90
5.7.	MAKRO I MIKROSTRUKTURNA ISPITIVANJA	92
5.8.	UDARNA ISPITIVANJA	96
5.8.1.	<i>Rezultati udarnih ispitivanja epruveta OM</i>	101
5.8.2.	<i>Rezultati udarnih ispitivanja epruveta MŠ</i>	107
5.8.3.	<i>Rezultati udarnih ispitivanja epruveta ZUT</i>	111
5.8.4.	<i>Diskusija udarnih ispitivanja.</i>	117
5.9.	ODREĐIVANJE ŽILAVOSTI LOMA PRI RAVNOJ DEFORMACIJI K_{Ic}	119
5.9.1.	<i>Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u OM</i>	129
5.9.2.	<i>Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u MŠ</i>	135
5.9.3.	<i>Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u ZUT.</i>	139
5.9.4.	<i>Diskusija ispitivanja žilavosti loma</i>	145
5.10.	ISPITIVANJA PROMENLJIVIM OPTEREĆENJEM	145
5.10.1.	<i>Diskusija ispitivanja promenljivim opterećenjem</i>	148
5.11.	ODREĐIVANJE PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE	149
5.11.1.	<i>Diskusija ispitivanja parametara rasta zamorne prsline</i>	168
6.	MERENJA DEFORMACIJSKOG I NAPONSKOG STANJA NA POSUDI (REAKTORU) POD PRITISKOM	169
6.1.	ODREĐIVANJE NAPONSKOG STANJA U TOKU PROBE HVP	169
6.2.	MERENJE PROMENA TEMPERATURE I PRITISKA NA REAKTORU	176
6.3.	ODREĐIVANJE NAPONSKOG STANJA REAKTORA U EKSPLOATACIJI	177
7.	PREDVIĐANJE PREOSTALOG VEKA U EKSPLOATACIJI	181
7.1.	OCENA INTEGRITETA I PROCENA PREOSTALOG VEKA REAKTORA U EKSPLOATACIJI.	183
8.	ZAKLJUČAK	190
	LITERATURA	194

Istraživanje uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama

Apstrakt

Za pouzdanost i sigurnost procesne opreme naročito je važno da se obuhvate korektno utvrđeni parametri osobina materijala i zavarenih spojeva i da se sakupe podaci o uslovima eksploatacije. Vek postrojenja je uslovljen dobrom konstrukcijom, materijalom odgovarajućih osobina i kvaliteta, kvalitetno izabranom i dobro sprovedenom tehnologijom zavarivanja i prikladnom tehnologijom u proizvodnji, pod uslovom da opterećenja budu u skladu sa očekivanjem. Značajni podaci o tome treba da se dobiju i iz analize eksploatacijskih oštećenja. Praćenje promena na konstrukcionim materijalima i njihovim zavarenim spojevima u uslovima eksploatacije se praktično sprovodi tokom celokupnog radnog veka, i to pri planiranim i vanrednim remontima, za potrebe rekonstrukcije i revitalizacije procesne opreme u slučaju havarijskih otkaza. Praćenje i kontrola osobina konstrukcionih materijala i zavarenih spojeva kod visokotemperaturni opterećenih delova, izloženih i visokom pritisku u koroziono aktivnim sredinama, predstavlja osnovni pokazatelj pouzdanosti njihovog rada.

Dugogodišnji eksploatacioni period predmetne posude pod pritiskom (reaktora) kao i posledice bombardovanja, prouzrokovali su određena oštećenja na plaštu reaktora. Pojava ovih oštećenja su zahtevala vrlo ozbiljan pregled same konstrukcije reaktora, kao i sanaciju oštećenih delova. Sanacija reaktora je uključivala i zamenu dela plašta reaktora novougrađenim materijalom. Uticaj vremena eksploatacije i temperature na mehaničko-eksploatacione i strukturne osobine osnovnog metala reaktora je analiziran ispitivanjem uzoraka eksploatisanog osnovnog metala i novog osnovnog metala. Analiza je obuhvatila i ispitivanje mehaničko-eksploatacionih i strukturnih osobina zavarenog spoja eksploatisani osnovni metal-novi osnovni metal.

Eksperimentalno dobijeni rezultati mehaničko-eksploatacijskih ispitivanja predstavljaju neophodne polazne podatke za proračun i definisanje kritičnih mesta na samoj posudi pod pritiskom, njeno ispitivanje pri probi hladnim vodenim pritiskom i u eksploataciji (radnim uslovima).

Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza treba da daju praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog metala, komponenti zavarenog spoja i same posude pod pritiskom (reaktora), a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, kao i revitalizacije i produženja radnog veka procesne opreme izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

Na osnovu prezentiranog predmeta, cilja, kao i metoda istraživanja i ispitivanja, očekuje se da osnovni doprinos ove disertacije bude u implementaciji izvedenih istraživanja, kao i u definisanju osnovnih parametara i kriterijuma prihvatljivosti, koji će omogućiti sigurnost u eksploataciji komponenti postrojenja procesne opreme namenjene za rad u uslovima delovanja povišenog pritiska i povišenih temperatura.

Ključne reči: reaktor, integritet i preostali vek, energija stvaranja prsline, energija širenja prsline, parametri mehanike loma, parametri visokocikličnog zamora, parametri rasta zamorne prsline, deformacijsko i naponsko stanje

Naučna oblast: Mašinstvo-Mašinski materijali i zavarivanje

Uža naučna oblast: Inženjerstvo materijala, mehanika loma, integritet konstrukcija, zavarivanje

Research of exploitation conditions influence on estimation of integrity and remaining life of pressure vessel designed for high temperature exploitation

Abstract

Collecting of exploitation conditions data and consideration of correctly identified material property parameters is particularly important for processing equipment safety and reliability. Plant life is conditioned with proper construction, materials with corresponding properties and quality, appropriately chosen and conducted welding technology and appropriate manufacturing technology, under condition that loads are according to expected. Significant data on the topic should be obtained by the exploitation damages analysis. Tracking of changes on structural materials and their welded joints in exploitation conditions is practically conducted during overall life, in process of planed and emergency overhaul, for the processing equipment reconstruction and revitalization in case of the failure. Tracking and control of structural materials and welded joints properties of high temperature loaded parts, submitted to high pressure in active corrosion environments, represents basic reliability indicator.

Long-term exploitation period of the pressure vessel (reactor), as well as bombing consequences, caused certain damages on the reactor jacket. Appearance of these damages required thorough inspection of the reactor structure, as well as sanation of damaged parts. The reactor sanation included replacement of the part of reactor jacket with newly installed material. Influence of exploitation time and temperature to mechanically-exploitational and structural properties of the reactor base metal was analyzed by testing of exploited base metal samples and new base metal samples. The analysis included testing of mechanically-exploitational and structural properties of welded joint of exploited base metal-new base metal.

Experimentally obtained results of mechanically-exploitational testing represent necessary baseline data for calculation and defining of critical points on the pressure vessel itself, during its cold water pressure testing and in exploitation (working conditions).

Obtained testing data and its testing should give practical contribution for evaluation of exploitation conditions influence on base metal behavior, welded joint behavior and behavior of pressure vessel (reactor) itself, all in order to estimate integrity and remaining life of the structure, as well as for revitalization and extension of life of processing equipment made of steel for high temperature exploitation.

Based on presented case, goal, as well as the research and the testing method, it is expected that basic contribution of this dissertation would be implementation of conducted research, as well as defining of basic acceptability parameters and criterions that will enable exploitation safety of processing equipment components designed for operation in high pressure and temperature conditions.

Key words: reactor, integrity and remaining life, crack initiation energy, crack propagation energy, fracture mechanics parameters, high-cycle fatigue parameters, fatigue crack propagation parameters, stress and strain state

Academic Expertise: Mechanical Engineering-Engineering materials and welding

Major: Material engineering, fracture mechanics, structural integrity, welding

Nomenklatura

Pregled oznaka

a [mm] - debljina epruvete

a [mm] - dužina prsline

a^* [mm] - prvobitna veličina početne greške

a_0 [mm] - početna dužina prsline

a_0 [mm] - veličina nazvana inženjerskom prslinom

a_c [mm] - kritična dužina prsline

a_{cr} [mm] - kritična veličina greške

a_d [mm] - maksimalno dozvoljena dužina prsline

a_f [mm] - krajnja dužina prsline

a_{i-1} [mm] - prethodna dužina prsline

a_{pr} [mm] - minimalna dužina prsline koja se može otkriti

a_z [mm] - dužina prvobitne prsline

A [mm²] - površina prsline

A_1 [-] - eutektoidna linija

A_2 [-] - linija magnetnog preobražaja β -Fe u α -Fe pri hlađenju

A_3 [-] - linija početka pretvaranja γ -Fe u α -Fe pri hlađenju, a završetka pretvaranja α -Fe u γ -Fe pri zagrevanju

A_4 [-] - solidus linija

A_5 [-] - likvidus linija

A [%] - procentualno izduženje

A_5 [%] - procentualno izduženje

A_{c1} [°C] - temperatura početka transformacije α -Fe u γ -Fe pri zagrevanju

A_{c3} [°C] - temperatura završetka transformacije β -Fe u γ -Fe pri zagrevanju

A_{r3} [°C] - temperatura početka transformacije γ -Fe u β -Fe pri hlađenju

A [J] - energija potrebna za lom

A_{uk} [J] - ukupna energija udara

A_l [J] - energija stvaranja prsline

A_p [J] - energija širenja prsline

A_{pl} [J] - plastična komponenta energije

b [mm] - širina epruvete

b [mm] - dužina ligamenta

b_{i-1} [mm] - prethodna dužina ligamenta

B [mm] - debljina epruvete
 B [mm] - debljina ploče
 B_N [mm] - neto širina epruvete
 C [-] - geometrijski faktor
 C [-] - koeficijent u Parisovoj jednačini brzine rasta prsline
 C_F [-] - koeficijent u Formanovoj jednačini brzine rasta prsline
 C_i [-] - nagib posmatrane linije rasterećenja
 C_{i-1} [-] - nagib prethodne linije rasterećenja
 C_v [-] - koeficijent u Vakerovoj jednačini brzine rasta prsline
 C_K [-] - koeficijent u jednačini Klesnila i Lukasa za brzinu rasta prsline
 $CMOD$ [mm] - veličina otvaranja usta prsline
 COD [mm] - veličina otvaranja prsline
 $CTOD$ [mm] - veličina otvaranja vrha prsline
 da/dN [m/ciklus] - brzina rasta zamorne prsline
 d_d [mm] - debljina dna reaktora
 d_p [mm] - debljina plašta reaktora
 ds [mm] - element dužine luka po krivoj S
 d_u [mm] - unutrašnji prečnik reaktora
 D [mm] - prečnik trna
 E [MPa] - modul elastičnosti
 $f(a/W)$ [-] - geometrijski faktor
 $f(a_0/W)$ [-] - geometrijski faktor za SEB epruvete
 $f(a_i/W)$ [-] - geometrijski faktor za CT epruvete
 $f_{ij}(\theta)$ [-] - funkcija ugla
 $F(t)$ [N] - sila koja se menja sa vremenom
 F [N] - sila
 F_A [N] - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline
 F_d [N] - donja vrednost sile
 F_F [N] - sila početka nestabilnog rasta prsline
 F_g [N] - gornja vrednost sile
 F_{GY} [N] - dinamička sila napona tečenja
 F_L [N] - granična sila
 F_M [N] - maksimalna sila na krivoj sila-vreme
 F_{min} [N] - minimalna sila zamaranja
 F_{min} [N] - projektno granično opterećenje

F_{max} [N] - maksimalna sila zamaranja

F_{max} [N] - sila pri kojoj dolazi do stvaranja prve prsline

F_Q [N] - najveća sila na dijagramu sila-pomeranje između tačaka O i F_5

G [J/m²] - brzina oslobađanja energije (sila razvoja prsline)

J [J/m²] - konturni integral nezavisan od putanje integracije

J_{el} [J/m²] - elastična komponenta J -integrala

J_{Ic} [J/m²] - kritična vrednost konturnog integrala za prvi oblik razvoja prsline

J_{pl} [J/m²] - plastična komponenta J -integrala

k_1 [-] - konstanta proporcionalnosti koja zavisi od karakteristika materijala i naponskog stanja

k_2 [-] - konstanta proporcionalnosti koja zavisi od karakteristika materijala i naponskog stanja

K [MPa m^{1/2}] - faktor intenziteta napona

K_c [MPa m^{1/2}] - kritična vrednost faktora intenziteta napona

K_I [MPa m^{1/2}] - faktor intenziteta napona za prvi oblik razvoja prsline

K_{Ic} [MPa m^{1/2}] - žilavost loma pri ravnoj deformaciji (kritična vrednost faktora intenziteta napona)

K_{min} [MPa m^{1/2}] - donji nivo faktora intenziteta napona

K_{max} [MPa m^{1/2}] - gornji nivo faktora intenziteta napona

K_Q [MPa m^{1/2}] - uslovna žilavost loma

L [mm] - raspon između oslonaca

L_0 [mm] - dužina epruvete

m [kg] - masa krutog tega

m [-] - bezdimenzioni faktor u funkciji stanja napona i ponašanja materijala

m [-] - koeficijent u Parisovoj jednačini brzine rasta prsline

m_F [-] - koeficijent u Formanovoj jednačini brzine rasta prsline

m_K [-] - koeficijent u jednačini Klesnila i Lukasa za brzinu rasta prsline

m_R [-] - koeficijent u Vakerovoj jednačini brzine rasta prsline

m_v [-] - koeficijent u Vakerovoj jednačini brzine rasta prsline

M_f [°C] - temperatura završetka transformacije austenita u martenzit pri hlađenju

M_s [°C] - temperatura početka transformacije austenita u martenzit pri hlađenju

n [-] - eksponent deformacionog ojačavanja

n_v [-] - koeficijent u Vakerovoj jednačini brzine rasta prsline

\vec{n}_j [-] - jedinični vektor normalan na krivu S

N [ciklus] - broj ciklusa opterećenja
 N_i [ciklus] - broj ciklusa potrebnih da nastane zamorna prslina
 N_p [ciklus] - broj ciklusa potrebnih da zamorna prslina poraste do kritične veličine za lom
 N_u [ciklus] - ukupan broj ciklusa (ukupan vek zamora)
 p [bar] - pritisak
 p_i [bar] - ispitni pritisak
 $p_{isp.}$ [bar] - ispitni pritisak u reaktoru
 $p_{pr.}$ [bar] - proračunski pritisak u reaktoru
 p_r [bar] - radni pritisak
 $p_{rad.}$ [bar] - radni pritisak u reaktoru
 P [-] - plastičnost
 P [N] - sila
 q_p [kJ/cm] - linijska energija zavarivanja
 r [mm] - položaj polja napona ispred čela prsline
 $r_p^c(\theta)$ [mm] - veličina plastične zone ispred vrha prsline
 r_{1p}^* [mm] - poluprečnik kružnog oblika plastične zone
 R [-] - koeficijent asimetrije ciklusa
 R [-] - odnos gornjeg i donjeg nivoa faktora intenziteta napona
 R [mm] - poluprečnik valjaka (oslonaca)
 R_k [mm] - veličina K dominantne zone singulariteta
 R_m [MPa] - zatezna čvrstoća
 $R_{p0,2}$ [MPa] - uslovna granica tečenja
 R_T [MPa] - efektivni napon tečenja
 $s(t)$ [mm] - ugib epruvete
 s_A [mm] - deformacija na kraju nestabilnog rasta prsline
 s_F [mm] - deformacija pri inicijaciji nestabilnog rasta prsline
 s_{GY} [mm] - deformacija na početku plastičnog loma ligamenta
 s_M [mm] - deformacija pri maksimalnoj sili
 s_T [mm] - deformacija na kraju krive sila-deformacija
 S [MPa] - promenljivi napon
 S_a [MPa] - amplituda napona
 S_f [MPa] - trajna dinamička čvrstoća
 S_g [MPa] - gornji napon u ciklusu
 S_d [MPa] - donji napon u ciklusu
 S_{sr} [MPa] - srednji napon u ciklusu
 S [mm] - raspon između oslonaca
 S [-] - proizvoljna zatvorena linija integracije
 t [s] - vreme

t [s] - vreme trajanja loma

t_0 [s] - vreme početka deformacije

$t_{pror.}$ [°C] - proračunska temperatura reaktora

$t_{rad.}$ [°C] - radna temperatura reaktora

T_M [°C] - temperatura transformacije metala u ZUT

T_{ξ} [°C] - temperatura transformacije metala u šavu

T_t [°C] - temperatura topljenja

$\vec{T}_i = \sigma_{ij} n_j$ [MPa] - vektor zatezanja na krivoj S

\vec{u}_i [mm] - vektor pomeranja

U_a [J] - deformaciona energija tela sa prslinom

U_a^* [J] - komplementarna deformaciona energija

$v(t)$ [m/s] - promena brzine klatna za vreme loma

v_0 [m/s] - početna brzina udara

V_M [°C/s] - brzina hlađenja posle zavarivanja

V_p [mm] - pomeranje

V_{uk} [m³] - zapremina reaktora

W [J/m³] - gustina energije deformacije

W [mm] - širina epruvete

W_p [J] - rad spoljašnjih sila

Y [-] - bezdimenzioni faktor geometrije

Y [-] - korekcionni faktor

α [-] - bezdimenziona konstanta

Π [J] - potencijalna energija sistema

\mathcal{K} [-] - koeficijent u jednačini Klesnila i Lukasa za brzinu rasta prsline

\mathcal{K} [-] - koeficijent koji zavisi od tipa epruvete

\mathcal{K} [-] - nivo opterećenja

ν [-] - Poasonov koeficijent

ϵ [-] - relativna deformacija

δ [mm] - veličina otvaranja vrha prsline

δ_a [mm] - efektivno otvaranje prsline

δ_c [mm] - kritična vrednost otvaranja vrha prsline

δ_{c1} [mm] - kritična vrednost otvaranja vrha prsline za prvi oblik razvoja prsline

δ_1 [mm] - veličina otvaranja vrha prsline

Δa [mm] - priraštaj prsline
 $\Delta \sigma$ [MPa] - opseg napona
 ΔF [N] - opseg promenljive sile
 ΔK [MPa m^{1/2}] - opseg faktora intenziteta napona
 ΔK_{th} [MPa m^{1/2}] - prag osetljivosti opsega faktora intenziteta napona (prag zamora)
 Δp [bar] - promena pritiska
 ΔT [°C] - promena temperature
 η_i [-] - koeficijent koji zavisi od tipa epruvete
 ε_{ij} [-] - tenzor deformacije
 ε_0 [-] - referentna deformacija
 ε_T [-] - referentna deformacija
 σ [MPa] - delujući prosečni napon u udaljenom preseku
 σ_I [MPa] - glavni normalni napon
 σ_c [MPa] - preostala čvrstoća konstrukcije
 σ_d [MPa] - donji napon u ciklusu
 σ_0 [MPa] - referentni napon
 σ_T [MPa] - napon tečenja
 $\sigma_{0,2}$ [MPa] - uslovna granica tečenja
 σ_g [MPa] - gornji napon u ciklusu
 σ_{ij} [MPa] - komponente polja napona ispred čela prsline
 σ_{min} [MPa] - minimalna vrednost napona promenljivog opterećenja
 $\sigma_{max.20}$ [MPa] - maksimalno dozvoljeni napon na sobnoj temperaturi
 $\sigma_{max.pr}$ [MPa] - maksimalno dozvoljeni napon na proračunskoj temperaturi
 σ_{nom} [MPa] - nominalni radni napon
 σ_x [MPa] - komponenta normalnog napona u blizini vrha prsline
 σ_y [MPa] - komponenta normalnog napona u blizini vrha prsline
 σ_z [MPa] - komponenta normalnog napona u blizini vrha prsline
 τ_{ij} [MPa] - komponente polja napona ispred čela prsline
 τ [MPa] - tangencijalni napon
 τ [s] - vreme

Pregled slika

Slika 2.1.	Raspodela temperatura pri zavarivanju topljenjem [2]	5
Slika 2.2.	Zone zavarenog spoja [2]	6
Slika 2.3.	Mogući izgledi profila poprečnog preseka zavarenog spoja [2]	7
Slika 2.4.	Epitaksijalni rast kristalnih zrna pri očvršćavanju [3].	8
Slika 2.5.	Strukture u žarenom čeliku pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja [3].	9
Slika 2.6.	Strukture u hladnovaljanom čeliku pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja [3]	10
Slika 2.7.	Shematski prikaz KHZ dijagrama za ugljenični čelik [5].	11
Slika 2.8.	Loše konstrukcijsko rešenje zavarenog spoja [8]	12
Slika 2.9.	Kompaktne i izdužene greške [8]	14
Slika 2.10.	Podela grešaka po veličini [8]	15
Slika 2.11.	Podela pojedinačnih grešaka po brojnosti [8]	15
Slika 2.12.	Podela učestalih grešaka po brojnosti [8]	15
Slika 2.13.	Podela grešaka u gnezdu po brojnosti [8].	15
Slika 2.14.	Topografija toplih prslina u zavarenom spoju [9]	16
Slika 2.15.	Temperaturni interval krtosti (TIK) [9]	17
Slika 2.16.	Mehanizmi nastajanja toplih kristalizacionih prslina [9]	17
Slika 2.17.	Topla kristalizaciona prslina [9]	18
Slika 2.18.	Topla likvaciona prslina u ZUT [10]	18
Slika 2.19.	Različiti uticaji na sklonost čelika ka nastanku toplih prslina [10]	19
Slika 2.20.	Shematski prikaz hladnih prslina u ugaonim i sučeonim spojevima [11].	20
Slika 2.21.	Makrografski prikaz hladne prslina u ugaonom spoju [11].	20
Slika 2.22.	Mehanizam difuzije vodonika iz metala šava u ZUT [11]	22
Slika 2.23.	Shema toplotnog ciklusa ZUT pri elektrolučnom zavarivanju [11]	23
Slika 2.24.	Promena tvrdoće po debljini spoja [11]	24
Slika 2.25.	Uticaj predgrevanja, linijske energije i debljine na brzinu hlađenja [11].	24
Slika 2.26.	Primeri lamelarnih prslina nastalih usled loših konstrukcijskih rešenja [12]	24
Slika 2.27.	Primeri sprečavanja pojave lamelarnih prslina dobrim konstrukcijskim rešenjima [12]	25
Slika 2.28.	Prslina usled ponovnog zagrevanja-niskolegirani CrMoV čelik sa grubozrnim ZUT [12]	25
Slika 2.29.	Prslina usled ponovnog zagrevanja-visokolegirani CrNi čelik [12].	25
Slika 3.1.	Shema "trougla" mehanike loma [13]	34
Slika 3.2.	Izgled preloma broda "Liberty" [14].	35

Slika 3.3.	Nosači naftne platforme [15]	36
Slika 3.4.	Razvijena površina na mestu preloma [15]	36
Slika 3.5.	Sučeonni zavareni spoj sonarne prirubnice sa prslinama [15]	37
Slika 3.6.	Oblasti primene mehanike loma [16]	37
Slika 3.7.	Izbor materijala na osnovu žilavosti loma [18].	39
Slika 3.8.	Shematski prikaz razvoja prsline pri povećanju oštećenja i smanjenju preostale čvrstoće [18]	40
Slika 3.9.	Predviđanje veka konstrukcije i preostale čvrstoće [18]	41
Slika 3.10.	Osnovni pojavni oblici ravanske prsline [23].	43
Slika 3.11.	Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma [23]	43
Slika 3.12.	Komponente napona ispred čela prsline u prostornom sistemu pravougljih koordinata [24]	44
Slika 3.13.	Kontura integracije konturnog J-integrala [25].	46
Slika 3.14.	Zavisnosti σ - ε pri jednoosnom zatezanju [16]	47
Slika 3.15.	Grafička interpretacija J-integrala kao brzine oslobađanja elastične energije za nelinearno-elastično ponašanje tela sa prslinom [16].	48
Slika 3.16.	Ramberg-Osgudov model ponašanja materijala koji deformaciono ojačava i za $\sigma_0 = \sigma_T$ [16]	48
Slika 3.17.	Elastično-plastično polje napona u okolini vrha prsline definisano J-integralom [16]	49
Slika 3.18.	Efektivno otvaranje prsline δ_a i otvaranje vrha prsline δ_t za ravnomerno zategnutu ploču sa središnjom prolaznom prslinom [16]	50
Slika 3.19.	Makroskopski izgled zavarenog spoja [38].	53
Slika 3.20.	Epruveta za savijanje u tri tačke [26, 33]	54
Slika 3.21.	Kompaktna epruveta za zatezanje [26, 33]	54
Slika 3.22.	Presek kroz ZUT šava niskolegirano čelika povišene čvrstoće [40]	55
Slika 3.23.	Shematski prikaz procedura ispitivanja mehanike loma kod zavarenih spojeva prema BS 7448-deo 2 [34, 63]	57
Slika 3.24.	Način vađenja epruveta i položaj prsline pri ispitivanju metala šava [34] .	58
Slika 3.25.	Položaj zarez u epruvetama mehanike loma za ispitivanje zavarenog spoja [34]	58
Slika 3.26.	Primeri položaja zarez u specifičnim strukturama zavarenog spoja [34] .	59
Slika 3.27.	Shema vađenja uzoraka za ispitivanja žilavosti loma prema standardu AWS B4.0M:2000 [43].	60
Slika 3.28.	Načelno linearni rast prsline a-N, t pri konstantnom opsegu $\Delta K = \text{const}$ i uslovima ograničenog tečenje $r_p^c \ll R_k$ [46]	61
Slika 3.29.	Zavisnost dužine zamorne prsline od broja ciklusa [47]	62

Slika 3.30.	Načelni oblik promene brzine rasta $da/dN = f(\Delta K)$ za $R = 0$ i pravci pomeranja S-krive za odnose $R \neq 0$ [45]	63
Slika 3.31.	Uticaj odnosa napona R na dijagram rasta prsline [52]	64
Slika 4.1.	Sopstveni naponi pri zagrevanju kod čelika sa martenzitnom transformacijom [64]	67
Slika 4.2.	Raspodela termičkih zaostalih napona u podužnom ($y = 0$) i poprečnom ($x = 0$) pravcu [64].	67
Slika 4.3.	Shematski prikaz nastanka termičkih zaostalih napona [64]	68
Slika 4.4.	Zavisnost napon-deformacija i napon-temperatura u centru zavarenog spoja [64]	69
Slika 4.5.	Shematski prikaz ukupnog dejstva termičkih i strukturnih zaostalih napona [64]	69
Slika 4.6.	Raspodela zaostalih napona po debljini [64]	70
Slika 4.7.	Uticaj uklještenja na raspodelu spostvenih napona [64]	70
Slika 4.8.	Primeri ugaonog savijanja [64].	71
Slika 4.9.	Poprečno, podužno i upravno skupljanje [64]	71
Slika 4.10.	Vitoperenje usled skupljanja [64]	71
Slika 4.11.	Neutralisanje ugaonog savijanja [64]	72
Slika 4.12.	Zavarivanje pripajanjem [64].	72
Slika 4.13.	Načini sprečavanja deformacija [64]	72
Slika 4.14.	Uticaj redosleda popune žleba na raspodelu zaostalih napona [64]	73
Slika 4.15.	Ispravljanje dugačkih profila [64]	73
Slika 4.16.	Režim termičke obrade posle zavarivanja [64].	74
Slika 4.17.	Gorionici za cilindrične spojeve [64]	75
Slika 4.18.	Elektrootporno zagrevanje cevi [64].	75
Slika 4.19.	Shema indukcionog postupka zagrevanja cevi [64]	76
Slika 5.1.	Priprema žleba za zavarivanje limova.	80
Slika 5.2.	Shematski prikaz 'U' šava i mesta vađenja epruveta.	80
Slika 5.3.	Epruveta za određivanje zateznih svojstava sučeono zavarenog spoja [54]	81
Slika 5.4.	Epruveta za određivanje zateznih svojstava OM i MŠ [56]	81
Slika 5.5.	Elektromehanička kidalica za ispitivanje na sobnoj temperaturi.	82
Slika 5.6.	Epruvete za ispitivanje zatezanjem na povišenoj temperaturi [71]	82
Slika 5.7.	Elektromehanička kidalica za ispitivanje na povišenoj temperaturi.	82
Slika 5.8.	Dijagram napon-izduženje epruvete zavarenog spoja oznake ZS-1-1.	83
Slika 5.9.	Dijagram napon-izduženje epruvete zavarenog spoja oznake ZS-2-1.	84
Slika 5.10.	Dijagram napon-izduženje epruvete novog OM oznake OM-1-1N	85
Slika 5.11.	Dijagram napon-izduženje epruvete novog OM oznake OM-2-1N	85

Slika 5.12.	Dijagram napon-izduženje epruvete MŠ oznake MŠ-1-1.	86
Slika 5.13.	Dijagram napon-izduženje epruvete MŠ oznake MŠ-2-1.	87
Slika 5.14.	Epruveta za poprečno savijanje sučeono zavarenog spoja lima (lice ili koren metala šava)	89
Slika 5.15.	Shema ispitivanja savijanjem.	89
Slika 5.16.	Mehanička kidalica "Amsler"	90
Slika 5.17.	Shema merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju	91
Slika 5.18.	Grafički prikaz rezultata merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju novog i eksploatsanog OM	91
Slika 5.19.	Makrosnimak zavarenog spoja	92
Slika 5.20.	Mikrostruktura eksploatsanog OM, feritno-perlitna struktura.	93
Slika 5.21.	Mikrostruktura novog OM, feritno-perlitna struktura	93
Slika 5.22.	Mikrostruktura ZUT sa strane eksploatsanog OM ZUT zona (levo), linija stapanja (LS) i metal šava (MŠ)	94
Slika 5.23.	Mikrostruktura ZUT sa strane novog OM ZUT zona (desno), linija stapanja (LS) i metal šava (MŠ)	94
Slika 5.24.	Mikrostruktura MŠ dendritna struktura metala šava.	95
Slika 5.25.	Mikrostruktura eksploatsanog OM krupna svetla zrna ferita, tamno beinit, karbid po granicama i unutar zrna.	95
Slika 5.26.	Mikrostruktura novog OM krupna svetla zrna ferita, tamno beinit, količina karbida po granicama i unutar zrna minimalna	96
Slika 5.27.	Oblik i dimenzije standardne epruvete za ispitivanje metodom po Šarpiju sa V-zarezom [59]	96
Slika 5.28.	Položaj zareza u odnosu na zavareni spoj [60].	97
Slika 5.29.	Shematski prikaz savremenog instrumentiranog klatna [61].	97
Slika 5.30.	Tipičan dijagram sila-vreme dobijen na instrumentiranom klatnu [61].	98
Slika 5.31.	Tipovi dijagrama dobijeni ispitivanjem instrumentiranim klatnom [62]	100
Slika 5.32.	Instrumentirano Šarpi klatno SCHENCK TREBELL 150/300 J.	101
Slika 5.33.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-1-1n a) sila-vreme, b) energija-vreme	102
Slika 5.34.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-2-1n a) sila-vreme, b) energija-vreme	103
Slika 5.35.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-1-1e a) sila-vreme, b) energija-vreme.	104
Slika 5.36.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-2-1e a) sila-vreme, b) energija-vreme	105
Slika 5.37.	Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod novog i ekploatsanog OM.	106

Slika 5.38.	Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature kod novog OM	106
Slika 5.39.	Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature kod eksploitsanog OM . .	107
Slika 5.40.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete MŠ-1-1 a) sila-vreme, b) energija-vreme.	108
Slika 5.41.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete MŠ-2-1 a) sila-vreme, b) energija-vreme	109
Slika 5.42.	Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ	110
Slika 5.43.	Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ.	110
Slika 5.44.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-1-1n a) sila-vreme, b) energija-vreme	112
Slika 5.45.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-2-1n a) sila-vreme, b) energija-vreme	113
Slika 5.46.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-1-1e a) sila-vreme, b) energija-vreme	114
Slika 5.47.	Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-2-1e a) sila-vreme, b) energija-vreme	115
Slika 5.48.	Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT	116
Slika 5.49.	Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT sa strane novog OM	116
Slika 5.50.	Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT sa strane eksploitsanog OM	117
Slika 5.51.	Epruveta SEB za ispitivanje mehanike loma [26, 32].	119
Slika 5.52.	Kompaktna CT epruveta za ispitivanje mehanike loma [33].	120
Slika 5.53.	Stvaranje zamorne prsline na visokofrekventnom pulzatoru a) kod SEB epruvete, b) kod CT epruvete.	121
Slika 5.54.	Osnovni tipovi zapisa sila-pomeranje	121
Slika 5.55.	Shematski prikaz zavisnosti $J-\Delta a$ pri stabilnom razvoju prsline [31] . . .	122
Slika 5.56.	Prikaz postupka za izbor merodavnih tačaka za određivanje J_{Ic} prema preporukama ESIS [77].	123
Slika 5.57.	Izgled postupka ispitivanja a) SEB epruvete, b) CT epruvete.	125
Slika 5.58.	Shema postupka i uređaj za merenje dužine prsline	125
Slika 5.59.	Kriva sila F -otvaranje vrha prsline δ	126
Slika 5.60.	Plastična komponenta energije	128
Slika 5.61.	Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-1-1n	130
Slika 5.62.	Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-2-1n	131
Slika 5.63.	Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-1-1e	132
Slika 5.64.	Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-2-1e	133

Slika 5.65.	Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod OM .	134
Slika 5.66.	Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod OM. .	134
Slika 5.67.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete MŠ-1-1	136
Slika 5.68.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete MŠ-2-1	137
Slika 5.69.	Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ .	138
Slika 5.70.	Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ . .	138
Slika 5.71.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-1-1n.	140
Slika 5.72.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-2-1n.	141
Slika 5.73.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-1-1e.	142
Slika 5.74.	Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-2-1e.	143
Slika 5.75.	Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT	144
Slika 5.76.	Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT .	144
Slika 5.77.	Shema naizmenično promenljivog opterećenja $R = -1$	146
Slika 5.78.	Epruveta za dinamička ispitivanja prema ASTM E466 [66]	146
Slika 5.79.	S-N dijagram epruveta izvađenih iz sučeono zavarenog spoja i ispitanih na sobnoj i radnoj temperaturi	147
Slika 5.80.	S-N dijagram epruveta izvađenih iz novog OM i ispitanih na sobnoj i radnoj temperaturi	147
Slika 5.81.	Promena vrednosti trajne dinamičke čvrstoće S_f u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije	148
Slika 5.82.	Savremeni sistem za dinamička ispitivanja.	150
Slika 5.83.	Shema merne folije i načina registrovanja rasta prsline.	151
Slika 5.84.	Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline [79].	151
Slika 5.85.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-1-1n	153
Slika 5.86.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-2-1n	154
Slika 5.87.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-1-1e	155
Slika 5.88.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-2-1e	156
Slika 5.89.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu MŠ-1-1	157
Slika 5.90.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu MŠ-2-1	158
Slika 5.91.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-1-1n	159
Slika 5.92.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-2-1n	160
Slika 5.93.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-1-1e	161
Slika 5.94.	Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-2-1e	162
Slika 5.95.	Promena vrednosti ΔK_{th} kod OM	164
Slika 5.96.	Promena vrednosti ΔK_{th} kod MŠ.	165

Slika 5.97.	Promena vrednosti ΔK_{th} kod ZUT	165
Slika 5.98.	Promena da/dN u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije kod epruveta sa zarezom u OM.	166
Slika 5.99.	Promena da/dN u zavisnosti od temperature kod epruveta sa zarezom u MŠ	167
Slika 5.100.	Promena da/dN u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije kod epruveta sa zarezom u ZUT	167
Slika 6.1.	Shematski prikaz mernih mesta na reaktoru DC-304	170
Slika 6.2.	Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 1	172
Slika 6.3.	Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 1	172
Slika 6.4.	Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 2	173
Slika 6.5.	Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 2	173
Slika 6.6.	Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 3	174
Slika 6.7.	Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 3	174
Slika 6.8.	Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 4	175
Slika 6.9.	Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 4	175
Slika 6.10.	Zavisnost promene temperature od vremena na reaktoru u eksploataciji .	176
Slika 6.11.	Zavisnost promene pritiska od vremena na reaktoru u eksploataciji . . .	177
Slika 6.12.	Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 1	178
Slika 6.13.	Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 2	179
Slika 6.14.	Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 3	179
Slika 6.15.	Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 4	180
Slika 7.1.	Udeo perioda iniciranja N_i i perioda rasta zamorne prsline N_p u ukupnom veku zamora N_u [85].	181
Slika 7.2.	Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod novog OM	186
Slika 7.3.	Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod eksploatisanog OM.	186
Slika 7.4.	Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod MŠ	187
Slika 7.5.	Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT sa strane novog OM	187
Slika 7.6.	Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT sa strane eksploatisanog OM	188

Pregled tabela

Tabela 2.1.	Izbor zahteva kvaliteta	26
Tabela 2.2.	Upoređenje zahteva kvaliteta pri zavarivanju u odnosu na EN ISO 3834-2, 3834-3 i 3834-4	27
Tabela 2.3.	Prednosti, nedostaci i primena postupaka zavarivanja u čvrstom stanju	32
Tabela 2.4.	Prednosti i nedostaci postupaka zavarivanja topljenjem.	32
Tabela 4.1.	Deformacije i naponi u štapu tokom ciklusa zagrevanje-hlađenje [64]	66
Tabela 5.1.	Hemijski sastav uzoraka eksploatisanog i novog OM	78
Tabela 5.2.	Mehaničke osobine uzoraka eksploatisanog i novog OM.	78
Tabela 5.3.	Hemijski sastav dodatnog materijala za zavarivanje	79
Tabela 5.4.	Mehanička svojstva dodatnog materijala	79
Tabela 5.5.	Rezultati zateznih ispitivanja zavarenog spoja	83
Tabela 5.6.	Rezultati zateznih ispitivanja epruveta novog OM.	84
Tabela 5.7.	Rezultati zateznih ispitivanja epruveta MŠ	86
Tabela 5.8.	Rezultati ispitivanja na savijanje sučeono zavarenog spoja	90
Tabela 5.9.	Rezultati merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju	91
Tabela 5.10.	Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u novom OM.	101
Tabela 5.11.	Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploatisanom OM	101
Tabela 5.12.	Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u MŠ	107
Tabela 5.13.	Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u novom ZUT	111
Tabela 5.14.	Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT	111
Tabela 5.15.	Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u novom OM	129
Tabela 5.16.	Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u eksploatisanom OM	129
Tabela 5.17.	Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u MŠ	135
Tabela 5.18.	Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u novom ZUT	139
Tabela 5.19.	Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT.	139
Tabela 5.20.	Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u novom OM	163
Tabela 5.21.	Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u eksploatisanom OM	163
Tabela 5.22.	Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u MŠ.	163
Tabela 5.23.	Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u novom ZUT	163
Tabela 5.24.	Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u eksploatisanom ZUT.	164
Tabela 6.1.	Izmerene mikrodeformacije i izračunati naponi na reaktoru u toku probe HVP	171
Tabela 6.2.	Rezultati određivanja deformacijskog i naponskog stanja na reaktoru u eksploataciji	178

Tabela 7.1.	Preostali eksploatacioni period-prslina u novom OM	184
Tabela 7.2.	Preostali eksploatacioni period-prslina u eksploatisanom OM	184
Tabela 7.3.	Preostali eksploatacioni period-prslina u MŠ	185
Tabela 7.4.	Preostali eksploatacioni period-prslina u ZUT sa strane novog OM. . .	185
Tabela 7.5.	Preostali eksploatacioni period-prslina u ZUT sa strane eksploatisanog OM	185

1. UVOD

1.1. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Za pouzdanost i sigurnost procesne opreme naročito je važno da se obuhvate korektno utvrđeni parametri osobina materijala i zavarenih spojeva i da se sakupe podaci o uslovima eksploatacije. Vek postrojenja je uslovljen dobrom konstrukcijom, materijalom odgovarajućih osobina i kvaliteta, kvalitetno izabranom i dobro sprovedenom tehnologijom zavarivanja i prikladnom tehnologijom u proizvodnji, pod uslovom da opterećenja budu u skladu sa očekivanim. Značajni podaci o tome treba da se dobiju i iz analize eksploatacijskih oštećenja. Praćenje promena na konstrukcionim materijalima i njihovim zavarenim spojevima u uslovima eksploatacije se praktično sprovodi tokom celokupnog radnog veka, i to pri planiranim i vanrednim remontima, za potrebe rekonstrukcije i revitalizacije procesne opreme u slučaju havarijskih otkaza. Praćenje i kontrola osobina konstrukcionih materijala i zavarenih spojeva kod visokotemperaturski opterećenih delova, izloženih i visokom pritisku u koroziono aktivnim sredinama, predstavlja osnovni pokazatelj pouzdanosti njihovog rada.

Predmet ove doktorske disertacije je analiza uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama. Ova analiza se odnosi na osnovni materijal i komponente zavarenog spoja posude pod pritiskom koja radi u uslovima povišene temperature (do 550°C) i visokog pritiska (do 55bar).

Opšte je poznato da pojedine komponente procesne opreme koje rade u uslovima povišenih temperatura predstavljaju kritična mesta zbog visokih radnih parametara, posebno imajući u vidu da su pojedine posude pod pritiskom u upotrebi duže od projektovanog radnog veka. Eventualni otkaz na ovim posudama predstavljao bi opasnost ne samo po rad postrojenja, već i po sredinu koja ih okružuje.

U slučaju postojanja oštećenja potrebno je precizno proceniti integritet komponente i doneti odluku o njenoj daljoj eksploataciji. Zbog toga je porastao značaj produženja radnog veka i revitalizacije, kao načina da se starija postrojenja zadrže u pogonu. Preliminarne studije urađene u Electric Power Research Institute (EPRI), Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI), kao i European Creep Collaborative Committee (ECCC) pokazuju da cena revitalizacije komponenti termoenergetskih i petrohemijskih postrojenja može biti od 20% do 30% od cene izgradnje novih postrojenja. Pri tome se pod revitalizacijom podrazumeva osiguranje potpunog iskorišćenja veka, pomoću selektivne zamene komponenata sa drugim modernije projektovanim. Osnovni pristup u revitalizaciji je procena preostalog radnog veka.

Problem se dodatno usložnjava prisustvom zavarenih komponenti, kod kojih ne sme da se isključi mogućnost postojanja grešaka tipa prslina. Isto tako treba imati na umu da su komponente procesne opreme u eksploataciji izložene delovanju promenljivog opterećenja koje u kombinaciji sa povišenim temperaturama predstavlja realnu opasnost pojave oštećenja. U slučaju zavarenih spojeva komponentata izloženih povišenom pritisku i temperaturi, problemi u eksploataciji se po pravilu javljaju u karakterističnim zonama zavarenih spojeva. Analizu problema otežava heterogenost strukturnih i mehaničkih osobina pojedinih područja zavarenih spojeva i njihovo ponašanje u eksploataciji.

Kako je kod materijala predviđenih za rad na povišenim temperaturama, a pogotovo kod njihovih zavarenih spojeva u prisustvu prslina neminovna pojava plastične deformacije, bilo lokalno ili u celom preseku, to je za analizu njihovog ponašanja neophodna primena metoda elasto-plastične mehanike loma (EPML) kao što su J -integral i otvaranje vrha prslina ($CTOD$).

Za eksploatacijsku sigurnost zavarenih konstrukcija kao i za procenu integriteta i preostalog veka, najvažnije su karakteristike, koje opisuju pojavu i rast prslina pod uticajem promenljivog opterećenja. Pojavu zamornih prslina na konstrukcijski glatkim i homogenim oblicima usled lokalne koncentracije napona na neizbežnim konstrukcijskim prelazima i promenama poprečnih preseka još uvek nije moguće opisati nekim jednostavnim zavisnostima opterećenja, napona, karakteristika materijala i veličine poprečnog preseka, pa se koriste empirijski izvedene zavisnosti, po pravilu uslovljene obimnim eksperimentalnim i laboratorijskim ispitivanjima. Opšte prihvaćena karakteristika u tom slučaju je **zamorna čvrstoća** ili tzv. "**safe-life**" princip u okviru koga se primenom Velerove krive određuje vek komponente bez prslina. U skladu sa tim, projektovanje delova zavarenih konstrukcija na osnovu mogućeg zamora materijala zasnovano je na korišćenju zamorne čvrstoće i iskustvenim preporukama, izvedenim iz analize otkaza delova u eksploataciji i obimnih ispitivanja. Pojava zamorne prslina uslovljava da se dalje ponašanje materijala oko vrha prslina razmatra na osnovu mikromehaničkog aspekta umesto globalnog aspekta, odnosno po principu konstruisanja sa sigurnošću od loma (tzv. "**fail-safe**" princip) kod koga se vek određuje kao period rasta prslina od neke početne veličine do veličine prslina koja je kritična u odnosu na krti lom.

Drugim rečima, prikupljena saznanja o rastu zamorne prslina su omogućila da se sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vek komponente sa prslinom i na taj način proceni da li komponenta može da radi do sledeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamenjuju pre nego što se redovnim kontrolama otkriju prslina ili slične greške.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja biće analiziran uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog materijala, komponenti zavarenog spoja i same posude pod pritiskom predviđene za rad na povišenim temperaturama, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, revitalizacije i produženja radnog veka procesne opreme izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

1.2. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Osnovni cilj istraživanja u okviru ove disertacije je da se na osnovu izvršenih mehaničko-eksploatacijskih ispitivanja na sobnoj i radnoj temperaturi izvrši izbor kriterijuma prihvatljivosti grešaka u osnovnom materijalu i komponentama zavarenog spoja, što predstavlja osnovni uslov za pouzdanu procenu integriteta i preostalog veka procesne opreme u toku eksploatacije. Takođe, doprinos će biti i u oceni osobina zavarenih spojeva ispitivanjem epruveta sa prslinom. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja biće analiziran

uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog materijala i zavarenog spoja čelika za rad na povišenim temperaturama pri delovanju promenljivog opterećenja i dat praktičan doprinos poboljšanju kvaliteta zavarenih spojeva, a sve u cilju revitalizacije i produženja radnog veka vitalnih komponenti postrojenja procesne opreme izrađenih od legiranih čelika za rad na povišenim temperaturama.

Osnovne metode koje će u toku istraživanja biti primenjene su teorijske i eksperimentalne, gde je predviđeno da se istraži uticaj vremena eksploatacije na promenu mehaničko-eksploatacijskih i strukturnih svojstava osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja legiranog čelika predviđenog za rad na povišenim temperaturama.

Polazna osnova za ove metode istraživanja će biti već postojeći postupci za procenu integriteta i preostalog veka konstrukcije, koji će biti dopunjeni eksploatacionim ispitivanjima na povišenoj temperaturi, a sve u cilju revitalizacije i produženja radnog veka vitalnih komponenti postrojenja procesne opreme izrađenih od legiranih čelika za rad na povišenim temperaturama.

Osnovna hipoteza od koje se polazi u disertaciji je da se u slučaju zavarenih spojeva komponenta izrađenih od čelika izloženih promenljivom opterećenju i povišenoj temperaturi, problemi u eksploataciji po pravilu javljaju u komponentama zavarenih spojeva. Analizu problema otežava heterogenost strukturnih i mehaničkih osobina pojedinih područja zavarenih spojeva i njihovo ponašanje u eksploataciji. Dugogodišnji eksploatacioni period komponenti procesne opreme, nameće traženje odgovora na dva osnovna pitanja:

- ⇒ U kakvom je stanju osnovni materijal, komponente zavarenog spoja i sama posuda pod pritiskom nakon dugogodišnje eksploatacije, i
- ⇒ Da li je na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja moguće dati proceduru kojom se može izvršiti procena integriteta i preostalog veka korišćenja posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama.

Parametre mehanike loma kao što je kritični faktor intenziteta napona K_{Ic} i parametre rasta zamorne prsline da/dN , primenjene na analizu ponašanja zavarenih komponenta procesne opreme izloženih eksploatacionim uslovima (povišeni pritisak, promenljivo opterećenje i povišena temperatura) moguće je primeniti i pri proceni integriteta ovih konstrukcija.

Na osnovu prezentiranog predmeta, cilja, kao i metoda istraživanja i ispitivanja, očekuje se da osnovni doprinos ove disertacije bude u implementaciji izvedenih istraživanja, kao i u definisanju osnovnih parametara i kriterijuma prihvatljivosti koji će omogućiti sigurnost u eksploataciji komponenti postrojenja procesne opreme namenjene za rad u uslovima delovanja povišenog pritiska i povišenih temperatura.

2. OBEZBEĐENJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA

Izrada zavarenih spojeva topljenjem je jedini način da se postigne čvrstoća spoja nivoa osnovnog materijala, ali pri tome niz metalurških i termičkih pojava i drugih problema često uslovljava pojavu različitih grešaka. U realnim uslovima ne sme da se isključi mogućnost pojave grešaka u zavarenom spoju, niti je ekonomski opravdano praviti spojeve bez grešaka. Optimalno tehno-ekonomsko rešenje je u proizvodnji dovoljno kvalitetnih zavarenih spojeva po što manjoj ceni, pri čemu se pod pojmom kvalitet podrazumeva sposobnost da se zadovolje potrebe korisnika.

Problemom **kvaliteta zavarenih spojeva** se bave mnogi standardi, kako u oblasti zavarivanja, tako i u oblasti zavarenih konstrukcija, kao što su posude pod pritiskom, kotlovi i metalne konstrukcije. U zavisnosti od odgovornosti zavarenog spoja zahtevani kvalitet se deli na nivoe **B** (visoki), **C** (srednji) i **D** (niski), koji se prema SRPS C.T3.010/95 [1] postižu ispunjenjem odgovarajućih tehničkih zahteva u vezi sa vrstom spojeva, osnovnim, dodatnim i pomoćnim materijalom, pripremom delova i tehnologijom zavarivanja, stručnom osposobljenošću zavarivača, radnim uslovima i položajima pri izradi spoja, kontrolom kvaliteta, kao i obradom lica i korena šava. Ovakav pristup spada u tzv. "**upotrebnu spremnost**" ("**fitness-for-purpose**") i podrazumeva dokaz integriteta konstrukcije u radnim uslovima. Suština ovog pristupa je u detaljnom poznavanju grešaka koje nastaju zavarivanjem i proceni njihovog uticaja na integritet zavarene konstrukcije, što omogućava definisanje **graničnih vrednosti veličine greške** u zavisnosti od nivoa kvaliteta.

Osim ovako definisanih graničnih vrednosti veličine grešaka, koje mogu da se smatraju standardnim inženjerskim postupkom, a koji je u nekim slučajevima suviše konzervativan, postoji mogućnost primene osnovnih zakona mehanike loma, koji bi u takvim slučajevima preciznije definisali granične vrednosti veličine greške, kao što će biti objašnjeno u sledećem poglavlju.

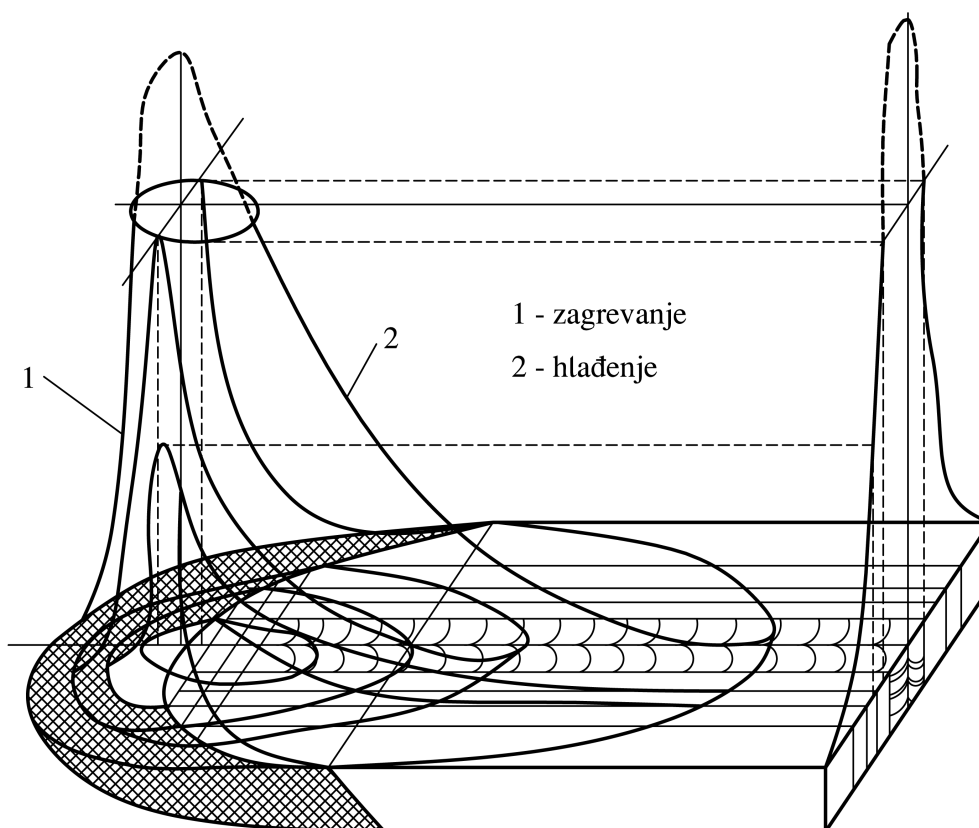
2.1. STRUKTURNI I FAZNI PREOBRAŽAJI U ČELIKU PRI ZAVARIVANJU

Mehaničke, tehnološke i upotrebne osobine čelika i zavarenih spojeva su određene strukturom koja se obično sastoji od više mikrokonstituenata. Zavarivanje čelika je povezano sa zagrevanjem i hlađenjem metala, proticanjem strukturno-faznih preobražaja, promenama temperaturnog i naponskog polja. U cilju kontrolisanja i ostvarivanja željene strukture neophodno je znati zakonitosti njenog obrazovanja.

2.1.1. Uzroci pojave različitih mikrostruktura pri zavarivanju

Teorijski bi metal, u zoni zavarenog spoja, trebao da ima isti kompleks osobina kao i osnovni metal, odnosno isti nivo čvrstoće, plastičnosti, žilavosti, otpornosti na krti lom, istu toplotnu postojanost i otpornost prema koroziji, itd. Međutim, to nije slučaj, čak šta više, u zavarenom spoju kao celini može da se javi značajna razlika u navedenim svojstvima. Metode ocene navedenih osobina zavarenih spojeva umnogome su analogne metodama ocene odgovarajućih osobina metalnih materijala. Pri oceni svojstava zavarenih spojeva treba imati u vidu izvesne osobenosti, koje su u vezi sa termo-deformacionim ciklusom zavarivanja kao i promenom mikrostrukture i faznog stanja metala u zoni oko šava.

Da bi mogla da se definiše ocena svojstava u pojedinim zonama zavarenog spoja, neophodno je znati kako dolazi do stvaranja tih zona. Poznato je da se svi postupci zavarivanja mogu svrstati u dve osnovne kategorije koje čine postupci zavarivanja topljenjem i postupci zavarivanja pritiskom. Suštinska razlika između ove dve kategorije postupaka je u količini toplote unete u zonu zavarivanja koja se, pošto su metalni materijali dobri provodnici toplote, kondukcijom prenosi i na okolni materijal koji direktno ne učestvuje u procesu zavarivanja. Sa povećanjem količine unete toplote raste i temperatura zagrevanja okolnog materijala kao i njegova širina, sl. 2.1. Pošto pri primeni postupaka zavarivanja topljenjem mora da dođe do topljenja ivice žleba, jasno je da će materijal u okolini žleba da bude zagrejan do veoma visokih temperatura koje se, inače, ne postižu pri postupcima zavarivanja pritiskom. Zavisno od postupka zavarivanja topljenjem, odnosno količine toplote i koncentrisanosti izvora toplote, oblast zagrevanja osnovnog materijala u okolini žleba je različita. Pri primeni gasnog zavarivanja ostvaruje se najveća oblast zagrevanja zato što je za ovaj postupak karakteristična veoma mala koncentrisanost, odnosno veliko rasipanje izvora toplote.

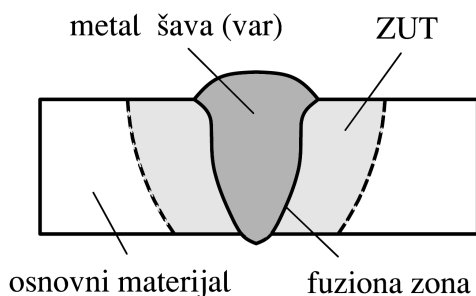


Slika 2.1. Raspodela temperatura pri zavarivanju topljenjem [2]

Tokom zavarivanja, osnovni materijal najbliži žlebu se zagreva skoro do temperature topljenja a sa udaljavanjem od ivice žleba temperatura opada sve do sloja materijala čija se temperatura uopšte nije menjala. Na taj način se u zoni osnovnog materijala oko šava stvara gradijent temperature u intervalu od temperature topljenja pa do bilo koje temperature u zoni osnovnog materijala na određenom rastojanju od ivice žleba. Pri hlađenju spoja, po završetku zavarivanja, svaka zona se hladi sa temperature na koju je prethodno zagrejana i sa različitom brzinom hlađenja. Pošto deo materijala u okolini žleba trpi zagrevanje i hlađenje tokom zavarivanja, to znači da je neminovno očekivati u toj oblasti, nezavisno od vrste materijala koja se zavaruje, određene promene u strukturi materijala a samim tim i osobinama. Strukturne promene koje mogu da se jave pri zagrevanju i hlađenju metalnih materijala pri zavarivanju su rast i ogrubljanje kristalnih zrna, rekristalizacija, alotropske transformacije, eutektoidno razlaganje, rastvaranje i taloženje sekundarnih faza. Pored strukturnih promena i dejstva naponskog i termičkog gradijenta, često se, u zoni materijala koja je pod uticajem toplote, javlja i hemijska nehomogenost [2].

Drugim rečima, zavarivanje metalnih materijala je povezano sa proticanjem složenog kompleksa promene faznog i strukturnog stanja metala kao posledice uslova unošenja toplote, neravnomernog toplotnog polja, lokalnih zagrevanja, specifičnih uslova hlađenja, itd. Veličina brzine zagrevanja i hlađenja određuje osobenosti proticanja faznih preobražaja, a prisustvo gradijenta temperature i napona različitost u procesima faznih i strukturnih preobražaja po zonama. Na taj način specifični procesi pri zagrevanju i hlađenju zavarenih spojeva određuju neka bitna karakteristična svojstva zavarenog spoja, koja u krajnjoj liniji određuju njegova eksploataciona svojstva.

Kod zavarenih spojeva, koji se obrazuju zavarivanjem topljenjem, može da se uoči postojanje nekoliko zona koje se razlikuju po hemijskom sastavu, makro i mikro strukturi i po drugim osobenostima. Zone koje se javljaju u zavarenim spojevima su: zona metal šava (var), zona stapanja (fuzionna zona), zona uticaja toplote (ZUT) i zona osnovnog metala (OM), sl. 2.2.

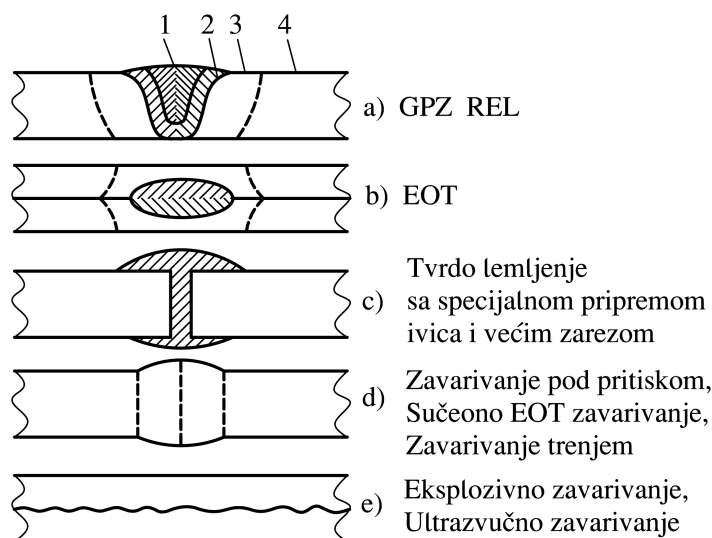


Slika 2.2. Zone zavarenog spoja [2]

Usvojeno je da se pod zonom uticaja toplote podrazumeva oblast u osnovnom materijalu koja je pretrpela strukturne promene u odnosu na polaznu strukturu materijala.

2.1.2. Makrostruktura zavarenog spoja

Mogući izgled profila poprečnog preseka zavarenog spoja može da se svrsta u jednu od pet sledećih kategorija prikazanih na sl. 2.3. U prve tri kategorije metalni spoj se obrazuje pri kontaktu tečnog i čvrstog stanja materije, dok se zadnje dve kategorije ostvaruju pri kontaktu u čvrstom stanju.



Slika 2.3. Mogući izgledi profila poprečnog preseka zavarenog spoja [2]

Spoj tečno-čvrsto (1, 2, 3). Posle makronagrizanja prethodno pripremljenog, brušenjem i poliranjem, poprečnog preseka zavarenog spoja mogu da se uoče četiri, po boji različite zone:

- ⇒ zona metala šava koja je obrazovana očvršćavanjem rastopljenog metalnog kupatila i koja je u literaturi poznata kao zona topljenja;
- ⇒ uska oblast zone stapanja (fuziona zona) koja se nalazi neposredno na granici zone topljenja;
- ⇒ zona uticaja toplote (ZUT) u kojoj se javljaju strukturne promene u osnovnom materijalu zavisno od vremena držanja na relativno visokoj temperaturi, postupka zavarivanja i režima hlađenja; posle izvođenja tvrdog lemljenja ZUT je relativno male širine zato što je temperatura zagrevanja niža, i
- ⇒ zona osnovnog metala (OM) koji treba da bude sa nepromenjenom strukturom, mada u ovoj oblasti može da dođe do pojave zaostalih napona i eventualnog krivljenja i vitoperenja zavarenog spoja.

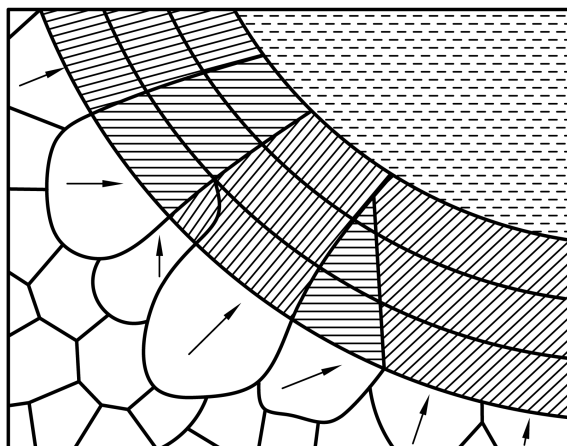
Spoj čvrsto-čvrsto (4, 5). Ovakvi spojevi se obrazuju u prelaznoj zoni sa delimičnim topljenjem ivica koje se zavaruju ili bez njihovog topljenja. U ovakvim slučajevima zona topljenja potpuno odsustvuje dok zona uticaja toplote može ponekad da se javi.

2.1.3. Mikrostruktura spojeva zavarenih postupcima topljenja

2.1.3.1 Zona topljenja

Zona topljenja ili oblast metal šava se dobija popunjavanjem prethodno pripremljenog žleba rastopljenim dodatnim materijalom, koji zavisno od postupka zavarivanja kao i vrste i debljine materijala koji se zavaruje može da bude u vidu neobložene žice (GZ, MIG, MAG, TIG, EPP) i obložene žice (REL). Kao što je poznato postoje i postupci zavarivanja kod kojih se ne koristi dodatni materijal za popunjavanje žleba, već se tope ivice osnovnog materijala čijim se očvršćavanjem ostvaruje zavareni spoj. Da bi došlo do obrazovanja zone topljenja neophodno je da i dodatni materijal kojim se vrši popunjavanje žleba i ivice osnovnog materijala koji se zavaruju budu zagrejani iznad likvidus temperature za dati materijal, što u slučaju čelika znači iznad A_5 temperature.

Rastopljeni metal očvršćava u pravcu najvećeg gradijenta temperature, odnosno u pravcu u kome je odvođenje toplote najveće. Očvršćavanje, u slučaju zavarivanja istorodnih materijala, uvek započinje na kristalnim zrnima osnovnog materijala koja nisu pretrpela topljenje, sl. 2.4, a rast je epitaksijalni u pravcu prostiranja najgušće pakovanih ravni [3].



Slika 2.4. Epitaksijalni rast kristalnih zrna pri očvršćavanju [3]

Pošto kod svih legura metala koji mogu da se zavaruju topljenjem postoji i zona u kojoj je materijal zagrejan između likvidus i solidus temperature gde se tečna i čvrsta faza nalaze u ravnoteži, jasno je da će primarno očvršćavanje upravo početi na kristalnim zrnima u ovoj zoni koja su u čvrstom stanju. Ova zona je inače poznata kao zona stapanja. S obzirom da se u ovoj zoni javlja mešanje stopljenog metala šava i osnovnog metala, u slučaju zavarivanja raznorodnih metala u ovoj oblasti se izdvaja i prelazna oblast koja se odlikuje specifičnom raspodelom hemijskih elemenata i osobina.

Po završetku očvršćavanja metal šav ima karakterističnu strukturu livenja. Realni uslovi očvršćavanja su takvi da šav, naročito u sloju koji poslednji očvršćava, ima izrazitu dendritnu strukturu za koju je karakteristična pojava likvacije-lokalne hemijske nehomogenosti zbog nedostatka vremena za difuziju atoma legirajućih elemenata a u cilju izjednačavanja hemijskog sastava u okviru jednog zrna.

2.1.3.2 Zona uticaja toplote

U zoni uticaja toplote, pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja, može da se odvija čitav niz faznih i strukturnih preobražaja. Pod faznim preobražajima se podrazumevaju preobražaji sa obrazovanjem novih faza koje se od prethodnih razlikuju po atomsko-kristalnoj strukturi, osobinama a često i sastavom. Pri strukturnim preobražajima se javlja promena gustine i preraspodela grešaka kristalne rešetke, legirajućih elemenata i primesa, promena strukture postojećih faza koja se odnosi na obrazovanje novih granica i rast zrna kao i koagulacija i sferoidizacija faza. Najsloženija promena mikrostrukture pri zavarivanju se javlja kod čelika, jer je za njega karakteristično odvijanje i strukturnih i faznih transformacija. U okviru razmatranja preobražaja čelika pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja zanemarena je pojava, u veoma uskom intervalu, δ -ferita na visokim temperaturama.

Preobražaji u čeliku pri zagrevanju-polazna struktura žarenog ugljeničnog čelika. Sa porastom temperature pri zagrevanju tokom zavarivanja podeutektoidnog ugljeničnog čelika dolazi do sledećih preobražaja, sl. 2.5 [3]:

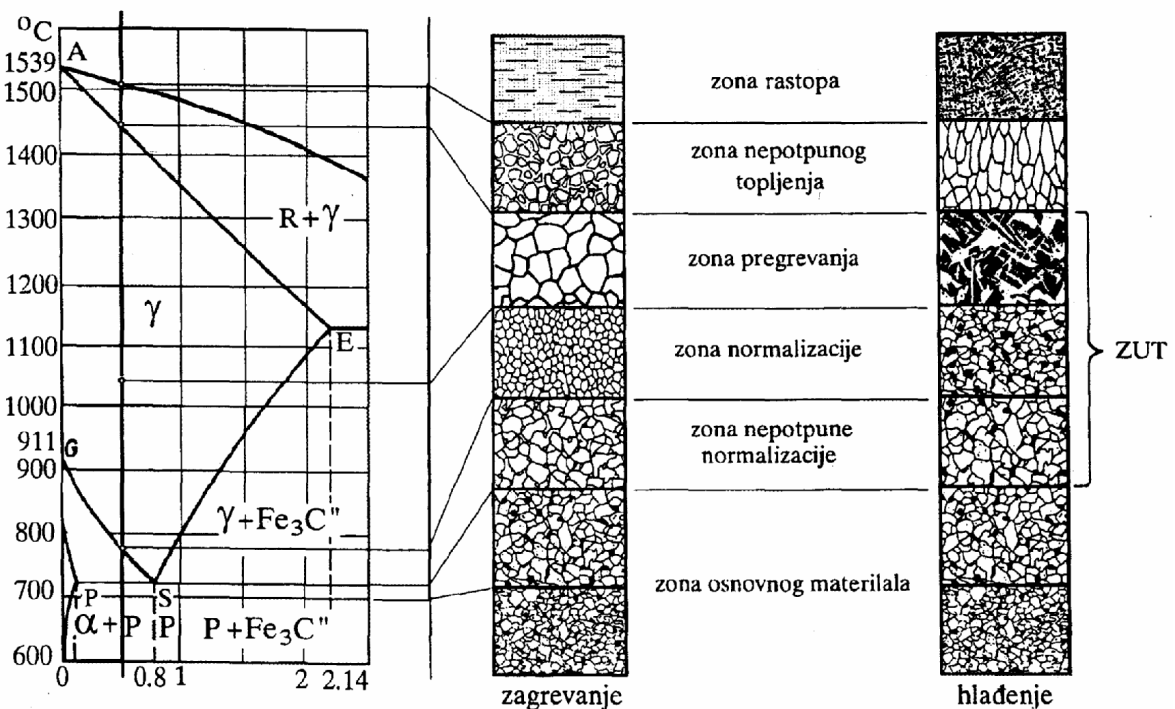
- ⇒ zagrevanjem do A_1 linije feritno-perlitna struktura i dalje dominira, ali feritno zrno postaje sve krupnije (zona osnovnog materijala);

- ⇒ između A_1 i A_3 linija struktura se sastoji od krupnozrnog ferita i sitnozrnog austenita (zona nepotpune normalizacije);
- ⇒ iznad A_3 linije austenitizacija je završena (zona normalizacije);
- ⇒ oblast koja je najbliža ivicama rastopljenog žleba je zagrejana skoro do solidus (A_4) linije, pa je u njoj dominantan krupnozrni austenit (zona pregrevanja), i
- ⇒ iznad A_4 linije nastaje delimično topljenje po granicama austenitnih zrna (zona nepotpunog topljenja).

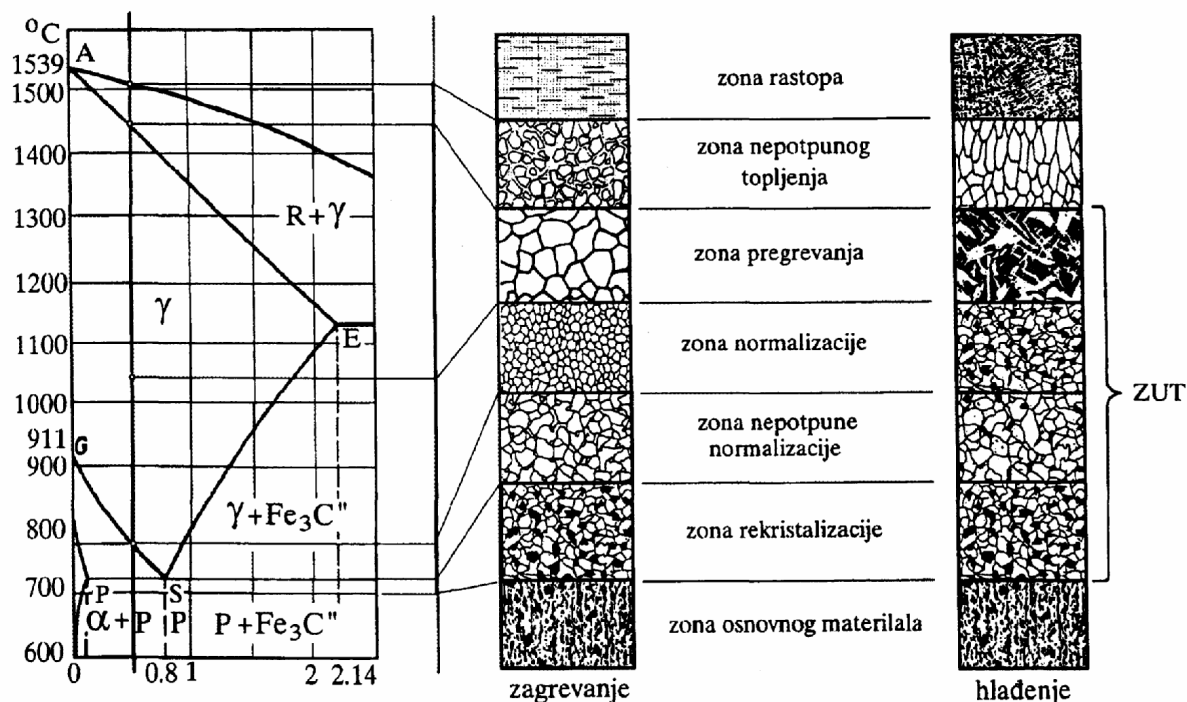
Preobražaji u čeliku pri zagrevanju-polazna struktura hladnodeformisanog ugljeničnog čelika. Pri zagrevanju tokom zavarivanja podeutektoidnog čelika u hladnodeformisanom stanju čija je struktura takođe feritno perlitna ali sa izduženim, deformisanim zrnima, javljaju se sledeći preobražaji, sl. 2.6 [3]:

- ⇒ na temperaturama iznad $0,4 \cdot T_r$ (temperatura rekristalizacije) počinje rekristalizacija feritne osnove, stvaraju se centri za kristalizaciju novih nedeformisanih zrna koji rastu, tako da je za ovu oblast karakteristično postojanje poligonalnih ravnoosnih zrna ferita;
- ⇒ po dostizanju A_1 temperature počinje obrazovanje austenita iz perlita;
- ⇒ između A_1 i A_3 strukturu čine krupnija zrna ferita i sitnija zrna austenita;
- ⇒ iznad A_3 temperature strukturu čine sitna zrna austenita;
- ⇒ ispod A_4 temperature usled visoke temperature odnosno pregrevanja javlja se u strukturi veoma krupno i grubo zrno austenita, i
- ⇒ kod čelika podložnih starenju pri zagrevanju ispod temperature rekristalizacije može da dođe i do tzv. sopstvenog starenja usled izdvajanja sekundarnih faza.

Preobražaji u čeliku pri hlađenju. Pri hlađenju, posle izvedenog zavarivanja, u zoni uticaja toplote se obrazuje konačna struktura zavarenog spoja. U okviru zone uticaja toplote javljaju se tri, sl. 2.5, odnosno četiri, sl. 2.6 zone, sa strukturama koje se međusobno razlikuju ne samo po izgledu već i po osobinama.



Slika 2.5. Strukture u žarenom čeliku pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja [3]



Slika 2.6. Strukture u hladnovaljanom čeliku pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja [3]

Prva zona, koja je označena kao **zona pregrevanja**, se obrazuje hlađenjem iz oblasti krupnog i grubog austenitnog zrna. Zbog brzine zagrevanja pri zavarivanju nastala krupna austenitna zrna se ne odlikuju homogenom raspodelom ugljenika, već postoje oblasti u okviru jednog zrna koje su značajno osiromašene ugljenikom, odnosno oblasti u kojima je sadržaj ugljenika visok. Pri hlađenju, u osiromašenim oblastima austenitnog zrna na ugljeniku su stvoreni uslovi za obrazovanje feritne faze koja ima specifičan krupnoigličasti izgled.

Ferit ovakvog izgleda je poznat kao Vidmanštetenova struktura. Oblasti u austenitnom zrnu koje su obogaćene na ugljeniku se u ekstremnom slučaju transformišu u martenzit. Zona pregrevanja koja se sastoji od krupnoigličastog Vidmanštetenovog ferita i martenzita se odlikuje visokom tvrdoćom i povećanom krtošću odnosno smanjenom žilavosti usled čega predstavlja povoljno mesto za pojavu prslina. Pošto prisustvo ove zone nepovoljno utiče na performanse zavarenog spoja neophodno je po zavarivanju primeniti odgovarajuću termičku obradu za poboljšanje svojstava. U slučaju legiranih čelika, a zavisno od legirajućih elemenata zona pregrevanja u ovakvom strukturnom obliku može da odsustvuje [4].

Druga zona je poznata kao **zona normalizacije** a nastaje hlađenjem iz oblasti sitnozrnastog austenitnog zrna. Prema temperaturi sa koje se vrši hlađenje i prema brzini kojom se vrši hlađenje ova zona odgovara uslovima koji se primenjuju pri termičkoj obradi normalizacije po kojoj je ova zona i dobila ime. Hlađenjem zavarenog spoja u ovoj oblasti se obrazuje sitnozrnasta feritno-perlitna struktura sa veoma povoljnom kombinacijom osobina.

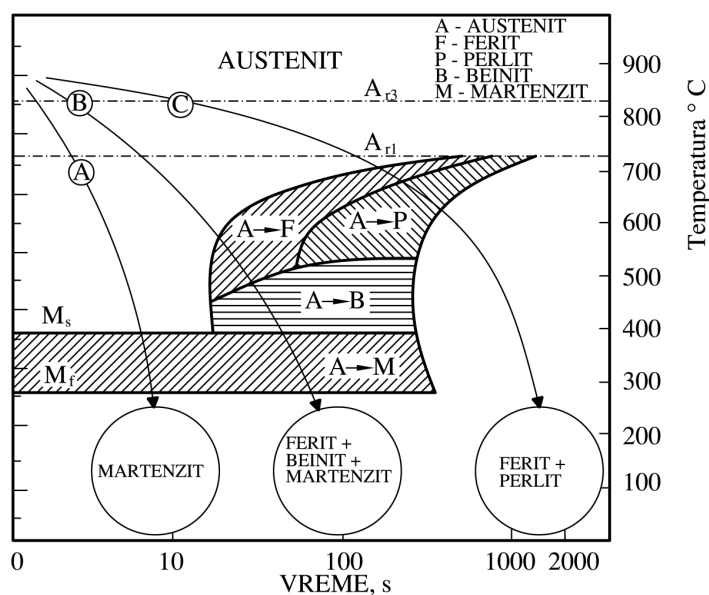
Zona nepotpune normalizacije ili delimične prekrystalizacije se obrazuje hlađenjem iz dvofazne feritno-austenitne oblasti. Ferit, kao struktura stabilna i na sobnoj temperaturi, ne podleže transformaciji, a zrna po veličini odgovaraju onima koja su nastala pri zagrevanju. Sitnozrnasti austenit podleže perlitnoj transformaciji, pa ovu zonu čine krupnija feritna zrna i sitnija perlitna zrna. Ova zona se takođe odlikuje povoljnom kombinacijom osobina.

Zona rekristalizacije se javlja samo u slučaju kada polazna struktura ima deformisana zrna koja su na temperaturama ispod A_1 linije pretrpela rekristalizaciju.

Zbog moguće pojave veoma različitih strukturnih oblasti naročito u okviru zone uticaja toplote, pri zavarivanju se strogo vodi računa o tome koja vrsta čelika se zavaruje, koji se postupak zavarivanja koristi, koje parametre zavarivanja treba odabrati posebno sa aspekta brzine zagrevanja i hlađenja. U većini slučajeva, da bi se izbegle neželjene posledice, zavareni spojevi se podvrgavaju naknadnoj termičkoj obradi koja ima za cilj ne samo poboljšanje svojstava već i smanjenje zaostalih napona od zavarivanja [4].

U zoni osnovnog materijala moguća je pojava starenja, iako se kod obe vrste čelika struktura po pravilu ne menja ispod linije A_1 . Ova pojava je posledica aktiviranja slobodnih intersticijskih primesa N i C u feritu, a po mehanizmu aktiviranja razlikuju se termičko i deformaciono starenje. Starenjem može da se smanji žilavost i povisi temperatura prelaska u krti lom, što ovu zonu čini nepoželjnom u zavarenom spoju.

Strukturne promene pri hlađenju čelika se u principu analiziraju pomoću TTT dijagrama. S obzirom na specifičnosti procesa zavarivanja (kontinualno hlađenje), umesto TTT dijagrama koriste se dijagrami kontinualnog hlađenja (KH-kontinualno hlađenje), i to prilagođeni za zavarivanje (KHZ-kontinualno hlađenje pri zavarivanju), sl. 2.7, koji bolje opisuju realne uslove hlađenja pri zavarivanju.



Slika 2.7. Shematski prikaz KHZ dijagrama za ugljenični čelik [5]

Dijagrami kontinualnog hlađenja pri zavarivanju su zasnovani na mnogo višoj temperaturi austenitizacije od KH dijagrama, a krive hlađenja se dobijaju pomoću simulatora termičkih ciklusa zavarivanja [5].

Ovi dijagrami su specifični za svaki čelik, a za njihovo dobijanje je potrebno dugo vreme i komplikovan eksperiment, što značajno ograničava njihovu primenu. Na dijagramu na sl. 2.7 su nacrtane tri krive hlađenja (**A**, **B** i **C**), kojima se dobijaju tri tipične strukture: martenzitna (brzina hlađenja veća od kritične, direktna transformacija austenita u martenzit, kriva **A**), feritno-beinitno-martenzitna (brzina hlađenja obezbeđuje prolazak kroz područja transformacije austenita u ferit, beinit i martenzit, kriva **B**) i feritno-perlitna (brzina hlađenja mala, postoji samo transformacija austenita u ferit i perlit, kriva **C**). Primena KHZ dijagrama je posebno važna kod niskolegiranih čelika povišene čvrstoće i omogućava da se definiše potrebna količina unete toplote da bi se dobila odgovarajuća struktura zavarenog spoja.

2.2. GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Pod pojmom greške se uopšteno podrazumeva svako odstupanje od zahteva definisanih tehničkom dokumentacijom, koje može da se odnosi na bilo koju karakteristiku zavarenog spoja. Ovde se pod pojmom **greške zavarenog spoja** podrazumeva unutrašnja (prslina, uključak) ili spoljna nehomogenost i geometrijsko odstupanje oblika i dimenzija, koje mogu da se otkriju ispitivanjem bez razaranja (najčešće ultrazvukom, radiografski, penetrantima i magnetnim fluksom) [6]. Najveće iskustvo postoji kod radiografskog ispitivanja koje je u obliku referentnih dijagrama objavljeno u dokumentu Međunarodnog instituta za zavarivanje (MIZ) [7]. Greške u zavarenim spojevima mogu da se klasifikuju po [8]:

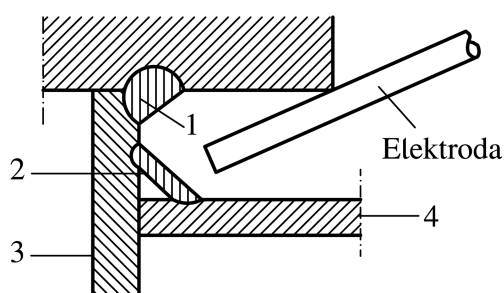
- ⇒ uzroku nastajanja;
- ⇒ vrsti;
- ⇒ položaju;
- ⇒ obliku;
- ⇒ veličini, i
- ⇒ brojnosti.

Klasifikacija po uzroku nastajanja je važna jer ukazuje i na mogućnosti otklanjanja uzroka [8].

Po **uzroku nastajanja**, greške u zavarenim spojevima se dele na:

- ⇒ konstrukcione greške;
- ⇒ metalurške greške, i
- ⇒ tehnološke greške.

Konstrukcione greške su najčešće posledica pogrešnog oblikovanja konstrukcije, kao što je prikazano na sl. 2.8, gde je dat primer dobro urađenog spoja (označenog sa 1) koji je urađen pre postavljanja ploče 4, dok je spoj 2 primer loše urađenog spoja, jer je pristup elektrode bio ometen [8].



Slika 2.8. Loše konstrukcijsko rešenje zavarenog spoja [8]

Metalurške greške su posledica topljenja i očvršćavanja osnovnog i dodatnog metala i po pravilu njih je najteže otkloniti ili izbeći. Najčešće metalurške greške su prslina, gasni i čvrsti uključci [8].

Tehnološke greške su posledica pogrešne tehnologije zavarivanja ili nepoštovanja propisane tehnologije, kao i neispravne opreme, lošeg rada zavarivača, loše pripreme, nepravilnog redosleda sastavljanja i pripajanja. U tehnološke greške spadaju nalepljivanje, neprovar, prokapljine, greške oblika i krateri [8].

Klasifikacija grešaka prema **vrsti** obuhvata šest osnovnih grupa:

- ⇒ prslina;

- ⇒ gasni uključci;
- ⇒ čvrsti uključci;
- ⇒ nalepljivanje i neprovar;
- ⇒ greške oblika, i
- ⇒ ostale greške.

Podela na podgrupe, skica ili opis grešaka, dati su u standardu ISO 6520 [8].

Gasni mehurovi (poroznost) su šupljine ispunjene gasom koje nastaju u fazi očvršćavanja kupke, tj. obrazovanja metala šava. Najčešći uzroci nastanka gasnih mehurova su nečistoće (vlaga, masnoća, oksidi) u osnovnom, dodatnom i pomoćnom materijalu, nedovoljno umiren osnovni metal, nedovoljna zaštita metalne kupke i prebrzo hlađenje zavarenog spoja [8].

Čvrsti uključci su strana tela, zarobljena u metalu šava posle njegovog očvršćavanja. Najčešće se javljaju uključci troske (E postupak), praška (EPP postupak), oksida, nitrida, fosfata i silikata, a kod zavarivanja TIG postupkom tipični su uključci volframa.

Osnovni uzroci nastanka uključaka troske su nepravilno vođenje električnog luka, npr. preveliko njihanje, turbulentno kretanje metalne kupke usled prevelike jačine struje, prelivanje metalne kupke preko troske usled male brzine zavarivanja, nedovoljno čišćenje prethodnih zavara, loše nastavljanje šava [8].

Osnovni uzroci nastanka uključaka praška su nepravilan oblik žleba (npr. mala širina) i pogrešno odabrani parametri zavarivanja (npr. mala jačina struje, nepravilan ugao držača žice). Uključci oksida nastaju unošenjem produkata korozije u metal šava usled slabe zaštite metalne kupke i nedostataka dezoksidatora. Uključci sulfida, nitrida, fosfata i silikata su hemijska jedinjenja koja su prisutna u metalu šava usled nedovoljnog prečišćavanja u fazi kristalizacije. Uključci volframa nastaju zbog suviše velike struje u odnosu na prečnik elektrode ili usled dodira elektrode i osnovnog metala (kod TIG postupka).

Nalepljivanje (greška vezivanja) je nedostatak veze između istopljenog dodatnog i osnovnog metala, ili između dva susedna zavara. Nalepljivanje nastaje ako istopljeni dodatni metal dođe u kontakt sa neistopljenim ili već očvrstim osnovnim metalom. Osnovni uzroci nalepljivanja su mala jačina struje, veliko njihanje luka, nečistoće na mestu zavarivanja, suviše uzak žleb, nepravilno usmeravanje luka [8].

Nedostatak provara (neprovar) je delimično rastapanje stranica žleba, tako da između njih ostaje praznina. Osnovni uzroci nastanka neprovara su nedovoljna linijska energija, neodgovarajuća priprema žleba (npr. preveliki razmak u korenu), neodgovarajući prečnik elektrode ili žice [8].

Greške oblika su odstupanja oblika šava od predviđenog oblika. Najčešće greške iz ove grupe su:

- ⇒ zajedni;
- ⇒ brazde u korenu;
- ⇒ preveliko nadvišenje;
- ⇒ prevelika ispupčenost;
- ⇒ preveliki provar sa prokapljinama;
- ⇒ smaknuće, i
- ⇒ utonulost [8].

Zajedi su greške u obliku zareza duž linije stapanja, koje nastaju usled prevelike struje i suviše male brzine zavarivanja, predugog električnog luka ili prevelikog nagiba elektrode. Zajedi su mnogo češći kod prinudnih nego kod horizontalnog položaja zavarivanja, a često su posledica topljenja oksida sa površine osnovnog metala, neposredno uz žleb.

Brazda u korenu je nedostatak metala šava na bočnim stranama korena, koji nastaje usled skupljanja metala, što je takođe uzrok nastanka šupljine u korenu.

Preveliko nadvišenje je višak metala na licu šava koje se javlja usled velike jačine struje ili male brzine zavarivanja, prevelikog broja zavara, prevelike debljine poslednjeg zavara, nedovoljnog poprečnog kretanja i prevelikog prečnika elektrode.

Prevelika ispupčenost je greška ugaonog spoja, a najčešće je posledica pokušaja da se u jednom sloju nanese što veća debljina šava. Kod prinudnih položaja ova greška je često posledica dejstva sile zemljine teže.

Preveliki provar je višak istopljenog metala u korenu šava, a mestimični provar se zove prokapljina. Uzroci ovih grešaka su oblik žleba (npr. veliki razmak u korenu) i neodgovarajući parametri zavarivanja (prevelika struja, preveliki nagib elektrode).

Smaknuće je odstupanje od predviđenog položaja dva dela koji se spajaju, što je posledica loše pripreme za zavarivanje. Ova greška je često uzrok neprovarenog korena.

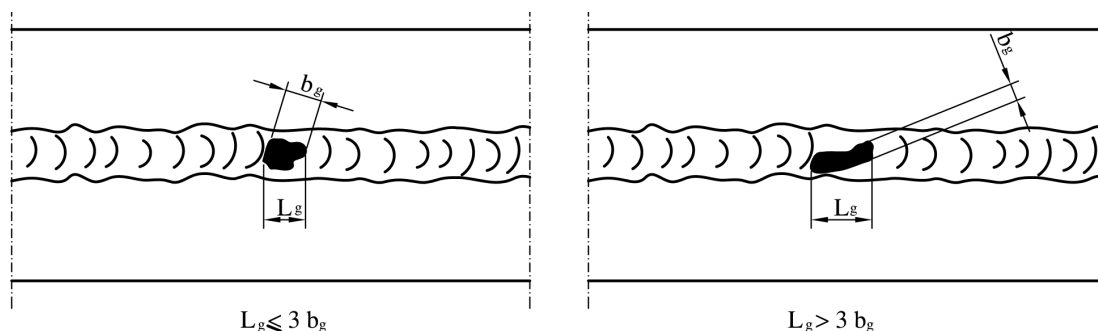
Utonulost je ulegnuće metala šava usled dejstva sile zemljine teže i pogrešnog usmeravanja električnog luka, a najčešće nastaje u horizontalno-vertikalnom položaju kod sučeonih i ugaonih spojeva, odnosno u vertikalnom položaju kod ugaonih spojeva.

Prema **položaju greške** se dele na [8]:

- ⇒ unutrašnje;
- ⇒ površinske (uključujući potpovršinske), i
- ⇒ greške po celom preseku (prolazne).

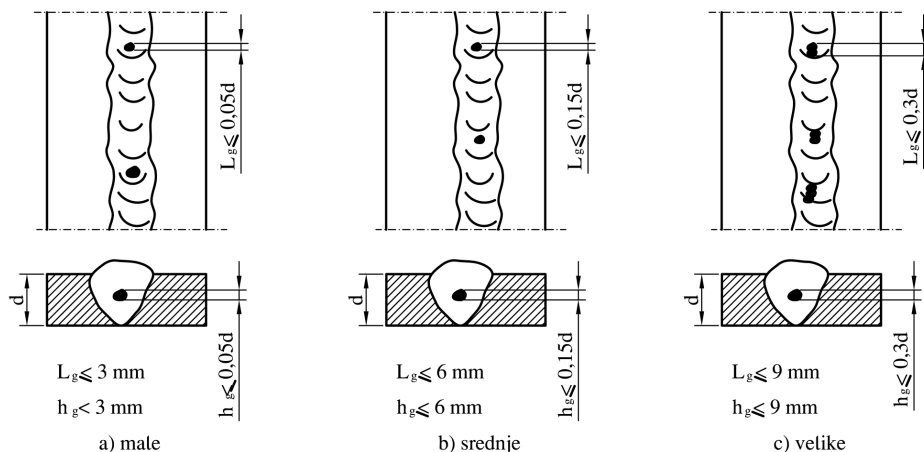
Prema **obliku greške** se dele na tri načina:

- ⇒ kompaktne (dužina manja od trostruke širine) i izdužene (dužina veća od trostruke širine), sl. 2.9;
- ⇒ prostorne i ravanske (jedna dimenzija je zanemarljiva), i
- ⇒ oštre i zaobljene.

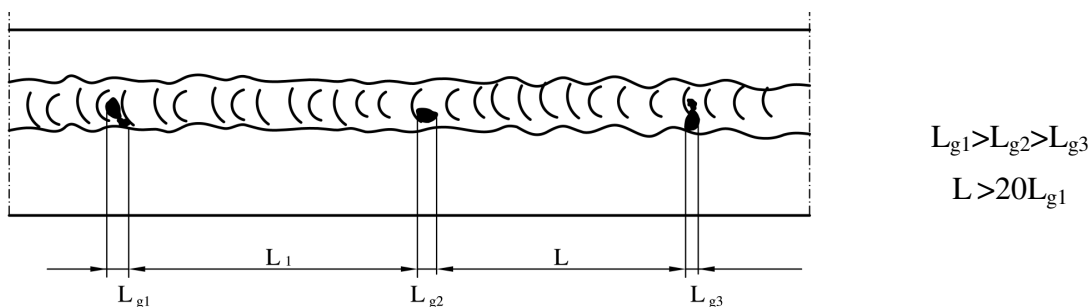


Slika 2.9. Kompaktne i izdužene greške [8]

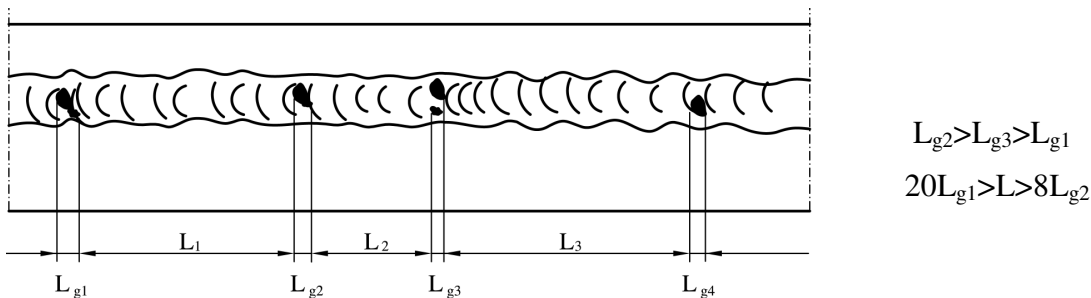
Podela na oštre i zaobljene greške je posebno važna zbog uticaja koncentracije napona, koji je mnogo veći kod oštih grešaka. Po tom kriterijumu prsline su najopasnije greške, a sferni mehurovi najmanje opasni. Po veličini greške se dele na male, srednje i velike, sl. 2.10, a po brojnosti na pojedinačne, sl. 2.11, učestale, sl. 2.12 i greške u gnezdima, sl. 2.13.



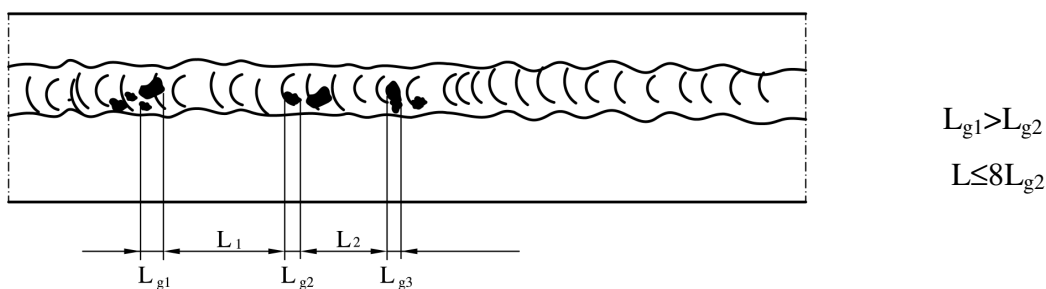
Slika 2.10. Podela grešaka po veličini [8]



Slika 2.11. Podela pojedinačnih grešaka po brojnosti [8]



Slika 2.12. Podela učestalih grešaka po brojnosti [8]



Slika 2.13. Podela grešaka u gnezdu po brojnosti [8]

2.2.1. Prsline u zavarenim spojevima

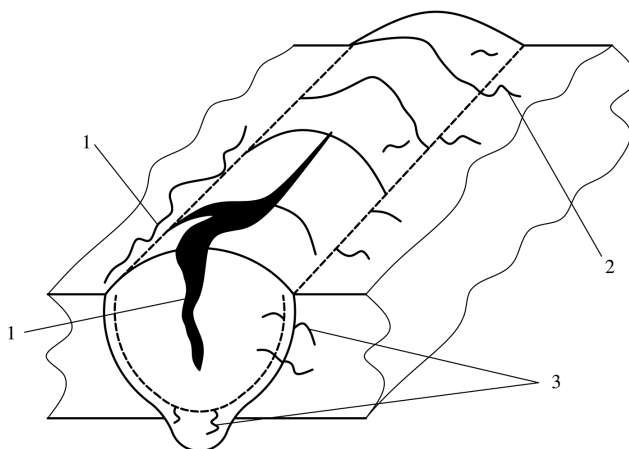
Prsline nastaju kao posledica toplotnih i metalurških procesa i najopasnije su greške u zavarenim spojevima. Prsline u zavarenim spojevima čelika se po pravilu razvrstavaju na [9]:

- ⇒ tople (vruće) prsline;
- ⇒ hladne prsline;
- ⇒ lamelarne prsline, i
- ⇒ prsline od žarenja.

Osim ovih, postoje i druge vrste prsline (npr. strelaste i korozione prsline).

2.2.1.1 Tople prsline

Tople prsline nastaju tokom primarne kristalizacije šava ili pri hlađenju, ali po pravilu iznad $0,5 \cdot T_l$, gde je T_l temperatura topljenja. Tople prsline su međukristalnog tipa, u odnosu na šav mogu da budu poprečne ili podužne, a osim u metalu šava mogu da nastanu i u ZUT, sl. 2.14 [9]. Podužne prsline prate pravac ose šava, prostirući se uglavnom između stubičastih kristala.



Slika 2.14. Topografija toplih prsline u zavarenom spoju [9]

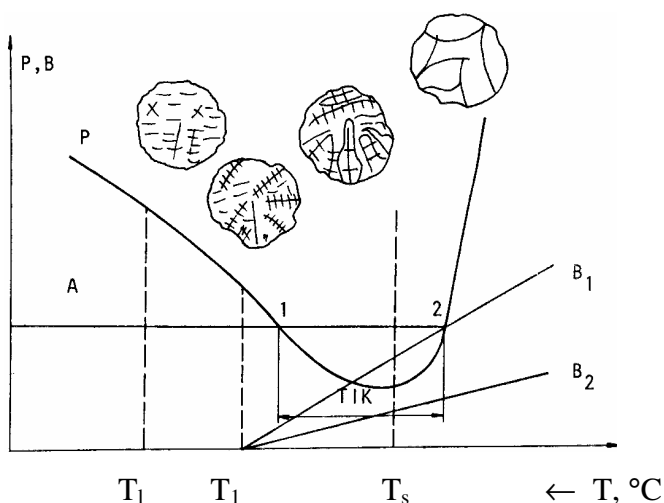
- 1-podužne u šavu i ZUT zoni;
- 2-poprečne prsline u šavu i ZUT zoni;
- 3-poprečne prsline po debljini osnovnog materijala

Mehanizam nastanka toplih prsline uključuje dejstvo zateznih napona, nastalih usled neravnomernog skupljanja i širenja u području metala šava ili ZUT, kod kojih je napon tečenja skoro jednak nuli zbog visoke temperature. Stoga i pri relativno malom zateznom naponu nastaju plastične deformacije, usled kojih može da dođe do lokalnog loma, tj. toplih prsline, jer čelik u nekim intervalima povišene temperature ima smanjenu sposobnost deformacije, posebno između solidus i likvidus linije, gde postoji tzv. temperaturni interval krtosti (TIK), sl. 2.15 [9].

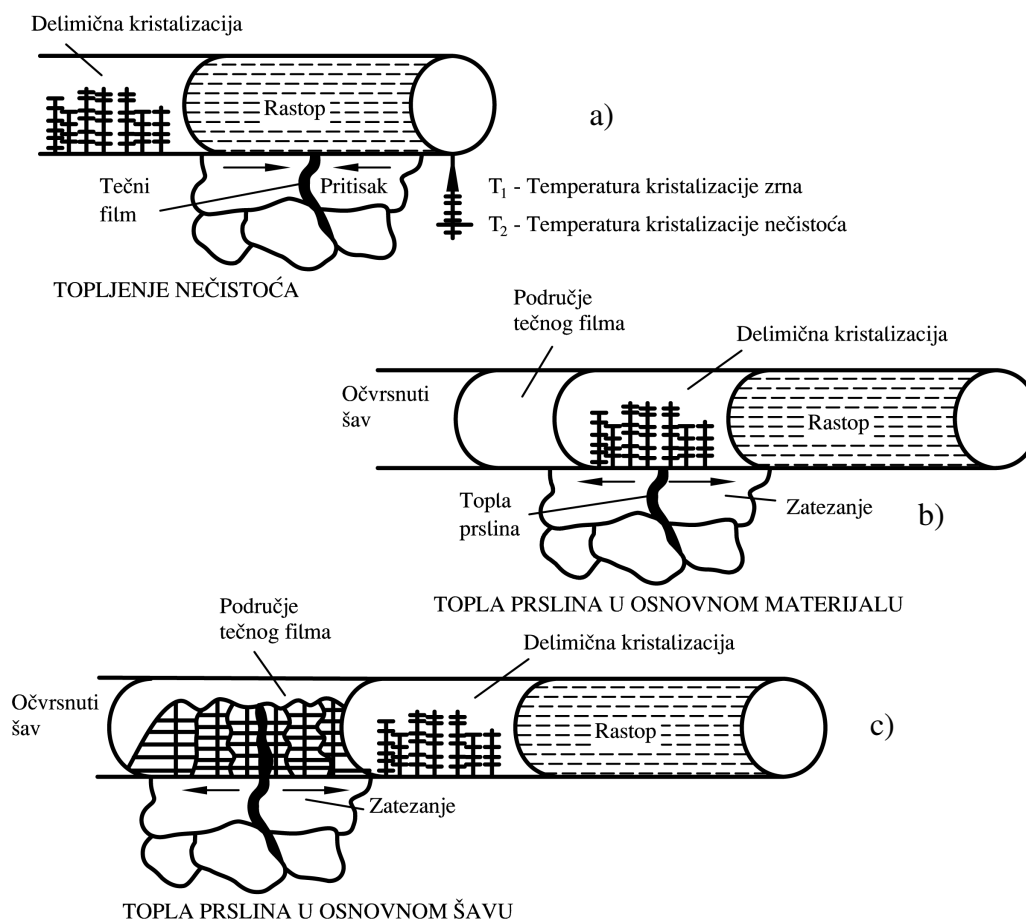
Dijagram na sl. 2.15 pokazuje zavisnost plastičnosti (P) od temperature u intervalu oko likvidus i solidus linije (T_l i T_s). Linija A definiše granicu ispod koje je plastičnost nedovoljna, a tačke preseka sa krivom P određuju temperaturni interval u kome nastaju tople prsline. Prave B_1 i B_2 povučene iz neke vrednosti temperature u čvrsto-tečnom stanju (između T_l i T_s) definišu brzinu deformacije, tako što u prvom slučaju tople prsline mogu da nastanu jer prava B_1 preseca TIK, a u drugom slučaju ne (prava B_2).

Tople prsline se dele u dve grupe: **kristalizacione** i **podsolidusne (likvacione)**. Kristalizacione tople prsline, sl. 2.16 [9], nastaju u temperaturnom intervalu između likvidus i solidus linija, kada u materijalu postoje i čvrsta i tečna faza (TIK oblast). Ovaj tip prsline se posebno javlja kod legura sa velikim intervalom očvršćavanja, a kod legura sa malim intervalom očvršćavanja i čistih metala mogu da nastanu samo likvacione prsline. Kristalizacione tople prsline nastaju kada je zatezanje upravo na granice zna dovoljno

veliko da napravi diskontinuitet duž granica zrna u oblasti delimične kristalizacije, sl. 2.16 b, ili u području tečnog filma, sl. 2.16 c:



Slika 2.15. Temperaturni interval krtosti (TIK) [9]

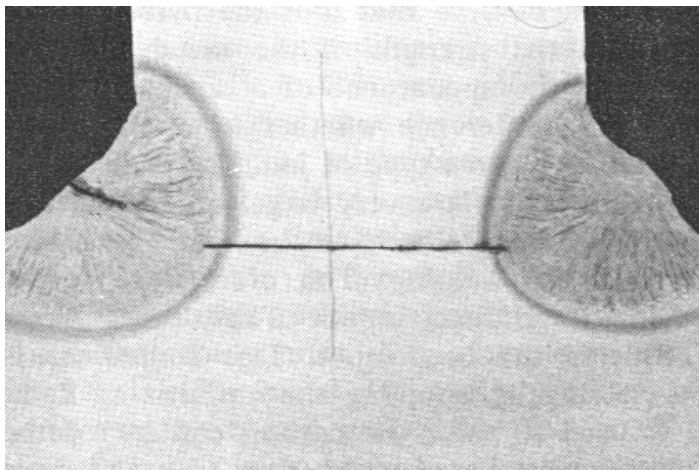


Slika 2.16. Mehanizmi nastajanja toplih kristalizacionih prslina [9]

Tople prsline u metalu šava su obično relativno dugačke, ne tako razgranate i dosta otvorene. Najčešći uzrok njihovog nastajanja je povećana koncentracija sumpora i nizak sadržaj mangana u metalu šava, kada se po granicama rastućih kristalnih zrna izdvaja jedinjenje FeS , umesto uobičajenog jedinjenja MnS tipa. Jedna od bitnih razlika ova dva sulfidna jedinjenja je što MnS ima relativno visoku temperaturu topljenja (očvršćavanja)-

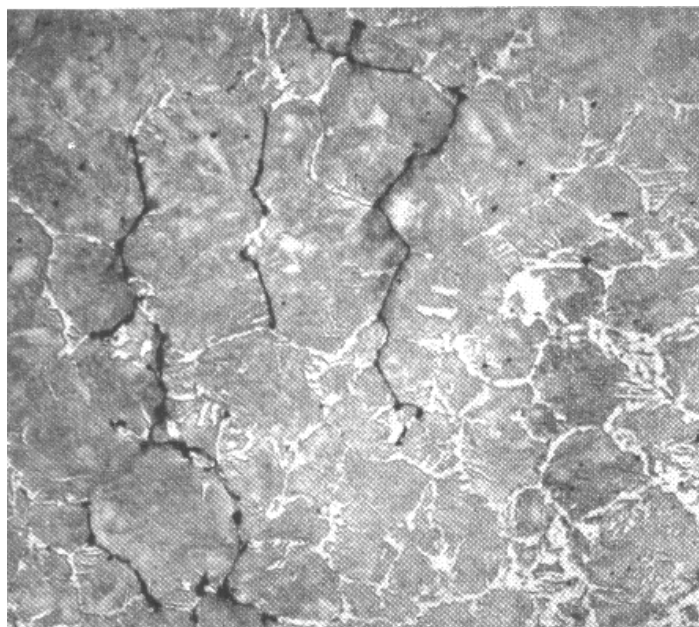
1610°C, dok je temperaturu topljenja FeS niža od solidus temperature čelika. Kako i posle očvršćavanja metalne osnove-čelika ostaje izvesna količina rastopa u vidu FeS jedinjenja po granicama kristalnih zrna, može da se smatra da su se stvorili preduslovi za nastajanje toplih prslina [10].

Uticaj zateznog napona je pokazan na primeru ugaonog šava, sl. 2.17, gde se vidi da kod šava koji je prvo rađen (desni) nema prslina, dok je kod šava koji je rađen posle njega (levi) nastala topla prslina. Ovakve prsline nastaju prvenstveno usled prisustva niskotopljivih segregacija po granicama zrna.



Slika 2.17. Topla kristalizaciona prslina [9]

Tople prsline u ZUT se javljaju u vidu mreže po granicama zrna, sl. 2.18, neposredno uz granicu stapanja, a uzroci nastajanja mogu da budu vezani za tehnologiju i parametre zavarivanja ili metalurške procese u tečnom i čvrstom stanju.

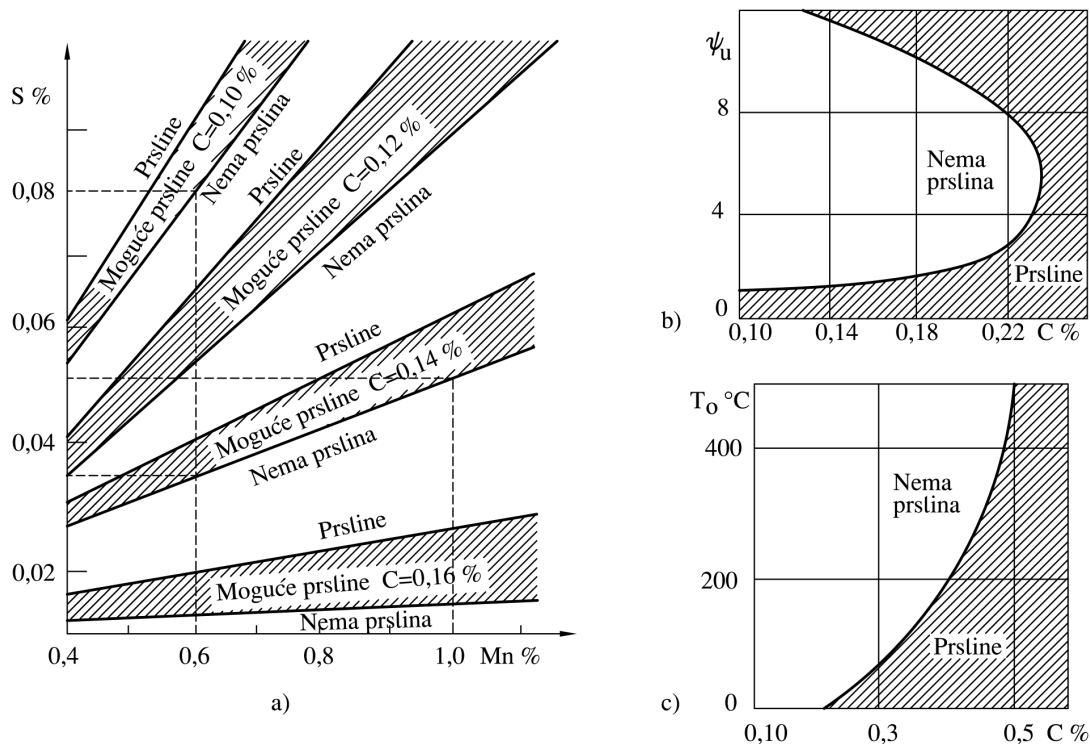


Slika 2.18. Topla likvaciona prslina u ZUT [10]

Pri zavarivanju ugljeničnih, niskolegiranih i drugih čelika može doći do obrazovanja kristalizacijskih prslina u ZUT, koje se najčešće prostiru po granicama zrna. Verovatnoća obrazovanja prslina raste pri radu sa osnovnim metalom smanjene čvrstoće i pri povećanom unosu energije zavarivanja. U tom slučaju primećuje se i porast zrna što pogoduje nastanku prslina ovog tipa (likvacijske prsline). Mehanizam obrazovanja prslina

u ZUT razlikuje se od mehanizma obrazovanja prslina u metalu šava. Prslina se u ovom slučaju razvijaju po granicama zrna osnovnog metala kratkovremeno zagrejanog iznad temperature solidusa [10].

Najveći uticaj na nastanak toplih prslina ima hemijski sastav čelika (C , S i Mn , i u manjoj meri Si), oblik šava i predgrevanje. Na sl. 2.19 a je prikazan uticaj sadržaja C , S i Mn , na sl. 2.19 b uticaj sadržaja C i koeficijenta oblika šava, a na sl. 2.19 c uticaj predgrevanja, u zavisnosti od sadržaja C [10].



Slika 2.19. Različiti uticaji na sklonost čelika ka nastanku toplih prslina [10]

a) sastav čelika, b) oblik šava i sadržaj C , c) predgrevanje i sadržaj C

Kao što se sa ovih slika vidi, navedeni uticaji su međusobno zavisni, ali opšte je pravilo da su čelici sa većim sadržajem C i S , a manjim sadržajem Mn , skloniji nastanku toplih prslina, kao i zavareni spojevi sa malim koeficijentom oblika, ili sa izrazito velikim koeficijentom oblika (kod čelika sa većim sadržajem C), dok predgrevanje značajno smanjuje opasnost od nastanka toplih prslina. Uticaj navedenih hemijskih elemenata se ogleda prvenstveno u delovanju eutektikuma $Fe-FeS$, čija je tačka topljenja $985^{\circ}C$, koji se taloži na granicama zrna i znatno povećava sklonost čelika ka stvaranju toplih prslina. S druge strane, Mn , koji ima veći afinitet ka S od Fe , obrazuje MnS (uključujući globularnog oblika), čime sprečava obrazovanje štetnog eutektikuma i smanjuje sklonost čelika ka toplim prslinama. Povećani sadržaj C je nepovoljan zbog smanjenja plastičnosti čelika.

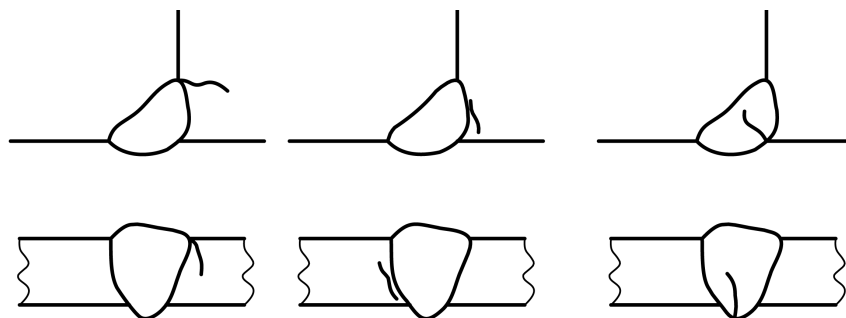
Često se proverava osetljivost prema toplim prslinama po izrazu [10]:

$$HCS = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad (2.1)$$

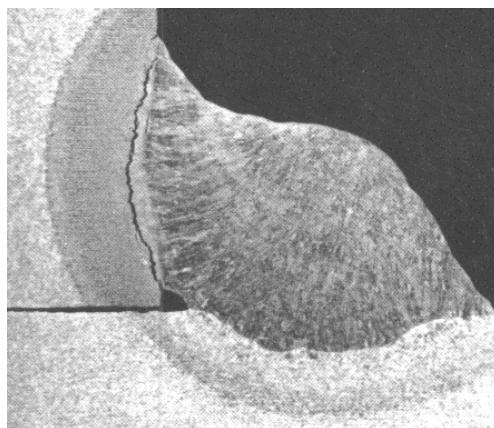
uz kriterijum da su čelici čija je zatezna čvrstoća veća od $700MPa$ osetljivi prema toplim prslinama ako je HCS (Hot Cracking Sensitivity) veće od 2, odnosno ako je HCS veće od 4 kod čelika čija je čvrstoća ispod $700MPa$.

2.2.1.2 Hladne prsline

Hladne prsline nastaju u metalu šava ili ZUT, najčešće pri kraju hlađenja zavarenog spoja, ispod 300°C. Prema pravcu u odnosu na osu šava hladne prsline se dele na poprečne i podužne, po pravilu su unutarkristalne, iako njihov rast često počinje po granicama zrna. Shematski prikaz najčešćih hladnih prslina u ugaonim i sučeonim spojevima je dat na sl. 2.20, a makrografski prikaz hladne prsline u ugaonom spoju na sl. 2.21. Ove prsline su najopasnije za sigurnost zavarenih konstrukcija jer ih je teško otkriti [11].



Slika 2.20. Shematski prikaz hladnih prslina u ugaonim i sučeonim spojevima [11]



Slika 2.21. Makrografski prikaz hladne prsline u ugaonom spoju [11]

Kod zavarivanja niskolegiranih i srednjelegiranih čelika hladne prsline nastaju kao posledica delovanja tri faktora, od kojih ni jedan sam nije dovoljan da izazove prslinu. Ti osnovni faktori su:

- ⇒ mikrostruktura (naročito pojava martenzitne strukture);
- ⇒ sadržaj difundovanog vodonika, i
- ⇒ zaostali naponi koji prate proces zavarivanja.

Utvrđeno je da pojava hladnih prslina zavisi od uslova zavarivanja: debljine radnog komada, unete energije pri zavarivanju, temperature radnog komada. Pod određenim uslovima čelik može postati zakaljiv, odnosno pri zavarivanju ZUT ili metal šava mogu preći potpuno ili delimično u martenzit. Što se tiče uticaja vodonika, odavno je poznato da rad sa niskovodoničnim bazičnim elektrodama ili u zaštitnoj atmosferi inertnih ili suvih i prečišćenih aktivnih gasova daje spojeve bez hladnih prslina. Do sličnog zaključka se došlo i u odnosu na delovanje napona, pošto je praksa pokazala da su zavareni spojevi bez sopstvenog napona daleko manje osetljivi na pojavu hladnih prslina. Potrebno je razmotriti uticajne faktore koji prate pojavu hladnih prslina u zavarenim spojevima. To su pre svih [11]:

- ⇒ hemijski sastav osnovnog metala;
- ⇒ debljina osnovnog metala;

- ⇒ uneta toplota pri zavarivanju;
- ⇒ okolina;
- ⇒ dodatni materijal;
- ⇒ postupak zavarivanja;
- ⇒ oblik zavarenog spoja, i
- ⇒ nemetalni uključci.

Hemijski sastav osnovnog metala izražen je kroz faktor mikrostrukture, jer kod nisko i srednje legiranih čelika neposredno uz sam spoj dolazi do stvaranja martenzitne strukture. Ova martenzitna struktura nastaje u tzv. neuravnoteženim uslovima, dakle pri neuravnoteženom zagrevanju do temperature kaljenja, odnosno do temperature transformacije, neuravnoteženim brzinama hlađenja, skoro uvek sa temperaturom koja je znatno viša od temperature koja se primenjuje u termičkoj obradi, sa vremenima koja prate fazne preobražaje, a znatno su kraća nego kod termičke obrade, znači sa jednom nestabilnom strukturom na koju poseban uticaj ima hemijski sastav [11].

U razmatranju uticaja debljine osnovnog metala prepliću se uticaji sva tri osnovna faktora. Javlja se različita struktura izazvana nehomogenim režimom zagrevanja i hlađenja, odnosno nepotpunom prokaljivošću po preseku, javlja se povećani sadržaj difundovanog vodonika izazvan prisustvom grešaka oko kojih se okuplja i sa umanjenom brzinom difuzije kroz povećan presek, i konačno naponi koji se povećavaju sa porastom debljine osnovnog metala [11].

Pri zavarivanju unetu toplotu prate sva tri osnovna faktora. Od količine unete toplote zavisi maksimalna temperatura do koje se metal u metalu šava (MŠ) i ZUT zagreva, i brzine zagrevanja i hlađenja. Zavisno od energetskog režima zavarivanja javiće se različite strukture, odnosno različite tvrdoće. To se najbolje vidi ako se uporede dva dijagrama izotermalnog razlaganja izrađena za isti sastav čelika, ali za različitu temperaturu austenitizacije. Za različite brzine hlađenja dobijaju se različite strukture, odnosno različite tvrdoće. Svakako da uneta količina toplote utiče na sadržaj difundovanog vodonika u metalu šava. Što je veća količina unete toplote, odnosno što je sporije hlađenje, pošto se radi o difundovanom vodoniku, njegovo napuštanje mesta okupljanja (greške u strukturi) direktno je vezano za uslove hlađenja. Od količine unete toplote direktno zavisi apsolutni nivo termičkih napona koji prate lokalno zagrevanje [11].

Kada se razmatra uticaj okoline misli se pre svega na relativnu vlažnost i temperaturu predgrevanja, odnosno na uticaj difundovanog vodonika.

Dodatni materijal je na prvom mestu kada se analiziraju nosioci difuzionog vodonika preko koga on stiže u zavareni spoj, ali se, kada je u pitanju izbor dodatnog materijala, može uticati i na naponsko stanje.

I postupak zavarivanja deluje slično kao i dodatni materijal. Ako zavarujemo E postupkom sadržaj vodonika će biti znatno veći nego ako zavarujemo MIG postupkom, a za isti oblik žleba i istu unetu količinu toplote.

Promenom parametara zavarivanja (jačine struje, napona, gustine struje, brzine zavarivanja) menja se oblik i količina tečnog metala, odnosno oblik zavarenog spoja a time i oblik i veličina naponskog polja.

Konačno, za osetljivost prema pojavi hladnih prslina bitna je čistoća osnovnog metala, jer su uključci i drugi oblici nečistoća mesta okupljanja vodonika, a to su i koncentratori naprežanja, odakle po pravilu kreću prsline.

U odnosu na vreme pojavljivanja, hladne prsline se često zovu zakasnele, jer se najčešće neposredno kod zavarivanja ne primećuju. Ulogu i značaj vremenskog faktora treba istaći, pošto se ovaj fenomen odigrava na sobnoj temperaturi ili na temperaturi koja je bliska sobnoj. Postoji veliki broj jednačina po kojima se određuje vrednost ekvivalenta ugljenika, ali se sve mogu svesti na oblik [11]:

$$CE = C + \frac{1}{a} Mn + \frac{1}{b} Si + \frac{1}{c} Cr + \dots \quad (2.2)$$

gde je: *C*, *Mn*, *Si*, *Cr*- sadržaj elemenata u čeliku, i

$\frac{1}{a}$, $\frac{1}{b}$, $\frac{1}{c}$ - koeficijenti koji pokazuju koliko je uticaj posmatranog elementa slabiji od uticaja ugljenika.

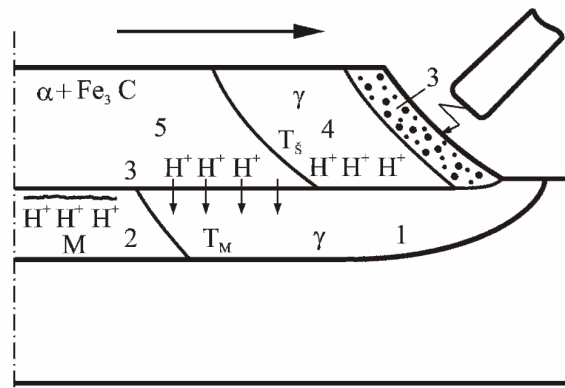
Jednačine predložene od strane različitih istraživača razlikuju se jedna od druge po koeficijentima koji karakterišu uticaj legirajućih elemenata. Ove razlike su posledica različito postavljenih ciljeva, različitih uslova rada i različitih osnovnih materijala. Smatra se da na vrednost koeficijenta bitan uticaj pokazuje brzina hlađenja u kritičnom intervalu temperature.

Često se koristi formula Međunarodnog instituta za zavarivanje (MIZ):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{15} \quad (2.3)$$

Pored ekvivalenta ugljenika za procenu otpornosti čelika na pojavu hladnih prsline kao veoma važan faktor uzima se sadržaj difundovanog vodonika.

Pri zavarivanju čelika, deo osnovnog metala u ZUT prelazi u austenit koji se pri hlađenju u zavisnosti od brzine hlađenja transformiše u neku od strukturnih komponenata. Koja će strukturna komponenta biti dominantna zavisi od sastava osnovnog metala i uslova zavarivanja (količina unete toplote, debljina radnog komada, početna temperatura, temperatura okoline). Sve ove promene strukture odigravaju se sukcesivno duž zavarenog spoja a celi taj ciklus može biti shematski predstavljen. Presek šava je prikazan na sl. 2.22.



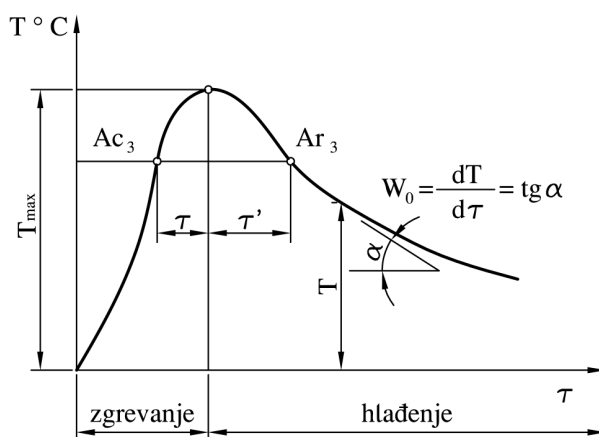
Slika 2.22. Mehanizam difuzije vodonika iz metala šava u ZUT [11]

Površine 1 i 4 predstavljaju osnovni metal i metal šava, koji su zagrejani do austenitnog područja. Izoterme T_M i T_S predstavljaju temperature transformacije metala u ZUT i u šavu, dok površine 2 i 5 predstavljaju već transformisani ili skoro transformisani metal u ZUT i u šavu [11].

Za dati specifični oblik termičkog ciklusa zavarivanja, sl. 2.23, (brzo zagrevanje do vrlo visokih temperatura, kratkotrajna austenitizacija) neophodno je da se znaju krive

transformacije pri kontinualnom hlađenju za različite uslove zavarivanja. Osnovni parametri ciklusa zagrevanja i hlađenja metala u ZUT su:

- ⇒ maksimalna temperatura zagrevanja;
- ⇒ brzina zagrevanja kroz temperaturno područje 700-1000°C;
- ⇒ brzina hlađenja kroz temperaturno područje 800-500°C;
- ⇒ vreme zagrevanja od Ac_3 do maksimalne temperature, i
- ⇒ vreme hlađenja od maksimalne temperature do temperature Ar_3 .



Slika 2.23. Shema toplotnog ciklusa ZUT pri elektrolučnom zavarivanju [11]

Radi jednostavnijeg određivanja i korišćenja krivih transformacija, često se pribegava uprošćavanju tako što se smatra da je brzina hlađenja u području temperatura transformacije čelika konstantna preko čitave ZUT. Na taj način je moguće, ako se znaju brzine hlađenja koje odgovaraju svakom uslovu zavarivanja, da se predvidi način transformacije u ZUT, a posebno je značajno što je moguće odrediti uslove zavarivanja koji dovode do delimične ili potpune martenzitne transformacije u ZUT.

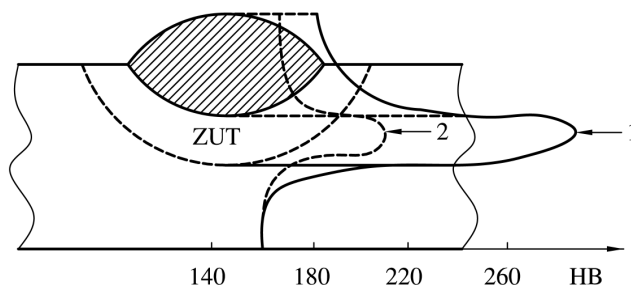
Kako je sadržaj legirajućih elemenata, a naročito ugljenika, u osnovnom metalu i metalu šava različit, to je temperaturno područje između T_M i T_S prošireno i mogućnost difuzije vodonika posle transformacije metala šava je povećana, sl. 2.22.

Interesantno je analizirati kakva je uloga predgrevanja u ovim slučajevima. Utvrđeno je da predgrevanje, čak i ako ne sputava martenzitnu transformaciju, izaziva usporeno hlađenje, što obezbeđuje bržu difuziju vodonika i jednovremeno smanjuje krtost. Isti ili čak jači efekt ima naknadno grejanje kada se izvodi ispod M_f tačke, a ako se ovome doda i efekat otpuštanja, koji se pri tome javlja, onda je uspeh još i veći.

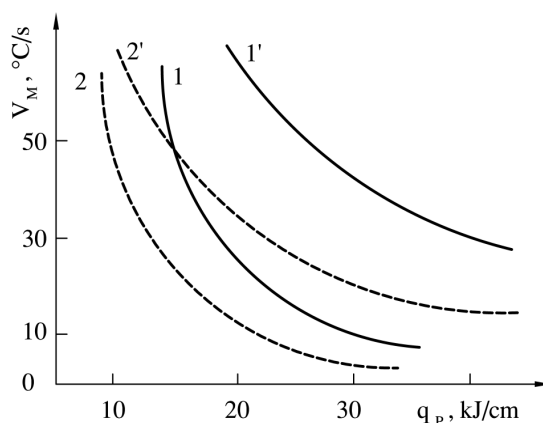
Kod zavarivanja jednovremeno sa delovanjem transformacije i vodonika stvara se složeno naponsko polje koje potiče od neravnomerne raspodele temperature, prateće transformacije, spoljnih ukrućenja i ostalih sekundarnih uzročnika, kao što su sopstvena težina, elastična veza između delova, ostali susedni navari i zavari, spajanje u nedeljive celine. Bilo kakvo da je poreklo napona koji se javlja u zavarenom spoju, može se zaključiti na bazi merenja da su oni približno jednaki granici tečenja osnovnog metala ili metala šava.

Brzina hlađenja je jedan od ključnih parametara na koji može da se utiče da bi se izbegao nastanak hladnih prslina. Naime, ako je brzina hlađenja manja od kritične, čime se izbegava martenzitna transformacija, dobija se materijal koji ima dovoljnu otpornost na nastanak i rast prslina. Drugi suštinski važan parametar je količina difundovanog vodonika, jer ako vodonika nema u dovoljnoj količini onda hladne prsline ne mogu da nastanu. Stoga se kao osnovne mere sprečavanja pojave hladnih prslina primenjuju predgrevanje (ili neki

drugi način smanjenja brzine hlađenja) i sušenje elektroda, tj. otklanjanje vlage iz dodatnog materijala. Predgrevanjem se takođe utiče na smanjenje zaostalih napona, naročito maksimalnog zateznog napona, jer se smanjuje neravnomernost skupljanja pri hlađenju (manja je razlika u temperaturi osnovnog metala i metala šava). Uticaj predgrevanja na brzinu hlađenja se vidi posredno na sl. 2.24 [11], gde je prikazana promena tvrdoće u ZUT, i na sl. 2.25 [11], gde je uticaj prikazan parametarski, preko krivih zavisnosti brzine hlađenja od linijske energije zavarivanja (krive 1 i 1' se odnose na zavarivanje bez predgrevanja, a krive 2 i 2' na zavarivanje sa predgrevanjem).



Slika 2.24. Promena tvrdoće po debljini spoja [11]
1-bez predgrevanja, 2-sa predgrevanjem

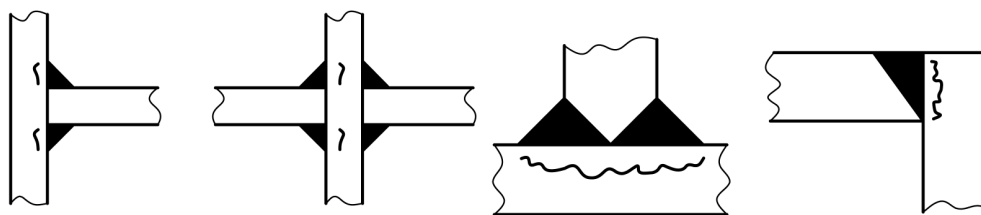


Slika 2.25. Uticaj predgrevanja, linijske energije i debljine na brzinu hlađenja [11]

Osim toga, na sl. 2.25 je parametarski prikazan i uticaj debljine osnovnog metala na brzinu hlađenja (krive 1 i 2 se odnose na manju, a krive 1' i 2' na veću debljinu).

2.2.1.3 Lamelarne prsline

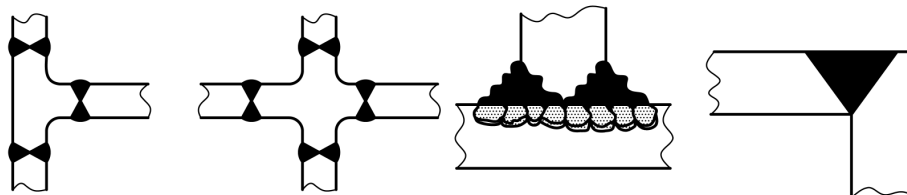
Lamelarne prsline su posledica dejstva zateznih napona u pravcu debljine zavarenog spoja, nastalih pri termičkom ciklusu zavarivanja, i po pravilu su paralelne površini osnovnog metala. Lamelarne prsline se najčešće javljaju u ugaonim, 'T' i krstastim spojevima veće debljine, blizu zone stapanja, sl. 2.26.



Slika 2.26. Primeri lamelarnih prsline nastalih usled loših konstrukcijskih rešenja [12]

Ove prsline nastaju na relativno niskim temperaturama, a na njihovu pojavu bitno utiču uključci tipa *MnS*, silikata i druge nečistoće koje smanjuju plastičnost materijala u pravcu debljine, kao i loše konstrukcijsko rešenje zavarenog spoja, sl. 2.26 [12].

Shodno tome, lamelarne prsline mogu da se izbegnu dobrim konstrukcijskim rešenjem spoja, sl. 2.27, i korišćenjem osnovnog materijala sa malim udelom nečistoća i visokom plastičnošću u pravcu debljine (npr. čelika sa manje od 0,007% *S* i sa procentualnim izduženjem A_5 bar 25%), a od koristi je i predgrevanje.

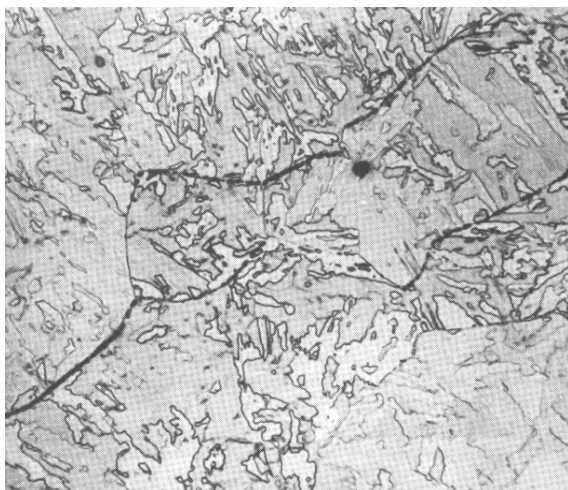


Slika 2.27. Primeri sprečavanja pojave lamelarnih prsline dobrim konstrukcijskim rešenjima [12]

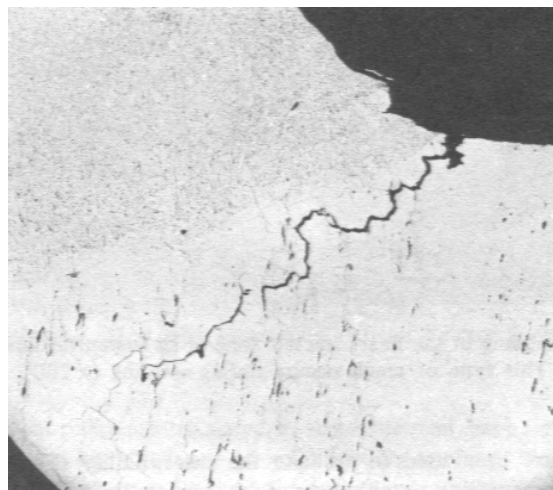
Iako su lamelarne prsline tipične za spojeve koji su po prirodi stvare ukrućeniji od drugih (ugaoni, 'T' i krstasti), one se ipak javljaju i u sučeonim spojevima velike debljine, kod npr. *C-Mn* čelika zavarenih EPP postupkom, prvenstveno zbog trakaste strukture debelih valjanih limova sa visokom koncentracijom *MnS* uključaka u pojedinim ravnima.

2.2.1.4 Prsline usled ponovnog zagrevanja (žarenja)

Prsline usled ponovnog zagrevanja nastaju u ZUT ili metalu šava tokom termičke obrade posle zavarivanja, po pravilu, legiranih čelika. Iako su, kao i kod ostalih vrsta prsline, neravnotežni termički naponi osnovni uzrok nastanka prsline žarenja, za razliku od njih, ove prsline nastaju pri zagrevanju. Osim zateznih termičkih napona, za nastanak ovih prsline veoma je bitna razlika u čvrstoći granica i unutrašnjosti metalnih zrna, tipična za legirane čelike koji ojačavaju mehanizmom disperzionog taloženja, usled koje se deformacija pri dejstvu termičkih napona koncentriše po granicama zrna. Kako su granice zrna mesta manje čvrstoće, duž njih lako dolazi do lokalnog loma, odnosno nastanka prsline, koje su stoga međukristalnog karaktera, sl. 2.28 i 2.29 [12].



Slika 2.28. Prsline usled ponovnog zagrevanja-niskolegirani CrMoV čelik sa gruboznim ZUT [12]



Slika 2.29. Prsline usled ponovnog zagrevanja-visokolegirani CrNi čelik [12]

Konačno, na pojavu prsline usled ponovnog zagrevanja utiču i zaostali naponi, koji se superponiraju sa termičkim naponima pri zagrevanju i na pojedinim mestima mogu da daju zatezne naponi nivoa napona tečenja.

Preporuke za sprečavanje nastanka prslina usled žarenja su [12]:

- ⇒ izbegavati čelike legirane vanadijumom, a imati u vidu i nepovoljan uticaj *Nb*, *Ti*, *Mo*, *Cr* i *Cu*;
- ⇒ smanjiti ukrućenja zavarene konstrukcije ili primeniti termičku obradu pojedinih zavarenih spojeva pre izrade ostalih spojeva, i
- ⇒ kontrolisati brzinu zagrevanja pri žarenju i/ili početni zagrevanje pre završetka hlađenja zavarenog spoja, sa tzv. prelazne ("interpass") temperature.

2.3. STANDARDI ZA OBEZBEĐENJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA

Donošenjem serije standarda ISO 9000 definisani su opšti zahtevi sistema kvaliteta u oblasti proizvodnje i usluga, a specifičnosti zavarivačkih zahteva su dodatno definisani. Pri tome je značajno promenjen pristup edukaciji i sertifikaciji kadrova, periodičnoj proverbi zavarivača, kvalifikaciji tehnologije zavarivanja, a promenjen je i osnovni standard koji određuje nivoe kvaliteta zavarenih spojeva i kriterijume prihvatljivosti.

Polazeći od stava (ISO 9000) da je zavarivanje specijalni proces čiji kvalitet ne može u potpunosti da se dokaže ispitivanjem gotovog proizvoda, razvijen je niz standarda za obezbeđenje kvaliteta zavarenih spojeva, kao što su EN ISO 15614-1, EN ISO 3834, EN ISO 5817 i EN ISO 10042. Imajući u vidu značaj navedenih standarda za obezbeđenje kvaliteta zavarenog spoja, ovde je dat njihov detaljniji prikaz.

Serijski standard EN ISO 3834 u svom opštem delu se odnosi na "Zahteve kvaliteta pri zavarivanju. Zavarivanje topljenjem metalnih materijala." i sastoji se od četiri standarda:

- ⇒ EN ISO 3834-1. Uputstva za izbor i upotrebu;
- ⇒ EN ISO 3834-2. Opšti zahtevi kvaliteta;
- ⇒ EN ISO 3834-3. Standardni zahtevi kvaliteta, i
- ⇒ EN ISO 3834-4. Osnovni zahtevi kvaliteta.

Zahtevi kvaliteta se biraju u skladu sa tab. 2.1, a u tab. 2.2 su dati podaci o izboru i sadržaju standarda, tj. o upoređivanju zahteva kvaliteta u odnosu na nivo zahteva.

Tabela 2.1. Izbor zahteva kvaliteta

Ugovoreni zahtevi pri zavarivanju	Zahtevi kvaliteta	
	zahteva se primena ISO 9001 ili ISO 9002	ne zahteva primena ISO 9001 ili ISO 9002
Opšti zahtevi kvaliteta	EN ISO 3834-2	EN ISO 3834-2
Standardni zahtevi kvaliteta	EN ISO 3834-3	EN ISO 3834-3
Osnovni zahtevi kvaliteta	EN ISO 3834-4	EN ISO 3834-4

Upoređenjem elemenata zahteva za sva tri nivoa zahteva uočava se da su samo u četiri slučaja elementi zahteva jednoznačni za sva tri nivoa, i to:

- ⇒ **Provera zavarivača:** Svi zavarivači moraju da imaju važeće uverenje o proverbi stručne osposobljenosti prema EN 287-1 ili EN 287-2.
- ⇒ **Rok čuvanja zahteva o kvalitetu:** Zapisi o kvalitetu moraju se čuvati najmanje pet godina, ukoliko nije drugačije utvrđeno zahtevima.

- ⇒ **Skladištenje i rukovanje potrošnim materijalom:** Skladištenje mora da bude takvo da se spreči štetni uticaj na materijal. Procedure moraju da budu u skladu sa preporukom isporučioaca materijala.
- ⇒ **Postojanje procedure za neusaglašenost proizvoda:** Za elemente koji se kontrolišu neophodno je predvideti korektivne mere u slučaju da elementi ne odgovaraju specificiranim zahtevima, kako bi se sprečila njihova nepravilna upotreba. Posle popravke ili poboljšanja kontrole i ispitivanja se ponavljaju.

Tabela 2.2. Upoređenje zahteva kvaliteta pri zavarivanju u odnosu na EN ISO 3834-2, 3834-3 i 3834-4

Elementi	ISO 3834-2 Opšti zahtevi	ISO 3834-3 Standardni zahtevi	ISO 3834-4 Osnovni zahtevi
Analiza ugovora	Analiza kompletne dokumentacije	Manje detaljna analiza	Utvrđiti da postoje sposobnost i informacije
Analiza konstrukcije	Tehnologija zavarivanja potvrđena		
Podgovarač	Posmatrati isto kao i glavnog proizvođača		Zadovoljiti sve zahteve
Zavarivači-operatori	Provereni prema ISO 9606		
Koordinacija u zavarivanju	Rukovodeće osoblje sa odgovarajućim znanjem ili osobe sa istim znanjem		Ne zahteva se, proizvođač raspolaže osobljem
Osoblje za kontrolu	Mora biti na raspolaganju dovoljno osoblja i kompetentno osoblje		Dovoljan i kompetentan prikaz
Proizvodna oprema	Potrebno za pripremu, rezanje i zavarivanje, sa bezbednosnim uređajima i zaštitnom odećom		Zahtevi nisu utvrđeni
Održavanje uređaja	Mora da postroji plan održavanja	Zahtevi nisu utvrđeni, moraju biti adekvatni	Nema zahteva
Plan proizvodnje	Neophodan	Potreban orijentacioni plan	Nema zahteva
Radna uputstva	Mora da postoji specifikacija tehnologije zavarivanja (WPS), ili odgovarajuće radno uputstvo		Nema zahteva
Dokumentacija	Neophodna	Nije utvrđeno	Nema zahteva
Specifikacija tehnologije zavarivanja WPS	Zavarivač mora da ima instrukcije		Nema zahteva
Kvalifikacija tehnologije zavarivanja	U skladu sa standardom potvrđiti primenu standarda ili zahteve ugovora		Zahtevi nisu utvrđeni
Ispitivanje potrošnog materijala	Samo ako je utvrđeno	Nije utvrđeno	Nema zahteva
Skladištenje i rukovanje potrošnim materijalom	Minimalno prema preporuci dobavljača		
Skladištenje osnovnog materijala	Zaštita zavisi od uticaja okoline; mora se utvrditi		Nema zahteva
Termička obrada posle zavarivanja	Neophodna specifikacija i kompletnim zapisom	Neophodna potvrda specifikacije	Nema zahteva
Kontrola pre, u toku i nakon zavarivanja	Kada se zahteva za utvrđenu operaciju		Obavezno kada je utvrđeno ugovorom
Neusaglašenosti	Mora da postoji procedura		
Baždarenje	DA	Nije utvrđeno	
Identifikacija	Potrebno, kada je izvodljivo	Potrebno, kada je nužno	Nije utvrđeno
Sledljivost	Potrebno, kada je izvodljivo	Potrebno, kada je nužno	Nije utvrđeno
Zapisi o kvalitetu	Mora postojati radi utvrđivanja odgovornosti za proizvodnju		Kada se traži ugovorom
Mora da se čuva najmanje pet godina			

2.3.1. *Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja*

Standardom EN ISO 15614-1 se utvrđuju opšta pravila za specifikaciju i kvalifikaciju tehnologije zavarivanja za metalne materijale. Podrazumeva se da se za specifikaciju tehnologije zavarivanja u proizvodnji koriste zavarivači koji imaju uverenje u skladu sa odgovarajućim EN 287. To uverenje garantuje da je zavarivač dokazao najmanje potrebnu meru veštine i znanja, u skladu sa stanjem tehnike, nezavisno od područja primene. Rok važenja Uverenja o osposobljenosti zavarivača je dve godine, uz uslov da je potpisano u razmacima od šest meseci od strane poslodavca. Standard EN ISO 15614-1 pretpostavlja proizvodnju pomoću konvencionalne opreme za zavarivanje uz neposrednu kontrolu zavarivača, a primenjuje se kada se zahteva kvalifikacija tehnologije zavarivanja ugovorom, standardima, pravilima ili zakonskim uslovima. Standard nije dovoljan za potpuno automatizovano ili robotizovano zavarivanje koje se obavlja bez neposredne ljudske kontrole. Specifikacija tehnologije zavarivanja-WPS je dokument koji detaljno opisuje zahtevane promenljive za određenu primenu da bi se osigurala ponovljivost. Sve operacije zavarivanja moraju da budu na odgovarajući način isplanirane pre proizvodnje, a planiranje mora da obezbedi WPS za sve zavarene spojeve.

Prethodna specifikacija tehnologije zavarivanja-pWPS je probna specifikacija tehnologije zavarivanja koju je proizvođač prihvatio kao odgovarajuću, ali koja nije proverena u cilju kvalifikacije. Zavarivanje ispitnih uzoraka neophodnih za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja mora da bude izvedeno na osnovu prethodne specifikacije tehnologije zavarivanja pWPS. Specifikacija tehnologije zavarivanja se označava kao pWPS sve dok ne dobije kvalifikaciju u skladu sa pravilima ovog standarda.

Specifikacija tehnologije zavarivanja WPS mora da sadrži sve potrebne podatke koji se odnose na uslove izvođenja operacije zavarivanja:

Podaci o proizvođaču:

- ⇒ identifikacija proizvođača;
- ⇒ identifikacija specifikacije tehnologije zavarivanja (WPS), i
- ⇒ pozivanje na uverenje o kvalifikaciji tehnologije zavarivanja (WPAR) ili druga dokumenta koja se zahtevaju.

Podaci o osnovnom materijalu:

- ⇒ vrsta osnovnog materijala, i
- ⇒ mere materijala.

Zajednički podaci za sve tehnologije:

- ⇒ postupak zavarivanja;
- ⇒ priprema spoja;
- ⇒ položaji zavarivanja;
- ⇒ priprema žleba ili ivica;
- ⇒ tehnika zavarivanja;
- ⇒ žlebljenje korene strane;
- ⇒ podloška;
- ⇒ dodatni materijal (označavanje);
- ⇒ dodatni materijal (mere);
- ⇒ dodatni materijali i prašak (rukovanje);

- ⇒ električni parametri;
- ⇒ mehanizovano zavarivanje;
- ⇒ temperatura predgrevanja;
- ⇒ međuslojna temperatura, i
- ⇒ termička obrada posle zavarivanja.

Posebni podaci za pojedine grupe postupaka zavarivanja:

- ⇒ postupci grupe 11 (elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom bez zaštite gasa);
- ⇒ postupci grupe 12 (elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom pod praškom);
- ⇒ postupci grupe 13 (elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa);
- ⇒ postupci grupe 14 (zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti gasa), i
- ⇒ postupci grupe 15 (zavarivanje plazmom).

Izveštaj o kvalifikaciji tehnologije zavarivanja (WPAR) je dokument koji sadrži sve važne podatke o zavarivanju ispitnog uzorka neophodnog za kvalifikaciju specifikacije tehnologije zavarivanja, kao i sve rezultate ispitivanja probnog zavarivanja. Postoji više metoda za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja, a svaka ima određena ograničenja u primeni s obzirom na postupak zavarivanja, osnovni metal i potrošne materijale. Svaka WPS mora biti kvalifikovana samo jednom metodom. Primena određene metode kvalifikacije tehnologije zavarivanja često je uslovljena primenjenim standardom. Ako takvog zahteva nema, metode kvalifikacije moraju da utvrde ugovorne strane u fazi ugovaranja ili naručivanja. Kvalifikacija se potvrđuje u vidu jednog od sledećih tipova dokumentacije:

Kvalifikacija na bazi prethodnog iskustva u zavarivanju

Proizvođač može da dobije kvalifikaciju WPS pozivanjem na prethodno iskustvo, pod uslovom da može dokazati odgovarajućom verodostojnom dokumentacijom nezavisne prirode da je već uspešno zavario tipove spoja i materijale koji su u pitanju. Dozvoljeno područje specifikacije tehnologije zavarivanja kvalifikovane pozivanjem na prethodno iskustvo mora da bude ograničeno na standardne materijale, postupke zavarivanja, potrošne materijale i područja osnovnih promenljivih veličina, za koje odgovarajuće iskustvo može da se dokumentuje.

Kvalifikacija na bazi proverenih potrošnih materijala

Neki materijali ne pogoršavaju značajno osobine materijala u ZUT, pod uslovom da se količina unete toplote održava u okviru propisanih ograničenja. Za takve materijale WPS se smatra kvalifikovanim pod uslovom da su potrošni materijali za zavarivanje provereni i da su sve osnovne promenljive veličine u okviru područja za koje kvalifikacija važi. Kvalifikacija na bazi proverenih potrošnih materijala je ograničena na postupke elektrolučnog zavarivanja sa dodatnim metalom.

Kvalifikacija na bazi probe tehnologije zavarivanja

Probe tehnologije zavarivanja moraju da se izvedu u skladu sa standardom.

Kvalifikacija na bazi standardne tehnologije zavarivanja

Specifikacija tehnologije zavarivanja proizvođača je kvalifikovana ukoliko su područja za sve promenljive veličine u okviru područja dozvoljenog standardnom tehnologijom zavarivanja. Naročito mora da se vodi računa o pravilnoj specifikaciji osnovnih promenljivih u zavarivanju da bi kvalifikovana WPS bila nezavisna od bilo koje mašine za zavarivanje ili od nekih posebnih uslova.

Kvalifikacija na bazi probe zavarivanja pre početka proizvodnje

Kvalifikacija na bazi probe zavarivanja pre početka proizvodnje može da se koristi kada oblik i mere zahtevanih ispitnih uzoraka ne predstavljaju u dovoljnom stepenu spoj koji treba da se zavari. U takvim slučajevima moraju da se urade jedan ili više specijalnih ispitnih uzoraka koji će simulirati spoj u proizvodnji u pogledu svih bitnih karakteristika. Proba mora da se obavi pre proizvodnje i u uslovima koji će važiti u proizvodnji.

Standardom EN ISO 15614-1 se utvrđuje postupak kvalifikacije tehnologije zavarivanja ispitivanjem. On ne poništava kvalifikacije tehnologije zavarivanja koje su prethodno izvedene prema specifikacijama ili nacionalnim standardima, ali ako su potrebna dodatna ispitivanja, ona se obavljaju u skladu sa njim. Standardom se definišu uslovi izvođenja ispitivanja i granice područja važnosti kvalifikovane tehnologije zavarivanja. Ako specifična upotreba, materijal ili uslovi proizvodnje zahtevaju širi program ispitivanja od onog koji je zahtevan ovim standardom, mogu da se urade dodatna ispitivanja:

- ⇒ ispitivanje šava zatezanjem u podužnom pravcu;
- ⇒ ispitivanje savijanjem metala šava;
- ⇒ ispitivanje udarom po Šarpiju na epruveti sa V-zarezom;
- ⇒ određivanje napona tečenja ili granice 0,2%;
- ⇒ određivanje izduženja;
- ⇒ hemijska analiza i određivanje mikrostrukture, i
- ⇒ određivanje sadržaja ferita u nerđajućim austenitnim čelicima.

Zavareni spoj na koji će se primenjivati tehnologija zavarivanja u proizvodnji predstavlja se izradom jednog ili više standardizovanih ispitnih uzoraka. Ispitni uzorak mora da bude izrađen u skladu sa propisima i preporukama sadržanim u ovom standardu, koji se odnose na oblik i mere ispitnih uzoraka, u zavisnosti od toga da li se radi o sučeonom spoju na limu, sučeonom spoju na cevi, sučeonom 'T' spoju, spoju ogranka, ili ugaonom spoju.

Kontrola i ispitivanje obuhvataju kontrolu bez razaranja (KBZ) i ispitivanje razaranjem, u skladu sa odgovarajućim zahtevima. Položaji epruveta su definisani standardom, a epruvete se uzimaju samo ako su rezultati kontrole bez razaranja zadovoljavajući. Posle bilo koje termičke obrade koja se izvodi posle zavarivanja a pre uzimanja epruveta, svi ispitni uzorci se podvrgavaju vizuelnoj kontroli i kontroli bez razaranja. U slučaju ispitnih uzoraka koji se ne podvrgavaju naknadnoj termičkoj obradi, mora da se uzme u obzir sklonost materijala ka stvaranju prslina usled vodonika, pa KBZ može da bude drugačija.

Kvalifikacija tehnologije zavarivanja je uspela ako su greške na ispitnom uzorku ustanovljene ispitivanjem u granicama nivoa kvaliteta *B* standarda EN ISO 5817 izuzev grešaka kao što su: preveliko nadvišenje lica šava, preterano ispupčenje lica i korena i preveliki provar, za koje se primenjuje nivo kvaliteta *C*. Ispitivanje razaranjem obuhvata sledeće metode, koje su detaljno opisane i definisane u standardu EN ISO 15614-1:

- ⇒ ispitivanje poprečnim zatezanjem;
- ⇒ ispitivanje savijanjem;
- ⇒ makrostrukturno ispitivanje;
- ⇒ ispitivanje udarom, i
- ⇒ ispitivanje tvrdoće.

Kada ispitni uzorak ne zadovolji jednu od KBZ, uzima se novi ispitni uzorak i podvrgava istim kontrolama. Ako dodatni ispitni uzorak ne zadovolji odgovarajuće zahteve, zaključuje se da pWPS ne omogućava, bez izmena, ostvarivanje usaglašenosti sa zahtevima ovog standarda.

Kvalifikacija tehnologije zavarivanja ostvarena za čelik iz jedne grupe važi za sve čelike iste grupe, bilo da imaju manje legirajućih elemenata, bilo da imaju niži napon tečenja, s tim da su dodatni materijali korišćeni za kvalifikaciju primenljivi i za druge čelike iz grupe.

2.3.2. Nivoi kvaliteta i greške zavarenih spojeva

Pojavom međunarodnih standarda o nivoima kvaliteta EN ISO 5817, kvalitet zavarenih spojeva je definisan na tri nivoa: niski (oznaka *D*), srednji (*C*) i visoki (*B*), a u posebnim slučajevima mogu da se definišu i veoma visoki nivo (*A*) i veoma niski nivo (*E*), što je prihvaćeno i u SRPS C.T3.010/95. Nivo kvaliteta mora da se utvrdi pre početka proizvodnje, po mogućnosti u fazi ugovaranja.

Kriterijumi prihvatljivosti grešaka u zavarenim spojevima definisani su standardima EN ISO 5817 za čelik debljine 3-63mm i EN ISO 10042 za aluminijum i njegove zavarljive legure, a dogovorom zainteresovanih strana oblast primenljivosti može da se proširi. Greške su navedene u redosledu prema njihovim stvarnim veličinama, a za njihovo otkrivanje i određivanje potrebno je koristiti jednu ili više metoda KBZ. Otkrivanje i vrednovanje grešaka zavisi od metode ispitivanja i obima ispitivanja utvrđenih standardom ili ugovorom. Ovim standardima utvrđene su granične vrednosti atributa grešaka za svaki nivo kvaliteta. U opisu graničnih vrednosti korišćeni su sledeći atributi:

- ⇒ Duga greška-jedna ili više grešaka sa ukupnom dužinom većom od 25mm na svakoj dužini šava od 100mm, ali ne manjom od 25% ukupne dužine šava kada je dužina šava manja od 100mm.
- ⇒ Kratka greška-jedna ili više grešaka sa ukupnom dužinom manjom od 25mm na svakoj dužini šava od 100mm, ali najviše do 25% ukupne dužine šava ako je dužina šava manja od 100mm.
- ⇒ Veličina neke dimenzije greške u odnosu na debljinu sučeonog ili ugaonog šava.
- ⇒ Veličina neke dimenzije greške u odnosu na debljinu osnovnog materijala.
- ⇒ Veličina neke dimenzije greške u odnosu na širinu nadvišenja lica ili korena šava.
- ⇒ Veličina neke dimenzije greške (visina ili širina) izražena u mm.
- ⇒ Dužina greške izražena u mm.
- ⇒ Projektovana površina greške u odnosu na projektovanu površinu šava (ispitivana dužina i najveća širina šava).

Ako se pojavi mogućnost superponiranja pojedinačnih grešaka, onda je potrebno da zbir svih dozvoljenih vrednosti grešaka bude ograničen utvrđenom veličinom greške za različite nivoe kvaliteta.

2.4. POREĐENJE POSTUPAKA ZAVARIVANJA-PREPORUKE ZA IZBOR

Jedan od elemenata obezbeđenja kvaliteta zavarenih spojeva je pravilan izbor postupka zavarivanja. Stoga je ovde dat pregled prednosti, mana i primene postupaka zavarivanja u čvrstom stanju (tab. 2.3), i postupaka zavarivanja topljenjem (tab. 2.4).

Tabela 2.3. Prednosti, nedostaci i primena postupaka zavarivanja u čvrstom stanju

Postupak zavarivanja	Prednosti	Nedostaci	Primena
Zavarivanje u čvrstom stanju	Šav nema livenu strukturu. Mala promena osobina osnovnog materijala	Ograničen izbor oblika spoja. Oprema glomazna, neprenosiva i skupa.	
Zavarivanje eksplozijom	Izuzetno dobre osobine spoja. Pogodan za spajanje raznorodnih metala. Ne angažuje veliki broj specijalizovanih zavarivača pri zavarivanju.	Ograničen izbor oblika spoja. Velika opasnost zbog korišćenja eksploziva.	Plakiranje. Spajanje cevi za cevnu ploču. Zavarivanje cevi na gradilištima.
Zavarivanje trenjem	Izuzetno dobre osobine spoja. Pogodan za spajanje raznorodnih metala. Mala potrošnja energije.	Ograničen na sučeone spojeve malih površina. Neophodna naknadna mehanička obrada. Skupa oprema.	Spajanje vijaka, spajanje okruglih šipki sa cevima. Zavarivanje cevi na gradilištima.
Zavarivanje ultrazvukom	Velika produktivnost. Mala potrošnja energije.	Nedovoljna snaga izvora. Skupa oprema.	Zavarivanje plastike i tankih metalnih delova
Zavarivanje difuzijom	Odsustvo metalurških promena.	Izuzetno skupa oprema. Dugotrajan proces.	Spajanje delova od skupih legura

Tabela 2.4. Prednosti i nedostaci postupaka zavarivanja topljenjem

Postupak zavarivanja	Prednosti	Nedostaci	Primena
Zavarivanje topljenjem	Raznolikost postupaka i oblika spojeva. Mali troškovi za većinu postupaka. Dobre osobine spojeva čelika i drugih legura.	Metalurške promene u metalu šava i ZUT.	
Elektro-otporno zavarivanje	Izvođe ga obučeni ili priučeni radnici. Potrebna je mala priprema i neznatna naknadna obrada zavara.	Ograničen izbor oblika spoja. Ograničena prenosivost opreme.	Primena za proizvode od tankih limova.
Gasno zavarivanje	Mali troškovi za opremu.	Mali stepen iskorišćenja. Česta su vitoperenja spoja. Osobine spoja često loše.	U popravkama (reparaturama) i održavanju.
Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (E)	Raznovrsni oblici spojeva. Zavarivanje u svim položajima. Jeftina priprema i oprema. Dobre osobine zavarenih spojeva čelika i drugih legura.	Zahteva obuku zavarivača. Elektroda se često menja. Pri radu u više prolaza potrebno uklanjanje troske.	Veoma korišćen postupak u izradi nove opreme, reparaturama i održavanju.
Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)	Automatski postupak. Velika brzina zavarivanja i produktivnost.	Ograničen položaj zavarivanja i primena na nelegirane i niskolegirane čelike.	Sučeon i ugaoni spojevi većih debljina i dužina.
Zavarivanje netopljivom elektrodom, zaštita inertnim gasom (TIG)	Raznovrsni tipovi spoja. Zavarivanje u različitim položajima. Moguće izvođenje ručno, mehanizovano i automatsko. Visok kvalitet zavarenog spoja.	Visoka cena zaštitnog gasa. Potrebni su dobro obučeni zavarivači. Zavarivanje u više prolaza pri većoj debljini.	Velika primena za neželjezne metale. Zavarivanje korenog šava ako ne može da se izvede potkoren.
Zavarivanje elek. žicom, zaštita inertnim gasom (MIG)	Visok kvalitet zavarenog spoja kod velikog broja legura. Velika zapremina istopljenog metala. Poluautomatsko i automatsko izvođenje.	Visoka cena inertnog gasa. Potrebna dobra obučenos izvršioca.	Najveća primena kod austenitnih čelika i drugih legura.
Zavarivanje el. žicom, aktivni gas (MAG), prenos u kapljicama	Velika dubina uvarivanja. Niska cena zaštitnog gasa.	Horizontalni i horizontalno-vertikalni položaj. Nelegirani i niskolegirani čelici debljine iznad 6mm.	Velika primena u proizvodnji posebno u slučaju manjih zahteva u pogledu kvaliteta.

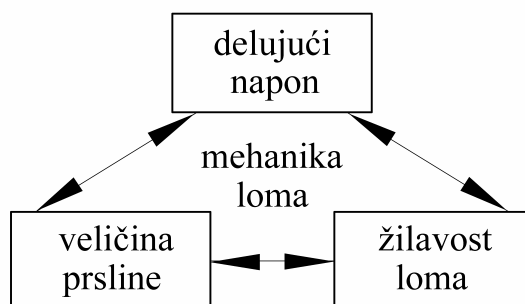
Tabela 2.4. Prednosti i nedostaci postupaka zavarivanja topljenjem (**nastavak**)

Postupak zavarivanja	Prednosti	Nedostaci	Primena
Zavarivanje el. žicom, aktivni gas (MAG), prenos u kratkom spoju	Dobar kvalitet zavarenog spoja. Polu-automatsko i automatsko zavarivanje. Primenljiv za debljine 1-4mm, sa velikim zazorom i smaknutim ivicama.	Ograničen na nelegirane i niskolegirane čelike. Postoji opasnost od pojave nespojenih mesta.	Zavarivanje korena kod većih debljina lima.
Impulsno MIG/MAG zavarivanje	Zavarivanje u svim položajima, velikog raspona debljina mnogih materijala.	Umereni troškovi. Složenija oprema.	Pogodan za nerđajuće čelike i druge legure.
Zavarivanje plazmom	Velika brzina zavarivanja. Zavarivanje debljina od 0,1 do 8mm.	Skupa oprema. Otežano zavarivanje lakih metala. Samo horizontalan položaj.	Zavarivanje tankih materijala.
Zavarivanje pod troskom (EPT)	Automatski postupak velike brzine sa velikim udelom istopljenog materijala. Pogodan za velike debljine delova od nelegiranih i niskolegiranih čelika.	Samo u vertikalni položaj, uz pažljivo postavljanje opreme. Gruba struktura. Potrebna termička obrada.	Zavarivanje u proizvodnim pogonima i gradilištima.
Zavarivanje elektronskim snopom	Velika dubina uvarivanja i produktivnost. Visok kvalitet zavarenih spojeva. Minimalna deformacija. Mogu da se zavare finalno obrađeni sklopovi.	Skupa oprema i zavarivanje. Dimenzije delova ograničene dimenzijama vakuum komora.	Ograničena primena, za proizvodnju specijalnih delova.
Zavarivanje laserom	Omogućava primenu vrlo visoko koncentrisanih izvora toplote u bilo kojoj atmosferi.	Visoki troškovi. Delovi sa površinama koje reflektuju se ne mogu zavariti.	Postupak je u fazi razvoja.

3. OSNOVI MEHANIKE LOMA

3.1. RAZVOJ MEHANIKE LOMA

Praktična primena mehanike loma se od samog početka zasnivala na dvostranom tumačenju njenih parametara. S jedne strane oni predstavljaju opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući geometriju prsline, a s druge strane svojstvo materijala, odnosno njegovu otpornost na rast prsline. Time je uspostavljen klasični trougao mehanike loma, odnosno veza između delujućeg napona (opterećenja), osobina materijala (žilavost loma) i veličine prsline (sl. 3.1) [13]. Razvojem teorijske osnove i praktičnih ispitivanja mehanika loma je postala jedan od temelja nove naučne discipline-integriteta konstrukcija. Drugim rečima, umesto da se bavi samo analizom loma, mehanika loma je postala značajno oruđe u rukama inženjera čiji je zadatak da lom spreče.



Slika 3.1. Shema "trougla" mehanike loma [13]

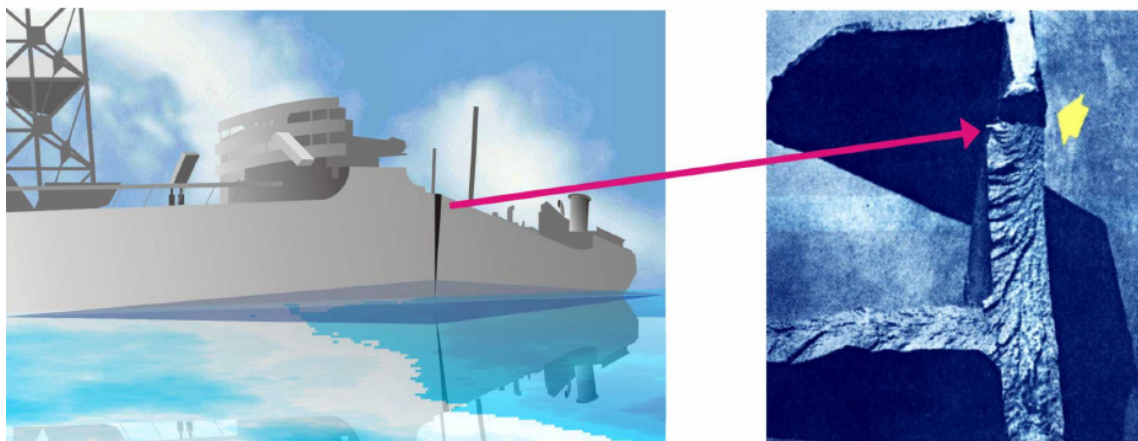
Primena mehanike loma je donela značajne promene u inženjerskoj praksi. Kao primer za ilustraciju ove tvrdnje mogu da se navedu problemi sa Aljaska cevovodom u SAD i primena principa konstruisanja sa sigurnošću od loma. U tom slučaju po prvi put su kriterijumi mehanike loma prihvaćeni kao merodavni, umesto previše konzervativnih standarda o dozvoljenim greškama u zavarenom spoju. Naime, kada je ispitivanjem bez razaranja (IBR) utvrđen veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje kako ekonomske opravdanosti, tako i tehničke neophodnosti popravke. Stoga je nadležna institucija, na zahtev kompanije koja je postavljala cevovod zatražila pomoć od "Nacionalnog biroa za standarde" (tada "National Bureau of Standards"-NBS), danas "Nacionalni institut za standarde i tehnologiju" ("National Institute of Standards and Technology"-NIST). Detaljna analiza parametara mehanike loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha prsline, obuhvatila je s jedne strane procenu sile rasta prsline, a s druge strane otpornost materijala (metala šava) na rast prsline.

Rezultati ovog istraživanja su zvanično prihvaćeni, pa je obim popravke drastično smanjen, čime su izbegnuti nepotrebni troškovi, a takođe i opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavarivanjem. Možda je najvažnije istaći da je na osnovu ovog istraživanja zaključeno, "da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dopušteni izuzetak od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako takva analiza daje ubedljivu i konzervativnu (sigurnu) procenu integriteta konstrukcije". Treba takođe istaći da se do ovog nivoa primene mehanike loma došlo ne samo detaljnim istraživanjem u konkretnom slučaju, već i prethodnim, intenzivnim razvojem mehanike loma kao naučne discipline [13].

Greške u zavarenim spojevima koje su dovele do katastrofalnih posledica (npr. brodovi "Liberty", naftna platforma "Alexander Kielland", trajekt "Estonija") uslovile su razvoj i primenu mehanike loma, kao naučne discipline koja izučava ponašanje materijala u prisustvu prslina. U okviru ovih istraživanja zavareni spojevi imaju poseban značaj, jer su toplotni i metalurški procesi pri zavarivanju veoma pogodni za nastanak prslina.

Ključno pitanje u ovakvim istraživanjima je da li će prslina u uslovima tipičnim za neku zavarenu konstrukciju mirovati, u kom slučaju je konstrukcija bezbedna, ili će rasti i eventualno dovesti do njenog loma. U ovom drugom slučaju rast prslina može da bude spor i stabilan, ako ga prate plastične deformacije ispred vrha prsline, ili brz i nestabilan, ako plastičnih deformacija praktično nema. Nestabilan rast prsline izaziva kruti lom i izučava se u okviru linearno-elastične mehanike loma (LEML), dok se stabilan rast prsline izučava u okviru elasto-plastične mehanike loma (EPML) jer izaziva žilav lom. U svakom slučaju primenjuju se odgovarajući kriterijumi loma, koji se dobijaju iz energetske ravnoteže opterećenog tela sa prslinom, poređenjem parametara mehanike loma sa odgovarajućim svojstvima materijala. Tako se u okviru linearno-elastične mehanike loma poredi faktor intenziteta napona sa žilavošću loma, a u okviru elasto-plastične mehanike loma otvaranje prsline ili J -integral sa njihovim kritičnim vrednostima.

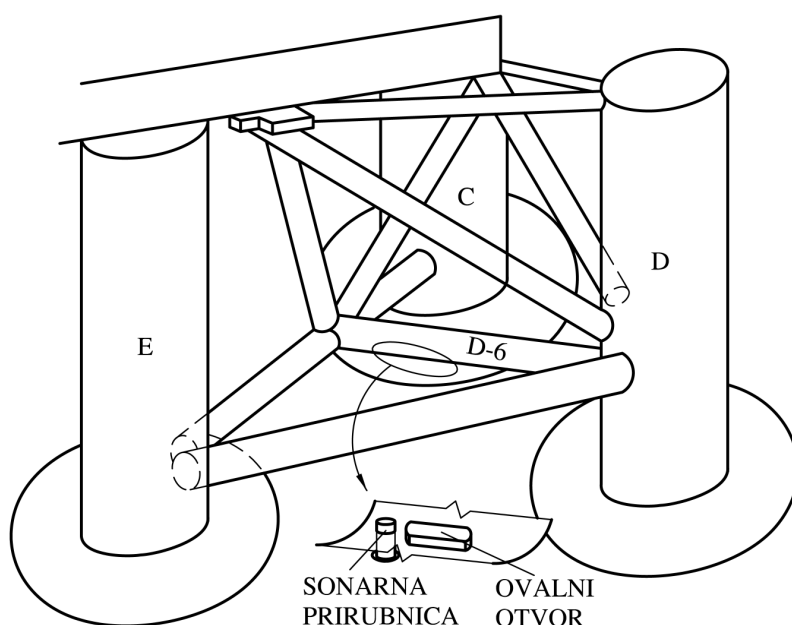
Među najpoznatije lomove zavarenih konstrukcija svakako spadaju lomovi brodova "Liberty", koji su pravljani tokom drugog svetskog rata elektrolučnim zavarivanjem pod praškom, što je tada prvi put primenjeno u masovnoj proizvodnji. Lomovi brodova "Liberty" su bili kruti, uz minimalnu plastičnu deformaciju, a osnovni uzroci su bili nekvalitetan materijal (visoka temperatura prelaska u kruti lom), sprečena deformacija u pravcu debljine (ravno stanje deformacije) i dejstvo zaostalih napona. Od 4694 napravljenih brodova čak 233 broda se polomilo na dva dela, slično primeru na sl. 3.2, koji se odnosi na brod ukotvljen u luci, na koji praktično nije delovalo spoljno opterećenje, već samo unutrašnji (zaostali) naponi [14].



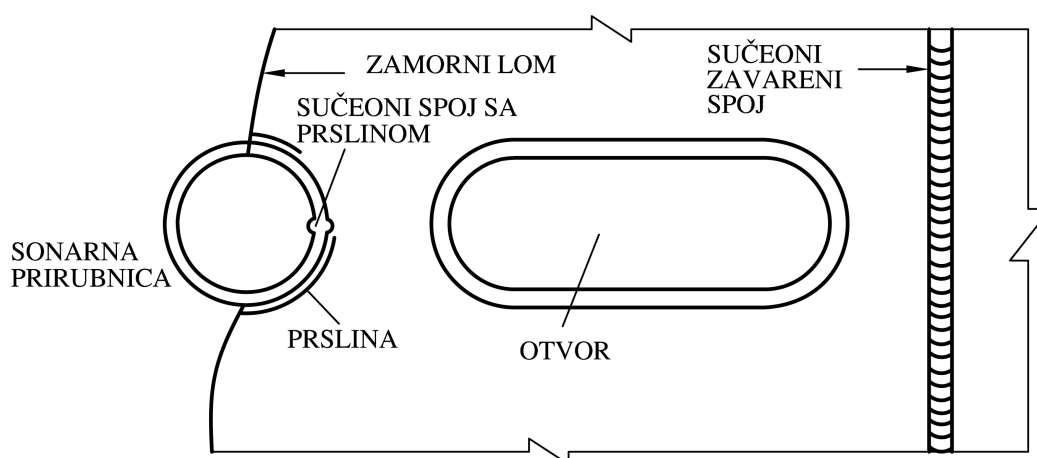
Slika 3.2. Izgled preloma broda "Liberty" [14]

Dok lomovi brodova "Liberty" mogu da se pripišu nedovoljnom poznavanju tehnologije zavarivanja i lošem materijalu, dotle u slučaju havarija naftne platforme "Alexander Kielland" i trajekta "Estonija" uzrok treba da se traži u pogrešnoj proceni značaja nekih zavarenih spojeva i njihovoj lošoj izradi.

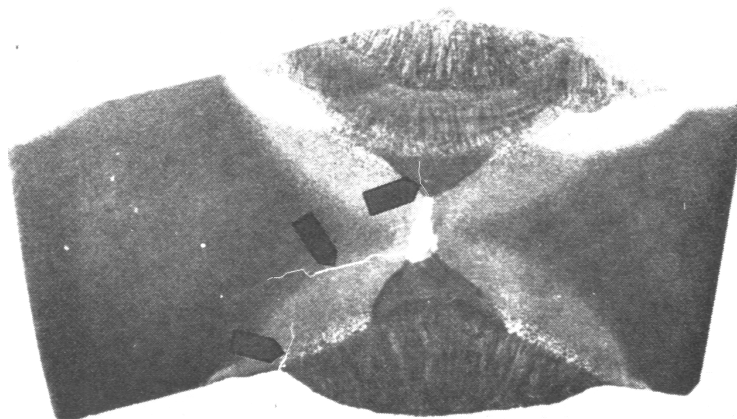
U slučaju naftne platforme, havarija koja je 1980. godine odnela 123 života je posledica zamornog loma po obimu poprečnog nosača (cev D-6, sl. 3.3) platforme. Ovaj zamorni lom, sl. 3.3, je iniciran prslinama u sučeonom zavarenom spoju prirubnice (koja je izrađena savijanjem ploče i podužnim sučeonim zavarivanjem), sl. 3.4 i sl. 3.5, i prslinama u ugaonim zavarenim spojevima cevi D-6 i sonarne prirubnice, za koje se smatralo da nisu od prvorazrednog značaja, pa njihovoj izradi nije posvećena potrebna pažnja. Osim toga, od bitnog uticaja je bila velika koncentracija napona izazvana ubacivanjem sonarne prirubnice, bez prelaznog radijusa ili nekog drugog načina smanjenja koncentracije napona, sl. 3.3. Ironijom sudbine sonarni uređaj zbog koga je prirubnica ubačena nije nikad ugrađen.



Slika 3.3. Nosači naftne platforme [15]



Slika 3.4. Razvijena površina na mestu preloma [15]

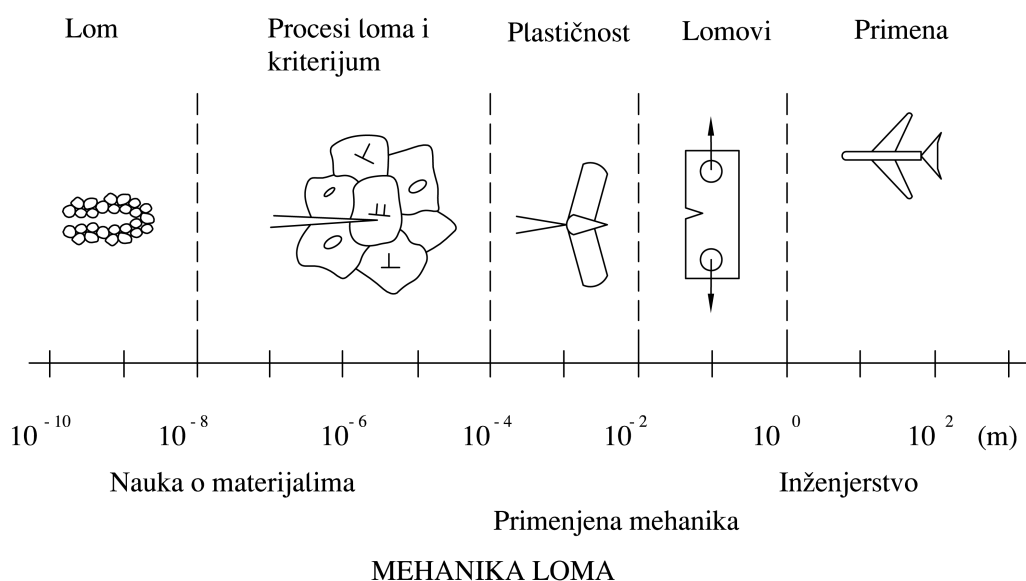


Slika 3.5. Sučeoni zavareni spoj sonarne prirubnice sa prslinama [15]

Osnovni uzrok havarije trajekta "Estonija" 1994. godine, kada je poginulo 910 putnika, je preopterećenje zavarenog spoja ručice za zatvaranje pokretnih vrata izazvano nepropisnim rukovanjem (vrata nisu bila potpuno zatvorena). Zbog ovog preopterećenja, zavareni spoj, koji je vezivao ručicu za brodsku konstrukciju, se slomio, vrata su se otvorila i nagli dotok vode je prevrnuo i potopio trajekt. U ovom slučaju, kao i kod naftne platforme, nije se smatralo da je navedeni spoj od bitnog značaja, pa njegovoj izradi nije posvećena potrebna pažnja.

3.2. ZNAČAJ MEHANIKE LOMA

Mehanika loma je inženjerska disciplina, koja se bavi proučavanjem razvoja prsline u krtim i kvazikrtim telima. Termin mehanika loma ima dvojak smisao. U užem smislu on se odnosi na istraživanje uslova razvoja prsline. U širem smislu on obuhvata i deo otpornosti materijala, koji se odnosi na završnu fazu procesa deformisanja pod delovanjem opterećenja. Ovako postavljena, mehanika loma predstavlja disciplinu u kojoj je neizbežno povezivanje teorijskih razmatranja sa eksperimentalnim rezultatima, s jedne, i sa pojavom lomova i havarija u eksploataciji konstrukcija, s druge strane. U cilju što uspešnije primene mehanike loma potrebno je posedovati i predznanja iz disciplina kao što su mehanika deformabilnog tela i nauka o materijalima, koje su njen sastavni deo, kao što je shematski prikazano na sl. 3.6 [16].



Slika 3.6. Oblasti primene mehanike loma [16]

Pri projektovanju konstrukcija kao što su posude pod pritiskom, mostovi, brodovi, letilice i vozila jedan od osnovnih ciljeva je da se njihove zahtevane performanse optimizuju sa stanovišta sveobuhvatne cene materijala, konstruisanja, izrade, eksploatacije i održavanja. Da 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 koji može da se pojavi. Elementi se zatim dimenzionišu u skladu sa izabranim materijalom, kako bi se predupredila pojava otkaza u bilo kom obliku. Mogući uzroci otkaza su:

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

Inženjeri se u praksi najčešće koncentrišu na prva dva moguća oblika oštećenja polazeći od pretpostavke da će pravilnim izborom materijala i dimenzionisanjem elemenata, tj. ograničavanjem nivoa napona u njima sprečiti pojavu loma. Ovakvo razmišljanje nije uvek ispravno što je u praksi potvrđeno otkazima i lomovima velikog broja konstrukcija pri naponima nižim od napona tečenja. Naime, komponente konstrukcija mogu da sadrže niz slabih mesta koja nastaju pri tehnološkom postupku dobijanja i prerade sirovog materijala, izradi komponenti, montaži, termičkoj obradi, zavarivanju i u toku eksploatacije. Ispitivanja su potvrdila da u konstrukcijama praktično uvek postoji neki oblik diskontinuiteta u materijalu. Diskontinuiteti mogu biti mikronske veličine ali nekad mogu postojati i prsline od nekoliko centimetara. Moderne metode ispitivanja bez razaranja za utvrđivanje grešaka u materijalu kao što su ultrazvučna i radiografska, iako su značajno unapređene, ne mogu uvek da otkriju veoma male diskontinuitete u materijalu kao što su prsline ili poroznost.

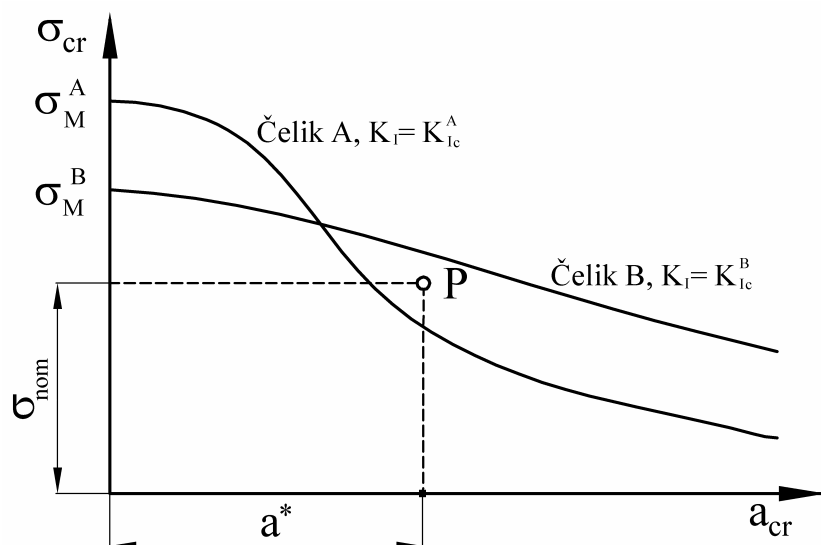
Drugim rečima kontrola kvaliteta može uticati da se smanje ili otklone neke greške u materijalu, ali se one, u načelu, ne mogu izbeći. Nameće se zaključak da se pri pravilnom projektovanju konstrukcija sa stanovišta sigurnosti u razmatranje moraju uzeti svi mogući pojavni oblici otkaza. Mehanika loma se bavi problemima stabilnog ili nestabilnog rasta neke već postojeće ili tokom eksploatacije inicirane prsline, kao i analizom oštećenja i lomova nastalih rastom prsline [17].

Jedan od osnovnih zahteva pri projektovanju i dimenzionisanju bilo koje inženjerske konstrukcije je da u periodu predviđene eksploatacije ne dođe do nekog vida oštećenja, usled koga će ona izgubiti funkcionalnost. Znači, do gubitka konstrukcijske celine može doći na različite načine. Međutim, najsloženiji i najopasniji način je onaj koji je u načelu opisan kao "krti lom". Primena metala visoke čvrstoće i relativno visoke vrednosti napona tečenja u inženjerskoj praksi može biti praćena neočekivanim pojavama.

Do sada, se sigurnost konstrukcija u odnosu na navedene oblike mogućeg otkaza postizala dimenzionisanjem delova na osnovu dopuštenih napona σ_{dop} . Ovaj tradicionalni pristup konstruisanja na bazi stepena sigurnosti, međutim, nije dovoljno pouzdan jer se otkazi i havarije dešavaju i pored ispunjenja strogih zahteva u pogledu sigurnosti od plastičnog tečenja. Kao dokaz mogu poslužiti mnogobrojni primeri lomova raznih tipova konstrukcija: čeličnih mostova, rešetkastih nosećih struktura, brodova, letilica, posuda i cevovoda pod pritiskom i mašinskih elemenata [18]. Neki 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.

Da bi se shvatili razlozi pojave problema treba detaljno analizirati dijagram na sl. 3.7 na kome su upoređena dva čelika s obzirom na "osetljivost prema zarezu". Čelik A je

materijal visoke čvrstoće, dok je drugi čelik *B* slabijeg kvaliteta i niže zatezne čvrstoće, ali više žilavosti loma $K_{Ic}^B > K_{Ic}^A$ [18].



Slika 3.7. Izbor materijala na osnovu žilavosti loma [18]

Dijagram na sl. 3.7 pokazuje osetljivost materijala prema postojećim greškama (kao što je ona označena tačkom *P* koja ukazuje da je u izvesnim situacijama zaista opasno primeniti čelik visoke čvrstoće). Pretpostavimo da je nominalni radni napon σ_{nom} znatno niži od zatezne čvrstoće oba razmatrana čelika. Pretpostavimo takođe da materijal od koga je deo izrađen ima neku malu početnu grešku, koja se u radnim uslovima može stabilno razvijati zbog zamora materijala ili zbog uticaja naponske korozije. Označimo prvobitnu veličinu te početne greške sa a^* . Sa sl. 3.7 se vidi da tačka *P*, koja odgovara a^* određuje stvarni napon pri kome će doći do loma konstrukcije, što može da se desi i pri nominalnom naponu σ_{nom} znatno nižem od zatezne čvrstoće oba razmatrana materijala. Očigledan je zaključak da uslov označen tačkom *P* može da se pojavi u radu konstrukcije i da će pri tom doći do loma konstrukcije izrađene od čelika *A*, dok će konstrukcija od čelika *B* ostati neoštećena.

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. Posebno, ovaj nedostatak može biti odlučujući, ako tokom eksploatacije dođe do pojave nekog (ili svih) uticaja:

- ⇒ primena zavarene konstrukcije sa zaostalim naponom nepoznate veličine;
- ⇒ niska radna temperatura ili velika brzina delovanja opterećenja (npr. udarno opterećenje);
- ⇒ velike dimenzije delova, i
- ⇒ promenljivo (zamorno) opterećenje ili agresivna sredina.

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

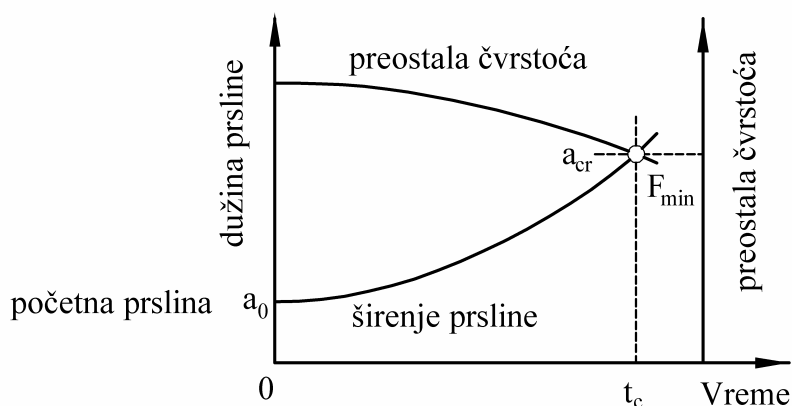
- ⇒ proceni veka konstrukcije, pre puštanja u rad i u toku eksploatacije;
- ⇒ određivanju zaostalih napona;
- ⇒ izboru materijala, i
- ⇒ optimizaciji konstrukcije.

Glavni uzrok loma kod velikog broja konstrukcija je nastanak i širenje prslina kao posledice greške ili druge nesavršenosti u materijalu. Razvoj ovih prslina je prouzrokovan

delovanjem statičkih i dinamičkih opterećenja, a u velikom broju slučajeva olakšan i atmosferskim uticajima (temperatura, vlažnost, koroziona sredina).

Iz iskustava dobijenih ispitivanjem avionskih konstrukcija uočeno je da je vreme potrebno za nastanak prsline relativno kratko u odnosu na vreme potrebno za širenje prsline do loma. Iz tog razloga se i preostali vek konstrukcije procenjuje na osnovu vremena potrebnog za širenje prsline koje iznosi oko 95% veka [18]. Dakle, uobičajeno je da se čitav proces akumulacije oštećenja posmatra kao proces širenja prsline, i da se vreme za njen nastanak ne troši. Ispitivanja pokazuju da je ovakav pristup dovoljno konzervativan da bi bio prihvatljiv. Pri projektovanju konstrukcija mora se uzeti u obzir i čvrstoća i trajnost delova koji sadrže posebno grešku tipa prsline kao najopasnije greške. Trajnost delova konstrukcije zavisi od brzine širenja prsline odnosno brzine smanjenja nosivosti kao posledice dokritičnog razvoja prsline. Shematski prikaz razvoja greške u zavisnosti od vremena i smanjenja preostale čvrstoće dat je na sl. 3.8.

Greška 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. Da bi se obezbedila sigurnost konstrukcije, projektovanje je potrebno izvršiti prema specifičnim zahtevima u pogledu greške tako da se nikad ne dozvoljava razvoj početne greške do njene kritične veličine (dužine), jer bi se u tom slučaju smanjilo projektno granično opterećenje ispod propisanog nivoa (F_{min}) u toku radnog veka konstrukcije. 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, itd.



Slika 3.8. Shematski prikaz razvoja prsline pri povećanju oštećenja i smanjenju preostale čvrstoće [18]

Pri predviđanju preostalog veka konstrukcije polazi se od pretpostavke da prsline već postoji ili da je nastala u početnom periodu veka konstrukcije. Postupak predviđanja veka je prikazan na sl. 3.9 i obuhvata sledeće faze:

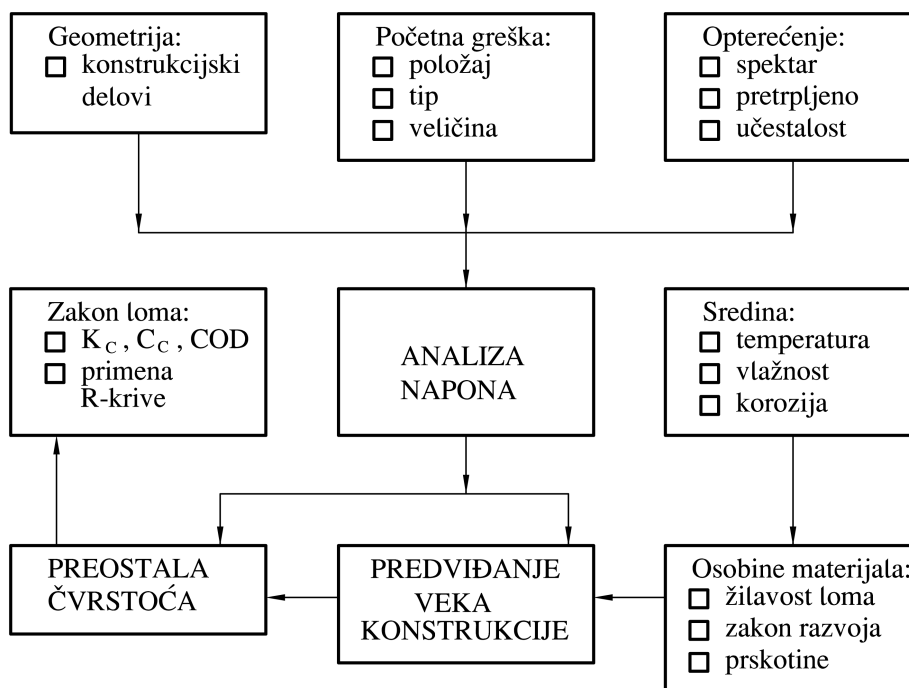
- ⇒ **Geometrija:** Ulazni podatak za analizu napona je određivanje geometrije konstrukcije koja se istražuje (projektuje).
- ⇒ **Utvrđivanje grešaka:** Primenom ispitivanja bez razaranja utvrđuje se prisustvo, veličina i oblik greške u različitim fazama razvoja kao i određivanje kritičnog položaja u posmatranom delu. Napomena: Može se utvrditi samo prisustvo grešaka većih od praga osetljivosti metode.

- ⇒ **Opterećenje:** Potrebno je odrediti tačnu vrednost radnih opterećenja kao i sve promene radnog opterećenja. Napomena: Radno opterećenje nije moguće izmeriti, već se preračunava iz drugih parametara (npr. deformacije).
- ⇒ **Okolna sredina:** Definisane uticaja radne sredine na konstrukciju (temperatura, vlažnost, koroziona dejstva).
- ⇒ **Osobine materijala:** Određivanje žilavosti loma i razvoja prsline u uslovima radne sredine i radnog opterećenja.
- ⇒ **Predviđanje radnog veka konstrukcije:** Radni vek se može predvideti na osnovu analize napona i zakona razvoja prsline, a time se dobijaju podaci o veku pri uticaju zamora i intervalima inspekcije u preostalom veku.

Preostala čvrstoća konstrukcije sa prslinom 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 loma. Različiti autori (istraživači) su predložili više kriterijuma za pojavu loma [19]. Najčešće primenjivani kriterijumi za pojavu loma se zasnivaju na određivanju žilavosti loma pri ravnom stanju napona " K_c ", veličini otvaranja vrha prsline ($CTOD$ ili " δ ") ili veličini otvaranja prsline (COD -crack opening displacement), gustini energije deformacije W , analizi J -integrala [19].

Irwin [20] je predložio da se uticaj plastične zone uzme u obzir uvođenjem u analizu efektivne veličine prsline jednake fizičkoj veličini prsline povećanoj za jednu polovinu veličine plastične zone.

Wells [21] je predložio kriterijum za pojavu loma zasnovan na konačnom otvaranju vrha prsline " δ ". Pretpostavlja se da početak loma nastaje kada pomeranje otvora na vrhu prsline dostigne kritičnu vrednost " δ_c ", nezavisno od dužine prsline.



Slika 3.9. Predviđanje veka konstrukcije i preostale čvrstoće [18]

Kraft i saradnici [22] su prvi predložili kriterijume zasnovane na konceptima otpora razvoju prsline, " K_R ". Oni su pošli od toga da će se prsline razvijati stabilno ako je povećanje otpora sa povećanjem prsline veće od povećanja delujućeg intenziteta napona.

Mehanika loma omogućuje da se dobije kvantitativni odgovor na specifične probleme sigurnosti konstrukcija sa prslinom. Te prsline, 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. Sa porastom prsline povećava se intenzitet napona na njenom vrhu što uzrokuje njen još brži rast. Preostala čvrstoća konstrukcije σ_c , koja je prikazana zavisnošću napona loma od dužine prsline, progresivno opada sa rastom prsline (sl. 3.8).

Nakon određenog vremena preostala čvrstoća postaje toliko mala da komponenta u eksploataciji može da otkáže i pri normalnim radnim opterećenjima. 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.

U tom smislu treba odgovoriti na sledeća pitanja:

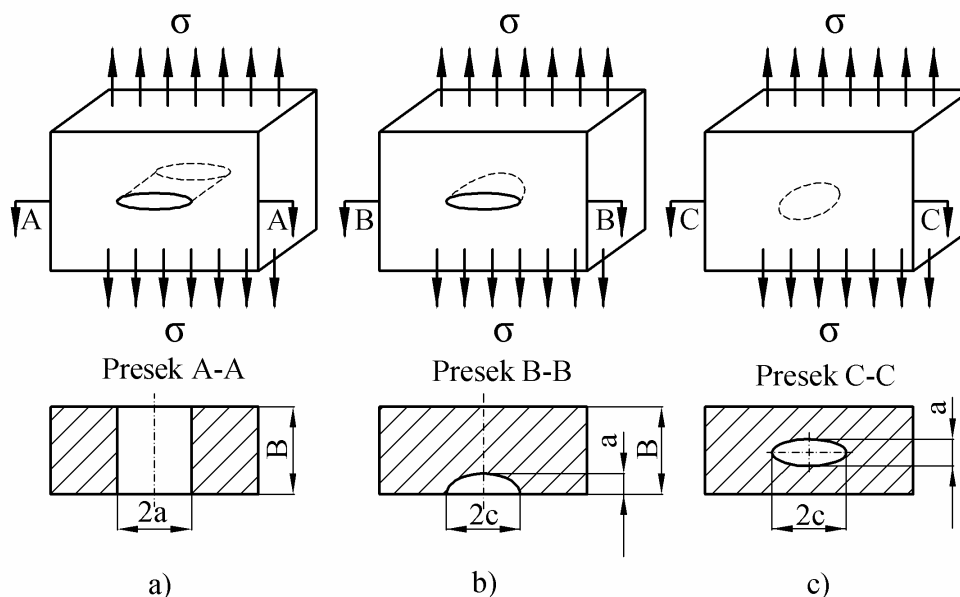
- ⇒ Kolika je preostala nosivost konstrukcije u funkciji dužine prsline?
- ⇒ Koja se veličina prsline može tolerisati pri očekivanim radnim opterećenjima, tj. kolika je maksimalno dozvoljena dužina prsline a_d ?
- ⇒ Koliki je radni vek konstrukcije kada se pretpostavi da u njoj već postoji prsline?
- ⇒ 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 podvrguta inspekciji i utvrđivanju veličine prsline kako bi se mogla blagovremeno izvršiti zamena, popravka ili zaustavljanje eksploatacije?

U ovom trenutku koncepti mehanike loma poseduju metode koje mogu dati kvantitativne i dovoljno precizne odgovore na postavljena pitanja. To praktično znači da je mehanika loma omogućila uvođenje novih koncepcija u projektovanju, kao i u proizvodnji, razvoju, primeni novih materijala kao što su kompozitni, sinterovani i keramički materijali, a pre svega kod zavarenih spojeva. Istovremeno, mogućnost procene opasnosti od greške tipa prsline određene veličine i položaja, koju je otvorila mehanika loma, dozvoljava da se i strukture sa greškama, uz određena ograničenja, puste u eksploataciju.

3.3. OSNOVNE DEFINICIJE MEHANIKE LOMA

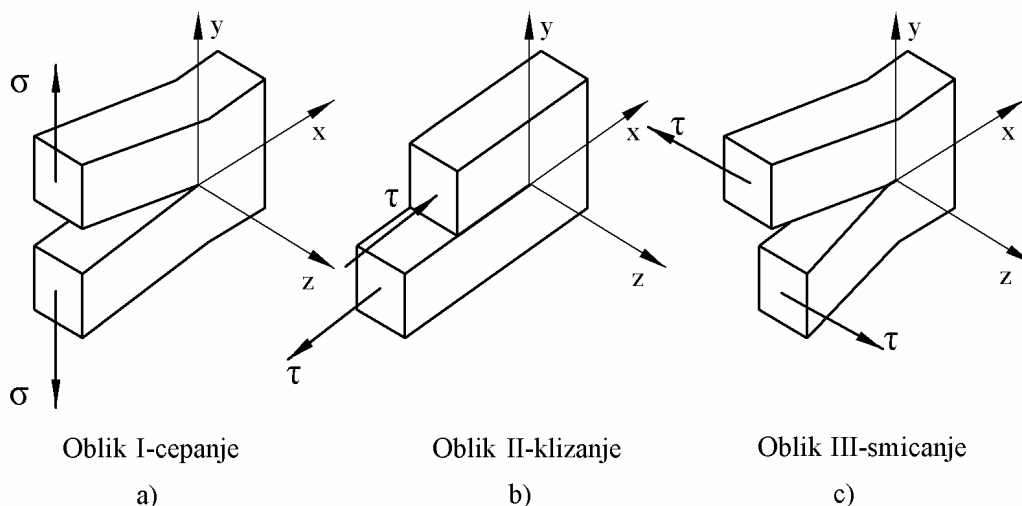
3.3.1. Osnovni oblici obrazovanja površine preloma

Pod prslinom se načelno podrazumeva šupljina u telu obrazovana bez uklanjanja materijala i ograničena sa dve naspramne površine (lica) čije je rastojanje neuporedivo manje od dimenzija njene površine [23]. Zajednička konturna linija površine prsline naziva se čelo (front) prsline, sl. 3.10. Kako su stvarne prsline najčešće nepravilne po obliku, na sl. 3.10 su dati najkarakterističniji oblici ravanske prsline idealizovanog čela koji se usvajaju pri teorijskim razmatranjima. Tako se npr. čelo središnje prolazne prsline (sl. 3.10 a) idealizuje kao prava linija, površinske prsline kao poluelipsa (sl. 3.10 b), a čelo skrivene (unutrašnje) prsline kao elipsa (sl. 3.10 c).



Slika 3.10. Osnovni pojavnici oblici ravnanske prsline [23]
a) prolazna, b) polueliptična, c) eliptična

Razdvojene površine prsline predstavljaju neopterećene granice napregnutog tela, i zbog toga raspodela napona u blizini vrha prsline zavisi od oblika obrazovanja površine preloma. Irwin je pokazao da postoje tri osnovna oblika pomicanja jedne površine prsline ka drugoj i da se njima opisuje ponašanje prsline u svim naponskim stanjima. Na sl. 3.11 prikazani su osnovni oblici pomicanja koji obuhvataju vrh prsline [23].



Slika 3.11. Osnovni oblici razvoja prsline i obrazovanja površine preloma [23]

Oblici pomicanja vrha prsline, koja leži u xz -ravni, mogu se opisati na sledeći način:

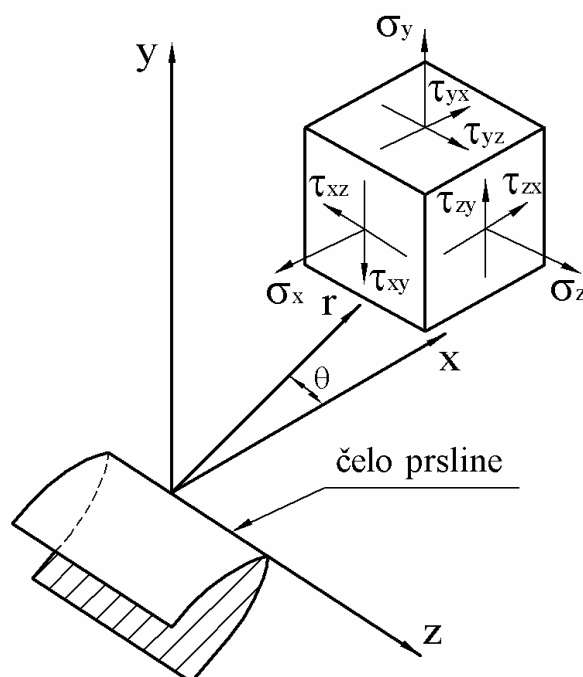
- ⇒ *I* oblik-razvoj prsline cepanjem (sl. 3.11 a) određen je pomicanjem površina prsline tako da se one otvaraju simetrično u odnosu na prvobitnu ravan prsline.
- ⇒ *II* oblik-razvoj prsline klizanjem (sl. 3.11 b) se odnosi na lokalnu deformaciju pri kojoj jedna površina klizi po drugoj u istoj ravni, ali u suprotnim smerovima.
- ⇒ *III* oblik-razvoj prsline smicanjem (sl. 3.11 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).

Najopasniji lomovi nastaju pri razvoju prsline cepanjem (oblik *I*). Iz tog razloga ovaj tip lomova je i najviše proučavan, i za taj oblik razvoja loma definisano je i određivanje faktora intenziteta napona.

3.3.2. Faktor intenziteta napona

Svi oblici razvoja prsline (*I*, *II*, *III*) mogu se svrstati u ravan problem teorije elastičnosti, jer pripadaju bilo ravnoj deformaciji ili generalisanom ravnom stanju napona. Oba ova problema rešavaju se istim matematičkim postupkom. Na sl. 3.12 prikazane su komponente napona u blizini vrha prsline u prostornom sistemu pravouglanih koordinata [24].



Slika 3.12. Komponente napona ispred čela prsline u prostornom sistemu pravouglanih koordinata [24]

Zavisnost komponenti napona σ_x , σ_y , σ_z kao i τ_{xy} mogu se izraziti u obliku:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_y &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_z &= \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) - RSD \\ 0 - RSN \end{cases} \\ \tau_{xy} &= \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{2\theta}{2} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

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

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (3.2)$$

gde je:

$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ - faktor intenziteta napona;

$f_{ij}(\theta)$ - funkcija ugla.

Ovo je poznati Westergardov model (pristup) [53] koji omogućuje povezivanje polja napona lokalizovanog oko čela (vrha) prsline sa globalnim graničnim uslovima.

Na osnovu jedn. 3.2 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 $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$,

koji je jednostavna funkcija udaljenog napona σ i dužine prsline a . Otuda faktor $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ određuje veličinu singulariteta elastičnih napona u polju oko čela (vrha) prsline. Ovaj faktor, nazvan faktor intenziteta napona za tip *I* tj. otvaranje prsline ima oblik:

$$K_I = C\sigma\sqrt{a} \quad (3.3)$$

i izražava se u MN m^{-3/2} ili MPa m^{1/2}. Konstanta C (geometrijski faktor) za dvoosni slučaj zatezanja iznosi $C = \pi^{1/2}$. Treba istaći da je istorijski rezultat u obliku jednačine prvi dobio Grifit [24]. 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.

Ukoliko se zna polje napona, σ_{ij} , u okolini vrha prsline, a koordinatni početak postavi na vrhu prsline, tada se na osnovu jedn. 3.2 faktor intenziteta napona može iskazati u opštem obliku [16]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sigma_{ij} \sqrt{2\pi r} f_{ij}(\theta) \right\} \quad (3.4)$$

ili jednostavnije, ako se zna napon u ravni prsline $\sigma_y(r, \theta = 0)$, kao [16]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sigma_y \sqrt{2\pi r} \right\} \quad (3.5)$$

Slično je i za oblik *II* i *III*.

Faktor intenziteta napona u potpunosti opisuje polje napona, deformacija i pomeranja u okolini vrha prsline tj. u takozvanoj K -dominantnoj zoni. Faktor intenziteta napona je najznačajniji parametar u konceptu LEML.

3.3.3. Koncept konturnog J -integrala

Linearno-elastična mehanika loma se može uspešno primeniti sve dok je veličina plastične zone na vrhu prsline mala u poređenju sa dužinom prsline. Ovo je obično slučaj kod materijala kod kojih se lom pojavljuje pri naponima koji su znatno ispod napona tečenja i u uslovima ravnog stanja deformacije. U slučaju ravnog stanja napona, veličina plastične zone je veća, ali i dalje znatno manja od dužine prsline. U tim uslovima se primenjuje modifikovana linearno-elastična mehanika loma (R -krive). Ukoliko je veličina plastične zone velika u odnosu na dužinu prsline tada linearno-elastična mehanika loma više ne važi, već se moraju primeniti metode elasto-plastične mehanike loma [16].

Za opisivanje lokalnog naponsko-deformacionog polja na vrhu prsline kako u linearno-elastičnom tako i u elastično-plastičnom domenu, Rajs [16] je definisao linijski integral za dvodimenzionalni problem u obliku:

$$J = \oint_S \left(W dy - \vec{T}_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (3.6)$$

gde je:

S -proizvoljna zatvorena linija integracije (u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu);

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

deformacije, respektivno;

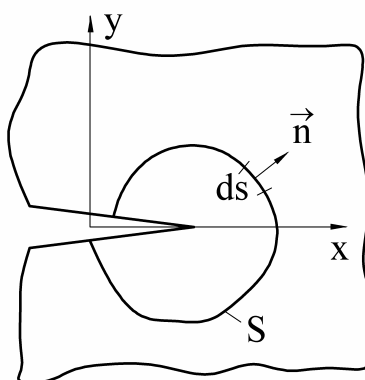
$\vec{T}_i = \sigma_{ij} \vec{n}_j$ -vektor zatezanja na krivoj S ;

\vec{u}_i -vektor pomeranja;

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

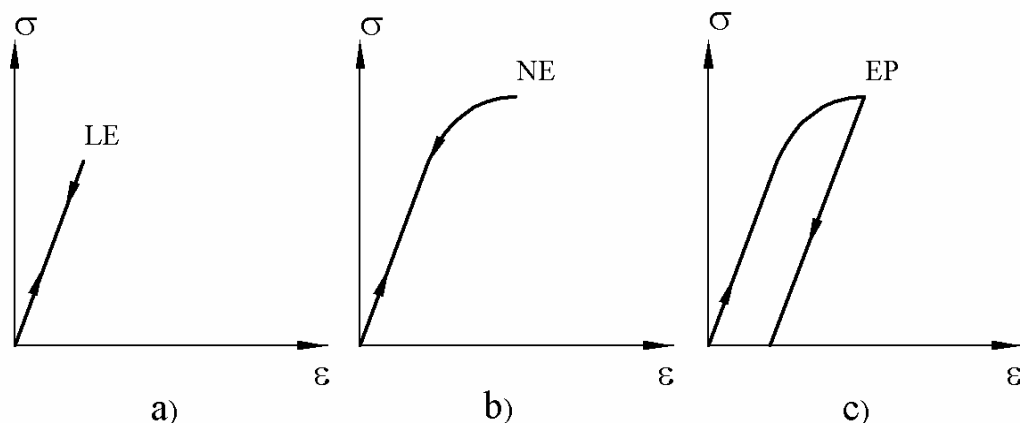
ds -element dužine luka po krivoj S .

S je kontura koja obuhvata vrh prsline i ima početnu i krajnju tačku koje leže na dve površine prsline, sl. 3.13 [25]. Integracija po ovoj konturi se vrši u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu. Rajs je takođe pokazao da je vrednost J -integrala nezavisna od izbora konture integracije [25]. Vektor zatezanja \vec{T}_i predstavlja napon normalan na krivu integracije S . To znači da kada bi putanja integracije bila postavljena po konturi tela, \vec{T}_i bi predstavljao normalne napone koji deluju na toj istoj konturi [16].



Slika 3.13. Kontura integracije konturnog J -integrala [25]

Vrednost J -integrala ekvivalentna je brzini oslobađanja energije kroz konturu oko vrha prsline koja napreduje kroz linearno ili nelinearno-elastičan materijal [16]. Zavisnosti napon-dilatacija pri jednoosnom zatezanju za linearno-elastično, nelinearno-elastično i elastično-plastično ponašanje materijala, date su na sl. 3.14 [16].



Slika 3.14. Zavisnosti σ - ϵ pri jednoosnom zatezanju [16]

za linearno-elastično a), nelinearno-elastično b), i elastično-plastično ponašanje materijala c) [16]

Kako je za linearno-elastičan materijal brzina oslobađanja energije (sila razvoja prsline) definisana izrazom $\mathcal{G} = -\frac{d\Pi}{dA}$, to se i za nelinearno-elastično ponašanje može koristiti uopšteni izraz [13]:

$$J(\equiv \mathcal{G}) = -\frac{d\Pi}{dA} = -\frac{d(U_a - W_p)}{dA} \quad (3.7)$$

gde je Π potencijalna energija sistema, U_a deformaciona energija tela sa prsline, W_p rad spoljašnjih sila, A površina prsline. Grafička interpretacija J -integrala za nelinearno-elastično telo sa prsline je data na sl. 3.15 [16]. U cilju pojednostavljenja, razmatra se ploča konstantne debljine, B , sa prsline dužine, a , pri čemu je zavisnost sila-pomeranje na mestu dejstva sile P - V_p prikazana na sl.3.15 b. Za slučaj kontrole sile pri rastu prsline je:

$$\Pi = U_a - PV_p = -U_a^* \quad (3.8)$$

gde je $U_a^* = \int_0^P V_p dP$ komplementarna deformaciona energija.

Na osnovu jedn. 3.7 dobija se da je [16]:

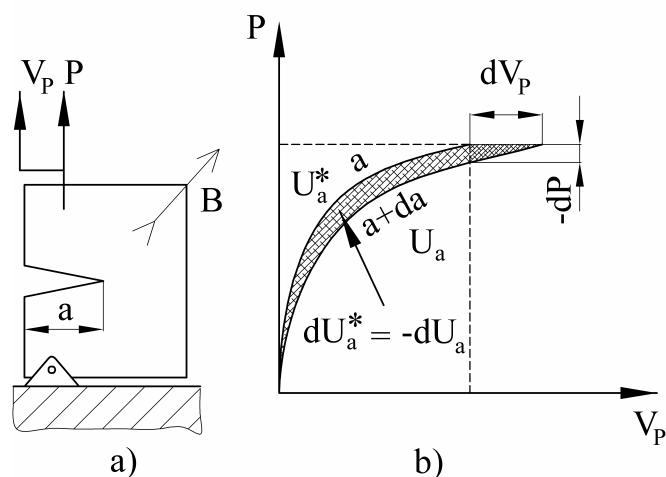
$$J = -\frac{d\Pi}{dA} = \left(\frac{dU_a^*}{Bda} \right)_P \quad (3.9)$$

Za slučaj fiksiranog pomeranja pri rastu prsline je $W_p = 0$ pa je [16]:

$$J = -\frac{d\Pi}{dA} = -\left(\frac{dU_a}{Bda} \right)_{V_p} \quad (3.10)$$

Sa sl. 3.15 se vidi da se dU_a^* razlikuje od $-dU_a$ za iznos $\frac{1}{2}dPdV_p$ što je zanemarljivo malo u odnosu na dU_a . Zbog toga je vrednost J -integrala ista za oba razmatrana slučaja.

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

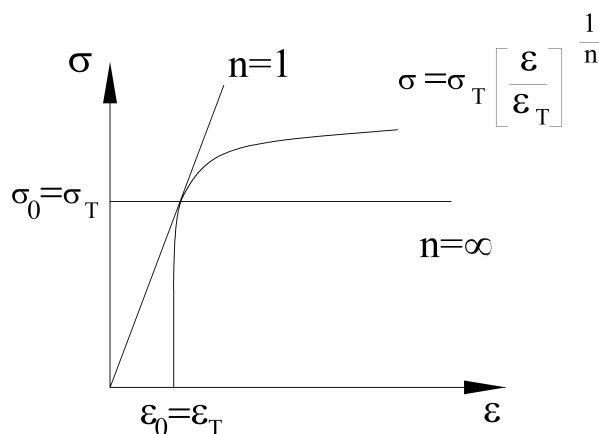


Slika 3.15. Grafička interpretacija J -integrala kao brzine oslobađanja elastične energije za nelinearno-elastično ponašanje tela sa prslinom [16]

J -integral ne predstavlja samo energetski, već i parametar intenziteta napona, koji jednoznačno karakteriše polje napona i deformacija u okolini vrha prsline. Hačinson, Rajs i Rozengrin [16] su pretpostavili da pri jednoosnom zatezanju materijal pokazuje stepenu zavisnost između napona i plastične deformacije. Ako se uključe i elastične deformacije, dobija se Ramberg-Osgudov izraz za jednoosnu deformaciju sl. 3.16 [16]:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.11)$$

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



Slika 3.16. Ramberg-Osgudov model ponašanja materijala koji deformaciono ojačava i za $\sigma_0 = \sigma_T$ [16]

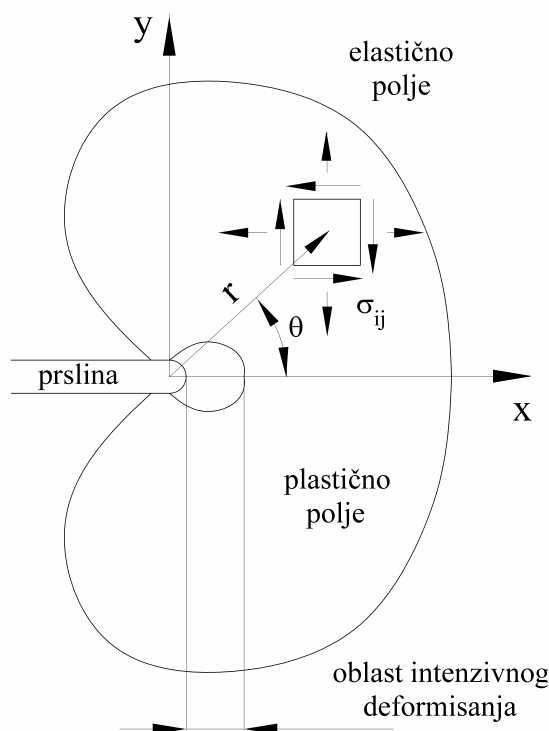
Vrednost referentnog napona može biti proizvoljno odabrana, ali se najčešće usvaja da je to napon tečenja ($\sigma_0 = \sigma_T$, $\varepsilon_0 = \varepsilon_T = \sigma_T / E$). Nezavisnost J -integrala od putanje integracije je očuvana samo u slučaju da proizvod σ i ε u blizini vrha prsline varira sa $1/r$, tj. ako je [16]:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{f(\theta)}{r} \quad (3.12)$$

Na rastojanju veoma bliskom vrhu prsline, znatno unutar plastične zone, elastične deformacije su male u poređenju sa ukupnom deformacijom. Polja napona i deformacija ispred vrha prsline mogu se dati u obliku [16]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(r, \theta, n) &= k_1 \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \\ \varepsilon_{ij}(r, \theta, n) &= k_2 \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

gde su k_1 i k_2 konstante proporcionalnosti koje zavise od karakteristika materijala i naponskog stanja. Za linearno-elastičan materijal je $n = 1$, pa prethodni izraz predviđa singularitet polja napona i deformacija tipa $\frac{1}{\sqrt{r}}$, što je u saglasnosti sa LEML. Raspodela napona i deformacija u okolini vrha prsline, definisana jedn. 3.13 i shematski prikazana na sl. 3.17, za oblik *I* opterećenja i za odgovarajuće konturne uslove se u literaturi naziva Hačinson-Rajs-Rozengrinov (HRR) singularitet [16].



Slika 3.17. Elastično-plastično polje napona u okolini vrha prsline definisano J-integralom [16]

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

3.3.4. Koncept otvaranja vrha prsline

Pored J -integrala, za rešavanje problema EPML, uveden je još jedan parametar, otvaranje vrha prsline δ čije je fizičko značenje prikazano na sl. 3.18. Za prolaznu prslinu u neograničenoj ravnomerno zategnutoj ploči i za RSN je [16]:

$$\delta(= \delta_t) = (\delta_a)_{x=a} = \frac{4 K^2}{\pi E \sigma_T} = \frac{4 G}{\pi \sigma_T} \quad (3.14)$$

pri čemu je usvojen kružni oblik plastične zone veličine r_{1p}^* . Ukoliko se pretpostavi Dagdelov model plastičnog tečenja, otvaranje vrha prsline je [16]:

$$\delta(= \delta_t) = \frac{K^2}{E \sigma_T} = \frac{G}{\sigma_T} \quad (3.15)$$

što je neznatno manje od vrednosti određene jedn. 3.14.

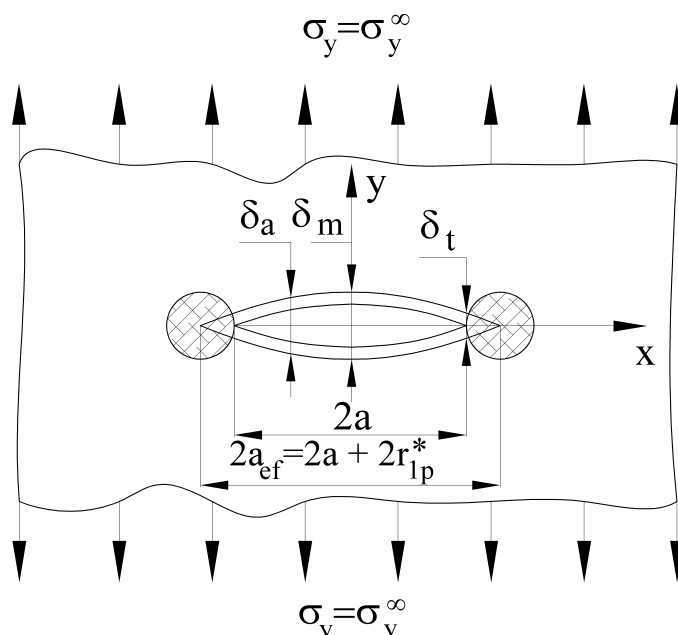
Veza između δ i G odnosno K u oblasti važenja LEML može se napisati u obliku [16]:

$$\delta = \frac{K^2}{m E \sigma_T} = \frac{G}{m \sigma_T} \quad (3.16)$$

gde je m bezdimenzioni faktor u funkciji stanja napona i ponašanja materijala i ima vrednosti između 1,15 (za RSN) i 2,95 (za RSD) [16].

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

$$J = \sigma_T \delta \quad (3.17)$$



Slika 3.18. Efektivno otvaranje prsline δ_a i otvaranje vrha prsline δ_t za ravnomerno zategnutu ploču sa središnjom prolaznom prslinom [16]

3.4. ISPITIVANJA MEHANIKE LOMA

3.4.1. *Primena mehanike loma na upotrebnu spremnost zavarenih spojeva*

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

Prema energetskom kriterijumu Grifita, prsline u nekom telu raste nestabilno ukoliko je sila rasta prsline (brzina oslobađanja energije) veća od otpornosti materijala na rast prsline. U okviru linearno-elastične mehanike loma, sila rasta prsline se identifikuje sa faktorom intenziteta napona:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.18)$$

gde je: Y bezdimenzioni faktor geometrije, σ udaljeni napon, a dužina prsline.

Otpornost materijala na nestabilni rast prsline se u okviru linearno-elastične mehanike loma predstavlja kritičnom vrednošću faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacije, K_{Ic} , odnosno svojstvom materijala nazvanim žilavost loma. Kod homogenih materijala procedura određivanja žilavosti loma u uslovima ravnog stanja deformacije je detaljno i precizno ustanovljena u standardu ASTM E399 [26].

Kada je poznata vrednost žilavosti loma i faktora intenziteta napona može da se definiše uslov za nestabilni rast prsline:

$$K \geq K_{Ic} \quad (3.19)$$

na osnovu koga 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 . Uslov nestabilnog rasta prsline, jedn. 3.19, 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 .

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

- ⇒ veličina otvaranja vrha prsline $CTOD$ (δ), i
- ⇒ konturni J -integral, nezavisan od putanje integracije.

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

Prve predloge standarda za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji 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. Ovi su predlozi prihvaćeni pod naslovom "Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma pri ravnoj deformaciji metalnih materijala" (Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials) kao ASTM E 399-83 [26], odnosno BS 5447. Nešto kasnije je BSI objavio predlog standarda za određivanje otvaranja prsline DD 19 (Standard Test Method for Crack Opening Displacement), usvojen kao BS 5762 [27].

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

- ⇒ ASTM E 813-89: Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja J_{Ic} , mere žilavosti loma) [28].
- ⇒ ASTM E 1152-87: Standard Test Method for Determining $J-R$ Curve (Standardni postupak ispitivanja za određivanje $J-R$ krive) [29].
- ⇒ ASTM E 1290-89: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement ($CTOD$) Fracture Toughness Measurement (Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma merenjem otvaranja vrha prsline ($CTOD$)) [30].
- ⇒ ASTM E 1737-96: Standard Test Method for J -Integral Characterization of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za određivanje žilavosti loma pomoću J -integrala). 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 [31].
- ⇒ ASTM E 1820-99a: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za merenje žilavosti loma). Ovaj standard je objedinio standarde E 399, E 1290 i E 1737 [32].

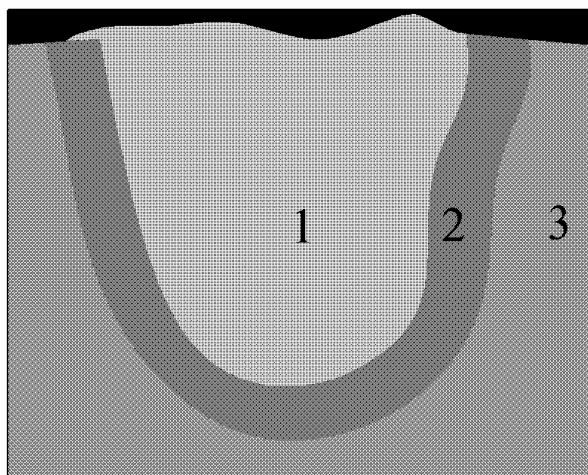
Slični pristup je usvojen i u Britanskim standardima, pa je u BS 7448 "Fracture mechanics toughness tests" [33] definisano ispitivanje žilavosti loma, odnosno u njegovom prvom delu "Methods for determination of K_{Ic} , critical $CTOD$ and critical J values of metallic materials" objedinjeni su postupci 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" [34], koji je objavljen 1997. godine, propisuje se postupak ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva. U razradi su treći deo za određivanje dinamičke žilavosti loma i četvrti deo za određivanje krivih otpornosti.

Tendencija objedinjavanja standarda, zasnovana na istim oblicima epruvete i sličnom postupku ispitivanja, iskazana je i u pristupu koji je prihvaćen u Evropi.

Jugoslovenski standardi (JUS je prevedeno u 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 [35] i SRPS C.A4.084-Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{Ic}) [36].

Ono što je za zavarene spojeve od posebnog značaja, je opšte prihvaćeno mišljenje da je prisustvo prsline i drugih grešaka moguće, pa čak i neizbežno. Odatle i potiče veliki interes da se parametri mehanike loma primene na zavarene spojeve i konstrukcije. Međutim, postoje dva značajna problema u primeni parametara mehanike loma na analizu ponašanja zavarenih spojeva [37]:

- ⇒ ograničena mogućnost otkrivanja grešaka u pogledu njihove veličine i položaja, i
- ⇒ heterogenost mikrostrukture, sl. 3.19, i mehaničkih osobina zavarenog spoja.



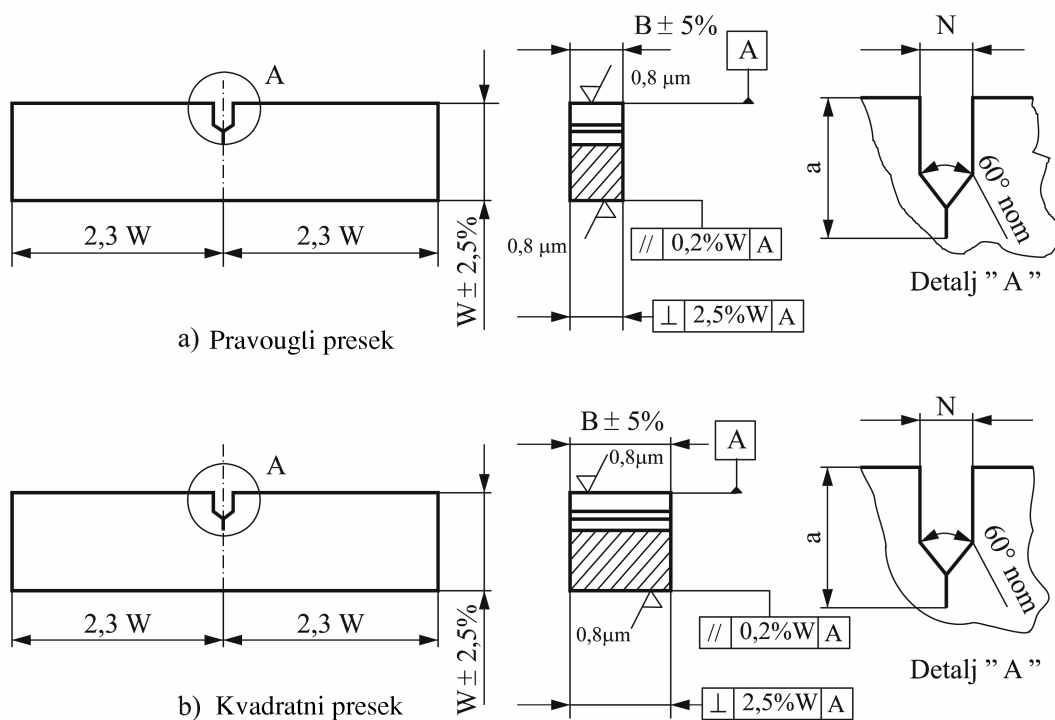
Slika 3.19. Makroskopski izgled zavarenog spoja [38]
1-MŠ, 2-ZUT, 3-OM

Prema tome, procena sigurnosti zavarenih spojeva nije dovoljno pouzdana, jer nema dovoljno podataka o greškama, a nije izvesno kako će se prslina razvijati prolazeći kroz različite strukture zavarenog spoja. Zbog toga je jedan od značajnih problema u ispitivanju uzoraka sa prslinom iz zavarenog spoja lokacija vrha prsline [38, 39].

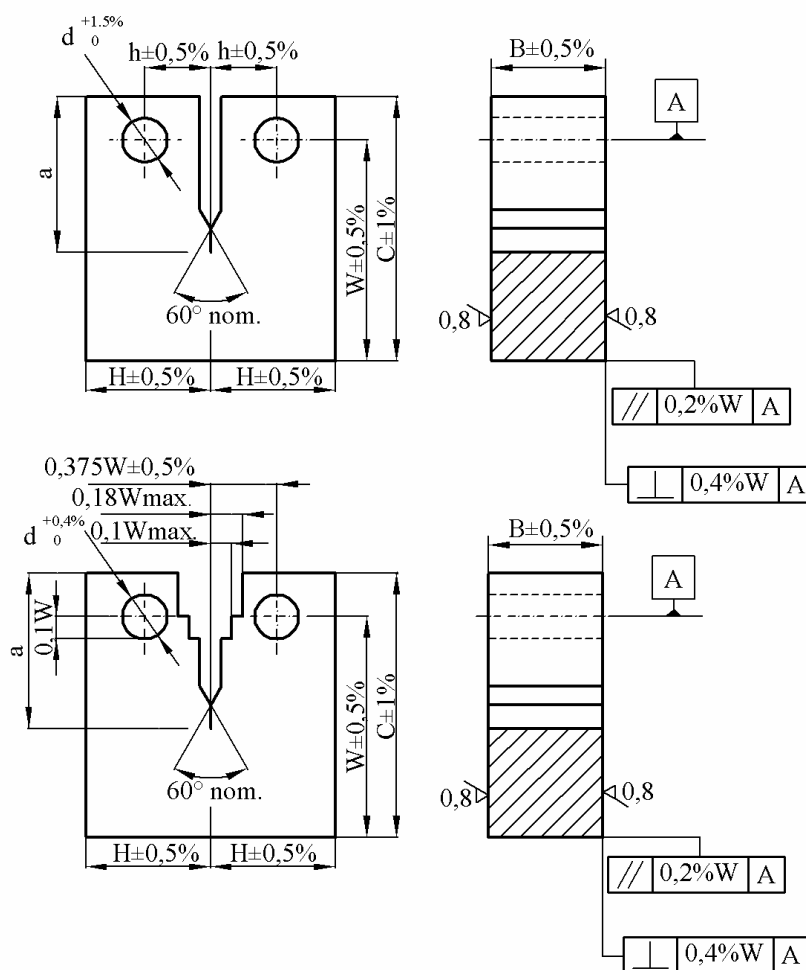
S obzirom na različite mehaničke osobine, jasno je da će uslovi rasta prsline, čiji je vrh u različitim oblastima zavarenog spoja, biti različiti. Ove teškoće nisu prepreka eksperimentalnom određivanju žilavosti loma u kritičnim zonama zavarenog spoja ili zavarenog spoja kao celine, ali se teškoće pojavljuju prilikom tumačenja izmerenih vrednosti [39, 63].

Da bi se dobila što potpunija slika o primeni ispitivanja mehanike loma na zavarene spojeve potrebno je opisati epruvete i ukazati na greške i odstupanja koja su pri tom moguća. Pre svega, predviđeno je da se epruvete mehanike loma ispituju zatezanjem ili savijanjem. Među brojnim oblicima koji su u različitim istraživanjima korišćeni, najširu primenu su našle epruvete za savijanje u tri tačke, sl. 3.20, i kompaktne epruvete za zatezanje, sl. 3.21 [26, 33]. Epruveta za savijanje u tri tačke (savijanje silom) se pokazala veoma prikladnom za praksu, pa se primenjuje u ispitivanjima sva tri navedena parametra mehanike loma (K_{Ic} , δ , J). Kompaktna epruveta za zatezanje omogućava značajnu uštedu materijala u poređenju sa drugim oblicima epruveta, kao i srazmerno manju silu za ispitivanje.

Ispitivanje epruveta sa prslinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline dovoljno homogenog materijala epruvete, tako da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno preneti na odgovarajuću konstrukciju. Imajući u vidu heterogenu strukturu sa sl. 3.19, ovakav postupak ispitivanja nije dovoljno pouzdan, jer vrh prsline pri razvoju loma može da prolazi kroz područja različitih struktura i mehaničkih osobina zavarenog spoja. Zbog toga je potrebna analiza zavarenog spoja sa aspekta primene mehanike loma.

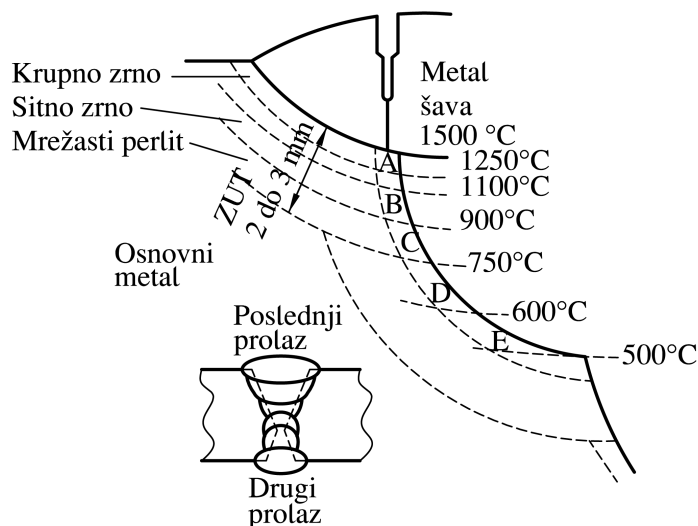


Slika 3.20. Epruveta za savijanje u tri tačke [26, 33]



Slika 3.21. Kompaktna epruveta za zatezanje [26, 33]

Složenost u mikrostrukturnom i geometrijskom pogledu pri određivanju žilavosti loma i drugih mehaničkih osobina u ZUT ilustruje sl. 3.22, na kojoj je prikazan niskolegirani, termomehanički obrađeni čelik povišene čvrstoće u višeprolaznom šavu. Po pravilu, kod spojeva ovih čelika se u ZUT pod dejstvom ponovljenih termičkih ciklusa i plastičnih deformacija, u uzanom pojasu ZUT uz liniju stapanja pojavljuju mesta smanjene žilavosti loma (naznačena mesta A i E na sl. 3.22) [40].



Slika 3.22. Presek kroz ZUT šava niskolegirano čelika povišene čvrstoće [40]

Kada je u pitanju preporuka da se pri direktnom određivanju žilavosti loma u kritičnoj zoni spoja uzme najniža izmerena vrednost, sl. 3.22 ilustruje niz teškoća sa kojima je ovakvo određivanje skopčano. Kada je, kao kod čelika, ZUT kritično područje u kome se najčešće pojavljuju prsline, njegova veličina od 2-3mm u osnovnom metalu uz liniju stapanja ukazuje na eksperimentalne teškoće postavljanja vrha početne zamorne prsline na kritično mesto. Praktična istraživačka iskustva pokazuju da je i uz najbrižljiviji rad potrebno ispitati desetine uzoraka da bi se uspešno locirao vrh prsline u milimetarski uzana kritična područja i pouzdano odredile stvarne minimalne vrednosti žilavosti loma u ZUT, što drugim rečima ograničava stepen iskorišćenja na najviše 10-20% ispitanih uzoraka [41].

Sledeća teškoća u određivanju žilavosti loma je trag rasta zamorne prsline, čiji je vrh lociran u ZUT (područje A na sl. 3.22), jer ona će prodirati u područja ZUT različitih mikrostrukturnih i mehaničkih karakteristika. Različite karakteristike u odnosu na ravan rasta prsline rezultiraju u asimetričnom formiranju plastične zone ispred vrha prsline. Imajući još u vidu da stvarne vrednosti nekih mehaničkih osobina, npr. napona tečenja, ne mogu direktno da se odrede za usko krto područje A i E u ZUT, očigledno je da su narušeni uslovi za određivanje vrednosti parametara mehanike loma po postupcima za homogene materijale.

Zbog opisanih ograničenja različite metode mehanike loma nisu podjednako primenljive za određivanje najniže vrednosti žilavosti loma u zavarenom spoju. Ako se ima u vidu da je problem postavljanja vrha zamorne prsline na kritično mesto u ZUT zajednički za sve metode, onda bi kriterijum za ocenu primenljivosti pojedinih metoda mogao da bude njihova sposobnost da mere žilavost loma neposredno ispred vrha prsline, nezavisno od uticaja materijala na većim rastojanjima od tzv. procesne zone na vrhu prsline. U tom pogledu je K_{Ic} , kao linearno-elastični pokazatelj žilavosti loma, u prednosti, jer su uslovi ograničene plastične zone pri njegovom određivanju oštriji nego kod elasto-plastičnih pokazatelja. U realnim situacijama, pri ispitivanju šavova, ovi oštri uslovi retko mogu da se ispune, zato što

je u pitanju najčešće čelik relativno visoke žilavosti loma. Kontrola veličine plastične zone povećanjem dimenzija uzorka je teško ostvarljiva, prvo zato što bi kod mekših čelika debljina uzorka bila višestruko veća od debljine konstrukcijskih elemenata, a zatim što se kod uzoraka isečenih iz šavova sa povećanjem dimenzija dodatno komplikuje postavljanje vrha prsline u kritičnu zonu.

Kako je napred rečeno, heterogenost strukture i mehaničkih osobina zavarenih spojeva uslođjava problem, pre svega u zavisnosti od položaja vrha zamorne prsline i osobina područja kroz koja se lom razvija. Ali, ako se zavareni spoj tretira kao konstrukcijska celina, onda je od interesa odrediti podatke za najslabije mesto kada je u pitanju lokalno ispitivanje, kakvo je određivanje parametara mehanike loma. Takođe je jasno da pri određivanju zateznih karakteristika, naročito zatezne čvrstoće, podatak za zavareni spoj kao celinu mora da se prihvati kao merodavniji za zavarenu konstrukciju nego pojedinačni rezultat bilo za metal šava ili za osnovni metal.

Veliki broj različitih proba zavarljivosti ukazuje na to da je problemu prsline u zavarenim spojevima uvek poklanjana posebna pažnja. Ispitivanjem bez razaranja mogu se otkriti različite greške, ali u mnogim slučajevima se donosi odluka da se one ostave. To znači da zavareni spoj može imati greške i prsline koje nisu otkrivene i one, koje su otkrivene, ali nisu otklonjene. Lako je zaključiti da je u tom slučaju ocena lokalnog ponašanja područja zavarenog spoja u blizini greške bar isto toliko važna kao i ocena globalnog ponašanja spoja. Iako ispitivanje epruveta sa V-zarezom na klatnu (Šarpi) daje dragocene podatke o lokalnom ponašanju područja vrha zareza, ti podaci ne mogu u potpunosti da objasne uslove nastanka ili rasta prsline.

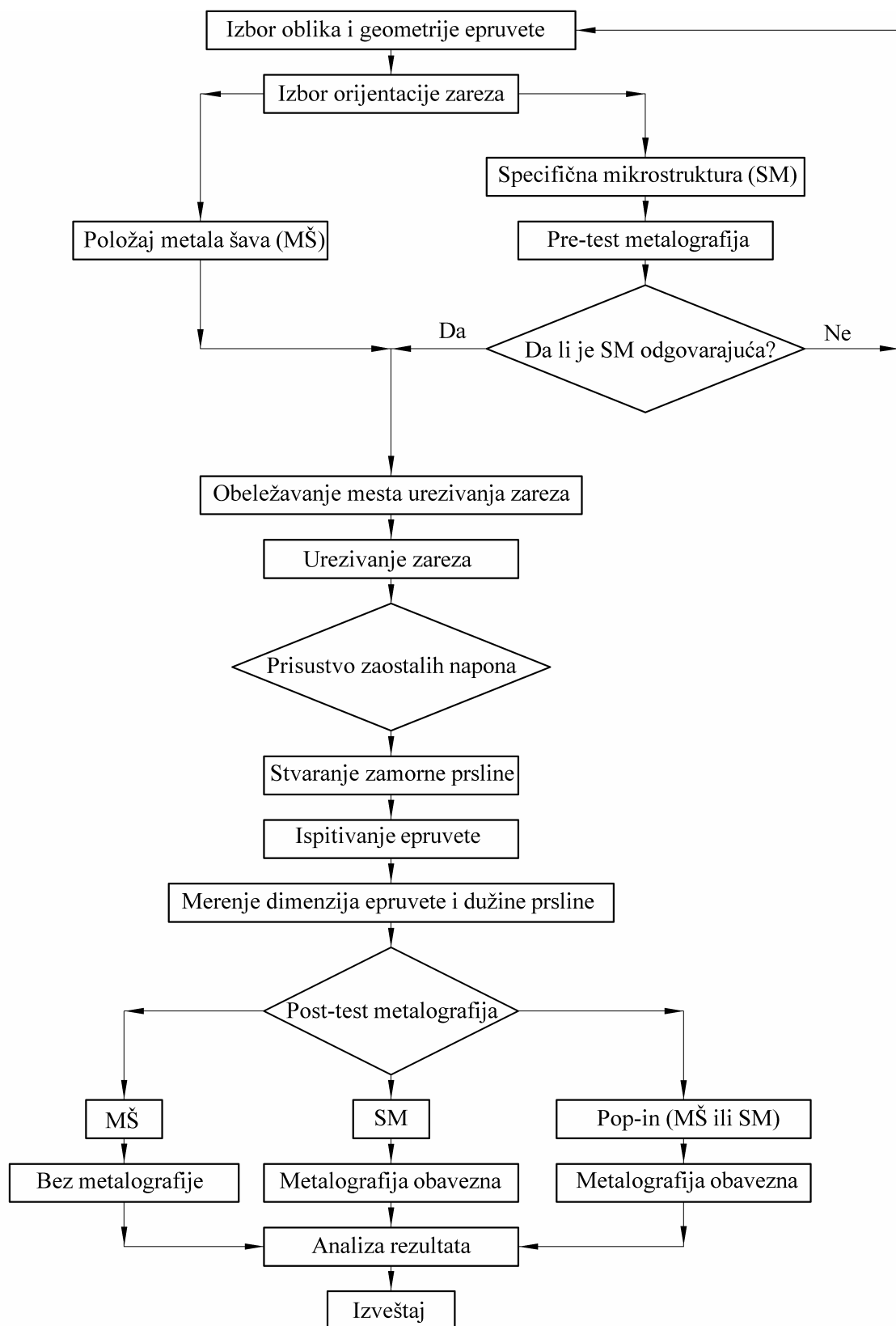
Veliki interes za primenu ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva je već u početku naišao na ograničenja što se tiče cene ispitivanja i broja epruveta koje treba ispitati. Pre svega, prema već navedenoj analizi treba ispitati bar 10 epruveta mehanike loma da bi se odredio neki od parametara mehanike loma zavarenog spoja. Ovako skupa ispitivanja će u mnogim slučajevima biti ekonomski opravdana ako doprinose sigurnosti konstrukcije ili povećanju veka, imajući pri tom u vidu da se više od polovine ukupno proizvedenog čelika u svetu ugrađuje u zavarene konstrukcije [42]. Treba imati u vidu da ispitivanja mehanike loma podrazumevaju poznavanje mehaničkih osobina. Kada su u pitanju zavareni spojevi često nedostaje pouzdan podatak o veličini napona tečenja, koji je prema standardima za ispitivanje parametara mehanike loma jedan od osnovnih uporednih parametara mehaničkih osobina.

I pored svih teškoća i nedoumica, primena mehanike loma na ispitivanje zavarenih spojeva je sve šira. Razlog je, pre svega, u boljem i potpunijem razumevanju ponašanja zavarenog spoja sa prslinom na osnovu analize podataka dobijenih u tim ispitivanjima. Standard BS 7448 [33, 34] predviđa primenu sva tri parametra (K_{Ic} , $CTOD$, J -integral) za karakterizaciju otpornosti zavarenog spoja prema nastajanju i rastu prsline i propisuje slučajeve u kojima je svaki od njih merodavan. Uprošćena procedura postupka ispitivanja prema standardu BS 7448, deo 2, data je shematski na sl. 3.23.

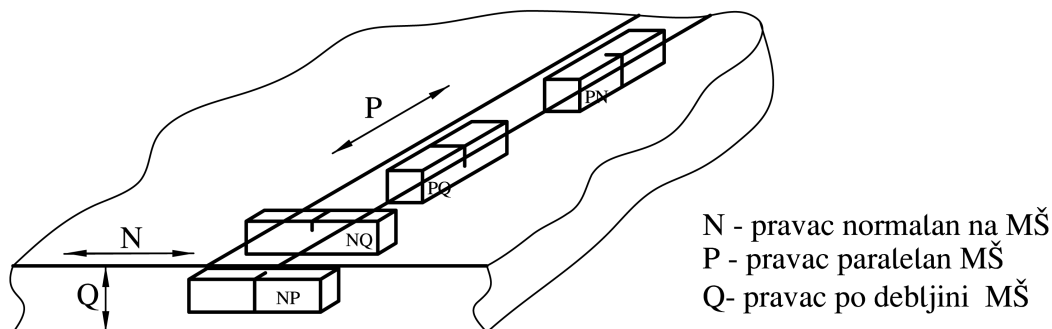
U pogledu položaja zareza i zamorne prsline, standard ide dalje i definiše različite varijante za sučeoni 'X' i 'K' šav, kao i jednoprolazni šav. Zahtevi za položaj prsline su:

- ⇒ zarez treba postaviti tako da ravan zamorne prsline bude paralelna sa uzdužnom osom zavarenog spoja;
- ⇒ vrh prsline treba da se većom dužinom nalazi u oblasti koja se ispituje, da ne bi došlo do lokalnih oštećenja u maloj zapremini materijala, i
- ⇒ zarez se postavlja u metal šava, u liniju stapanja ili u zonu uticaja toplote.

Za utvrđivanje pogodnosti izbora dodatnog materijala ispituje se metal šava. Shema vađenja epruveta sa zarezom i zamornom prslinom u metalu šava je data na sl. 3.24 [34].



Slika 3.23. Shematski prikaz procedura ispitivanja mehanike loma kod zavarenih spojeva prema BS 7448-deo 2 [34, 63]


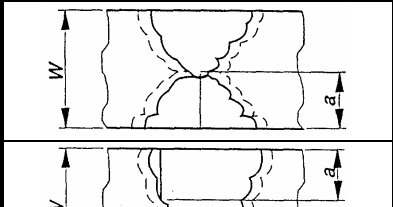
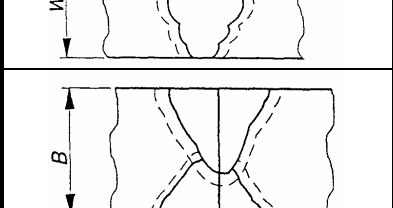
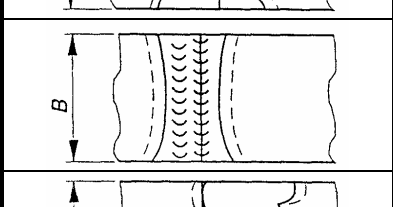
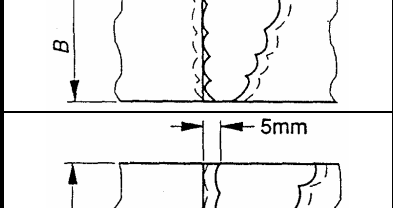
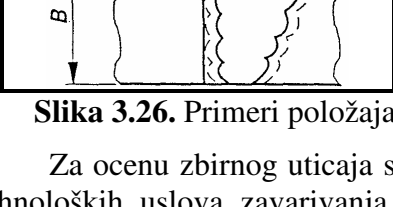
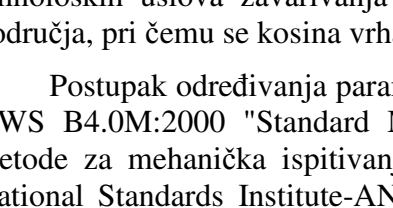


Slika 3.24. Način vađenja epruveta i položaj prsline pri ispitivanju metala šava [34]

Epruvete za određivanje parametara mehanike loma se izrađuju iz pridruženih probi, izrađenih na isti način kao i stvarni proizvod. Za ploče manje debljine od 50mm koriste se epruvete pune debljine. Otpornost prema razvoju prsline u metalu šava i zoni uticaja toplote ispituje se na epruvetama sa zarezom i zamornom prslinom, što je shematski prikazano na sl. 3.25 i sl. 3.26 [34].

Šema položaja zareza	Pravac	Geometrija epruvete	Mesto zareza
	NP	B x B ili B x 2B	MŠ-duž centralne linije
	NQ	B x B	MŠ-iz korena duž centralne linije
	NP	B x B ili B x 2B	ZUT-zarez u liniji stapanja na polovini debljine
	NP	B x B ili B x 2B	ZUT-zarez u liniji stapanja na četvrtini debljine
	PQ	B x B	Poprečno u MŠ
	PN	B x B	Poprečno u MŠ duž centralne linije

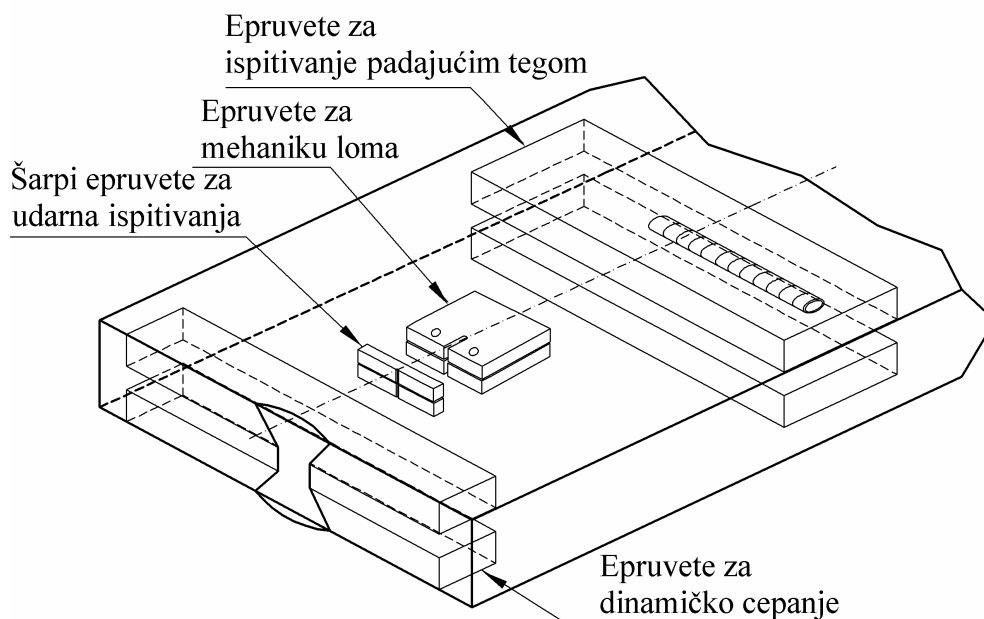
Slika 3.25. Položaj zareza u epruvetama mehanike loma za ispitivanje zavarenog spoja [34]

Šema položaja zarez	Pravac	Geometrija epruvete	Mesto zarez
	NQ	B x B	Upravno na MŠ duž centralne linije
	NQ	B x B	U prvom zavaru korena MŠ
	NQ	B x B	Krupnozrna struktura ZUT uz MŠ
	NP	B x B ili B x 2B	Kroz najveću zapreminu MŠ duž spoja
	NP	B x B ili B x 2B	Upravno na najveću zapreminu MŠ
	NP	B x B ili B x 2B za uzorke deblje od 50mm	Najmanje 15% čela prsline u krupnozrnoj strukturi ZUT
	NP	B x B ili B x 2B	ZUT-5mm od linije stapanja

Slika 3.26. Primeri položaja zarez u specifičnim strukturama zavarenog spoja [34]

Za ocenu zbirnog uticaja svih područja zavarenog spoja (MŠ, linija stapanja i ZUT) i tehnoloških uslova zavarivanja zarez se postavlja tako da obuhvata usku traku sva tri područja, pri čemu se kosina vrha ostvaruje na dubini 1,5-2,5mm.

Postupak određivanja parametara žilavosti loma zavarenih spojeva je dat i u standardu AWS B4.0M:2000 "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds" (Standardne metode za mehanička ispitivanja zavarenog spoja) koji je zajedničko izdanje American National Standards Institute-ANSI, American Society for Testing and Materials-ASTM i American Petroleum Institute-API [43]. Ovaj standard predviđa ispitivanje epruveta sa zarezom u MŠ i ZUT, sl. 3.27.



Slika 3.27. Shema vađenja uzoraka za ispitivanja žilavosti loma prema standardu AWS B4.0M:2000 [43]

3.4.2. Analiza zamora sa stanovišta mehanike loma

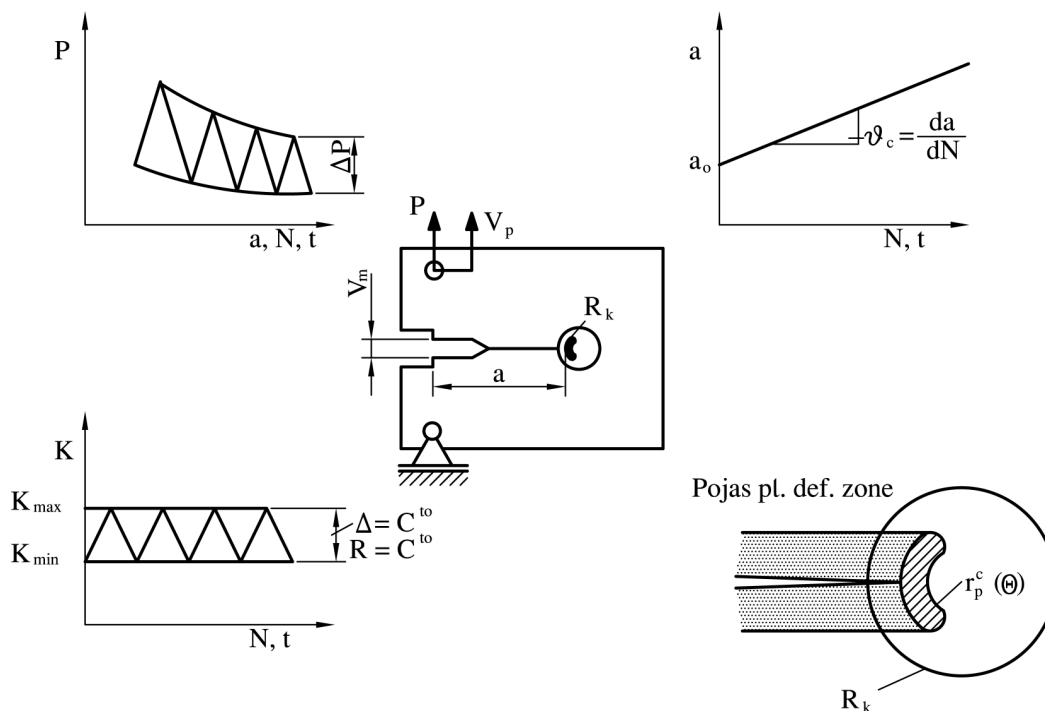
Rast prsline pod uticajem promenljivih opterećenja koja su manja od opterećenja kvazistatičkog loma naziva se zamor materijala. Najveći broj oštećenja i ispada iz pogona delova i konstrukcija tokom eksploatacije se događa kao posledica zamora. U nizu situacija oštećenja se mogu pripisati stanju materijala, ali su mnoga oštećenja posledica loših konstrukcijskih rešenja, a najčešće loših zavarenih spojeva [44]. To znači da sklonost ka zamoru dela mašine ili konstrukcije ili zavarenog spoja, ne zavisi samo od izdržljivosti na zamor materijala od kojeg je deo izrađen već i od njegove geometrije. Prema tome, 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 metalima i razni oblici koncentratora naprezanja (zarezi, žlebovi, otvori, zavareni i mehanički spojevi) u elementima se ne mogu izbeći. Zbog toga se period do iniciranja zamorne prsline N_i , 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 dela mašine ili konstrukcije. Mogućnost za ovu procenu pružaju postavke linearno-elastične mehanike loma.

3.4.2.1 Koncept linearno-elastične mehanike loma (LEML)

Koncept LEML se može primeniti i za određivanje rasta prsline pri zamoru [45]. Teorijska 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 . Za slučaj stacionarne prsline to znači da će do loma dve različite konfiguracije od istog materijala doći pri istoj, kritičnoj, vrednosti K -faktora, K_c . Pod određenim uslovima se K -faktor može primeniti i za opisivanje rasta prsline usled zamora.

Kao primer će se razmotriti rast prsline pri konstantnoj vrednosti opsega K -faktora, ΔK , kao na sl. 3.28. Ovaj tip opterećenja je samo akademskog 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 3.28. Načelno linearni rast prsline a - N , t pri konstantnom opsegu $\Delta K = \text{const.}$ i uslovima ograničenog tečenje $r_p^c \ll R_k$ [46]

Kako 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. 3.28). Ukoliko je plastična zona $r_p^c(\theta)$ istovremeno i unutar K -dominantne zone singulariteta R_k , ispunjen je uslov male zone tečenja $r_p^c(\theta) < R_k$ pa vrednost K -faktora za razmatrani ciklus zamora na jedinstven način opisuje polje napona na vrhu tekuće prsline. Sledi da se brzina rasta prsline da/dN može izraziti u obliku:

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, R) \quad (3.20)$$

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

Kako 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. Ukoliko pak 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:

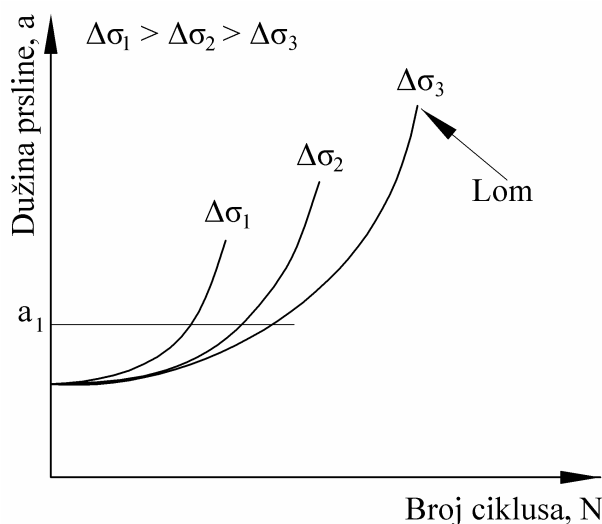
$$\frac{da}{dN} = f_2(\Delta K, R, \chi) \quad (3.21)$$

Teba naglasiti da uticaj različitih opterećenja na rast prsline da/dN isključuje primenljivost koncepta sličnog ponašanja. Naime, 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.

Rast prsline pri zamoru je veoma složen proces koji zavisi od niza promenljivih kao što su:

- ⇒ intenzitet efektivnog polja napona na vrhu prsline definisan K -faktorom;
- ⇒ tip i oblik opterećenja;
- ⇒ radna sredina (agresivnost, temperatura, vlažnost), i
- ⇒ mehaničke i metalurške karakteristike metala.

Potreba da se mehanika loma uvede u proučavanje zamornog ponašanja proistekla je iz analize rasta prsline pri cikličnom opterećenju. Na sl. 3.29 je prikazana promena dužine prsline, a , sa brojem ciklsa, 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 3.29. Zavisnost dužine zamorne prsline od broja ciklusa [47]

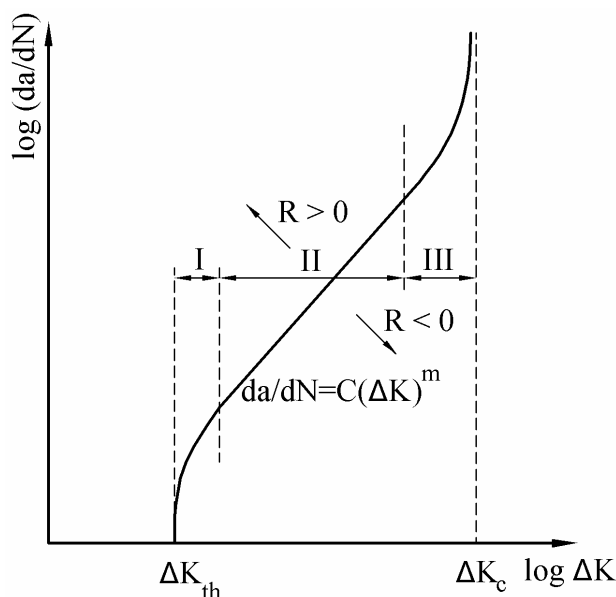
Uočljivo je da se sa povećanjem broja ciklusa N i dužine prsline a brzina rasta prsline definisana nagibom tangente, stalno raste. Takođe sa povećanjem opsega napona $\Delta\sigma$ dolazi i do bržeg povećanja gradijenta brzine. Drugim rečima prsline na primer dužine a_1 na sl. 3.29 brže raste pri amplitudi napona $\Delta\sigma_1$ 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:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{min}) (\pi a)^{1/2} = Y\Delta\sigma (\pi a)^{1/2} \quad (3.22)$$

bili su Paris i saradnici [45, 46]. Ukoliko je pri tome $\sigma_{min} < 0$ usvaja se da je $K_{min} = 0$ jer K -faktor ne egzistira za napone na pritisak.

Brzine rasta prsline da/dN u funkciji od ΔK se određuju sa odgovarajuće krive $a-N$, t grafičkim ili numeričkim postupkom. Eksperimentalni rezultati predstavljeni na dvostruko-logaritamskoj skali najčešće imaju karakterističan S -oblik, shematski prikazan na sl. 3.30 [45].



Slika 3.30. Načelni oblik promene brzine rasta $da/dN = f(\Delta K)$ za $R = 0$ i pravci pomeranja S-krive za odnose $R \neq 0$ [45]

Sa stanovišta 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} [48]. Ispod ΔK_{th} zamorne prsline 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 [45] opisali stepenom funkcijom oblika:

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

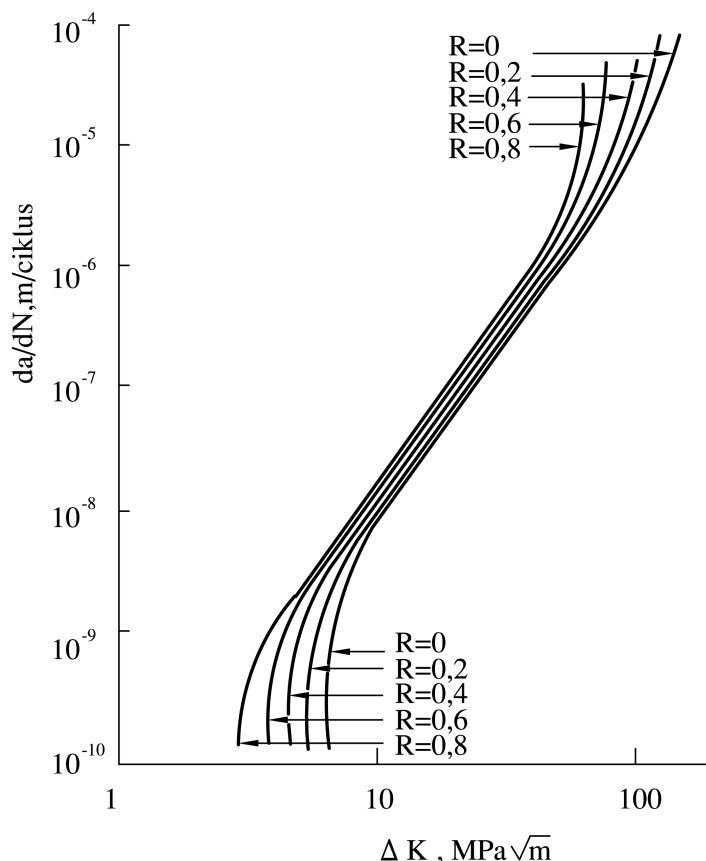
U okviru oblasti *III* dolazi do naglog rasta prsline pre konačnog loma. Ta prividna nestabilnost je povezana sa približavanjem maksimalne vrednosti K -faktora, K_{max} , kritičnoj vrednosti žilavosti loma K_{Ic} , za dati materijal, što je povezano sa ranom fazom krtog loma. Ova mogućnost je izražena 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} .

Primena Parisove jednačine se pokazala naročito plodonosnom u području zamora metala šava i zavarenih konstrukcija. Za razliku od homogenih materijala i od njih izrađenih delova, kod kojih broj ciklusa potreban za stvaranje zamorne prsline dominantno učestvuje u ukupnom broju ciklusa do loma, kod šavova je ubrzo nakon formulisanja Parisove jednačine zapaženo da je ukupan broj ciklusa do loma uglavnom određen rastom zamorne prsline. Provere koje su usledile su potvrdile, da broj ciklusa potreban za inicijaciju prsline kod raznih vrsta šavova i materijala ne prelazi 25% od ukupnog broja ciklusa do loma [48]. Razlog za ovo leži u geometrijskoj nehomogenosti šavova i u postojanju, posebno na prelazu između nadvišenja i osnovnog metala, dovoljno sitnih površinskih neravnina u vidu intruzija ili uključaka troske dubine ne veće od 0,02-0,04mm, na kojima zbog koncentracije napona dolazi do brzog stvaranja početne zamorne prsline [48].

Na osnovu dosadašnje analize uticajnih faktora na rast zamorne prsline vidi se da pored opsega ΔK , kao najuticajnijeg, na brzinu rasta prsline utiču mnogi mehanički, geometrijski i metalurški faktori i osobine sredine. Zato 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 teorijskih modela za predviđanje brzine rasta prsline [49, 50, 51], ali je karakteristično da svaki od njih zadovoljava u određenoj oblasti ΔK i za određene metale i uslove ispitivanja.

Parisova jednačina predstavljena izrazom 3.23, gde su C i m konstante materijala, važi samo u II oblasti rasta prsline (sl. 3.30), i samo za jednu vrednost odnosa $R = K_{max}/K_{min}$. Kako su linije brzine rasta prsline u oblasti II za različite vrednosti R približno paralelne (sl. 3.31), to će i vrednosti koeficijenta m biti iste, ali će se razlikovati koeficijenti C , jer oni zavise od odnosa R .



Slika 3.31. Uticaj odnosa napona R na dijagram rasta prsline [52]

Ta zavisnost se može na jednostavan način prikazati u obliku:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_v}{(1-R)^{n_v}} (\Delta K)^{m_R} \quad (3.24)$$

gde su koeficijenti C_v i n_v utvrđeni za odnos $R = 0$.

Jednačinu 3.24 je, zamenom:

$$K_{max}^{n_v} = \left[\frac{\Delta K}{(1-R)} \right]^{n_v} \quad (3.25)$$

modifikovao Vaker [49] u obliku:

$$\frac{da}{dN} = C_v \cdot \Delta K^{m_R - n_v} \cdot K_{max}^{n_v} = C_v \cdot \Delta K^{m_v} \cdot K_{max}^{n_v} \quad (3.26)$$

gde je $m_v = m_R - n_v$

Forman sa saradnicima [50] je predložio izraz:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_F (\Delta K)^{m_F}}{(1-R) \cdot K_{Ic} - \Delta K} = \frac{C_F (\Delta K)^{m_F-1} K_{max}}{K_{Ic} - K_{max}} \quad (3.27)$$

koji pored odnosa R , uključuje i uticaj brzog loma kada se K_{max} , približava žilavosti loma K_{Ic} . Ovakvo ponašanje je izraženo kod metala visoke čvrstoće, a niske žilavosti loma, gde veličine epruveta za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline omogućavaju linearno-elastično ponašanje i pri nivoima K -faktora bliskim K_{Ic} .

Klesnil i Lukas [51] su uključili uticaj odnosa R na ponašanje rasta prsline blizu praga ΔK_{th} (oblast I). Taj empirijski model, koji važi i za oblast II ima oblik:

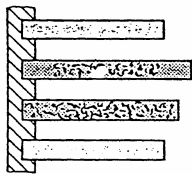
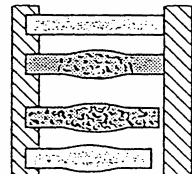
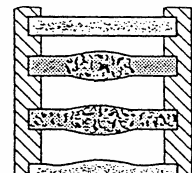
$$\frac{da}{dN} = C_K \left[\frac{(\Delta K)^{m_K}}{(1-R)^\gamma} - \Delta K_{th}^{m_K} \right] \quad (3.28)$$

gde su C_K i m_K konstante materijala, a γ konstanta koja zavisi od sistema materijal-sredina.

4. NAPONI I DEFORMACIJE KOD ZAVARENIH SPOJEVA

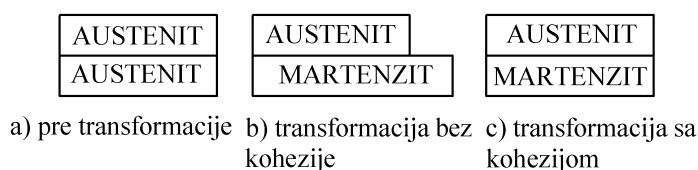
Naponi i deformacije u zavarenom spoju javljaju se zbog toplotnog ciklusa zagrevanje-hlađenje, bilo kao neposredna posledica neravnomernog termičkog širenja i skupljanja (različit temperaturni gradijent), bilo da je uticaj posredan, preko strukturnih promena (npr. transformacija austenita u martenzit). Naponi koji u zavarenom spoju ostaju posle njegovog hlađenja zovu se **zaostali naponi** i spadaju u **sopstvene** (unutrašnje) napone jer nisu izazvani spoljnim opterećenjem. Prema uzroku nastanka, zaostali naponi se dele na **termičke** (različit temperaturni gradijent) i **strukturne** (transformacije tipa martenzitne), a u svakom slučaju su **samouravnotežavajući**. Osim zaostalih napona, u sopstvene napone spadaju još i **reaktivni naponi**, koji nastaju pri zavarivanju uklještenih, odnosno ukrućenih delova. Reaktivni naponi se razlikuju od ostalih sopstvenih napona po tome što mogu da nestanu ako se uklještenje (ukrućenje) ukloni. Dejstvo termičkog ciklusa zagrevanje-hlađenje može najjednostavnije da se prikaže na primeru predmeta oblika štapa, pri različitim uslovima uklještenja, tab. 4.1 [64].

Tabela 4.1. Deformacije i naponi u štapu tokom ciklusa zagrevanje-hlađenje [64]

Vrsta uklještenja	Ponašanje štapa	Faza termičkog ciklusa	Deformacija	Napon
slobodno širenje, slobodno skupljanje		sobna temperatura zagrevanje hlađenje sobna temperatura	početno stanje izduženje skraćenje početno stanje	ne postoji ne postoji ne postoji ne postoji
sprečeno širenje, slobodno skupljanje		sobna temperatura zagrevanje hlađenje sobna temperatura	početno stanje sprečeno izduženje skraćenje skraćenje	ne postoji pritisni ne postoji ne postoji
sprečeno širenje, sprečeno skupljanje		sobna temperatura zagrevanje hlađenje sobna temperatura	početno stanje sprečeno izduženje sprečeno skraćenje početno stanje	ne postoji pritisni zatezni maksimalni zatezni

Zaostali naponi će nastati ukoliko se susedni slojevi nekog materijala različito zagrevaju i hlade, bilo da je uzrok tome različit temperaturni gradijent (termički naponi),

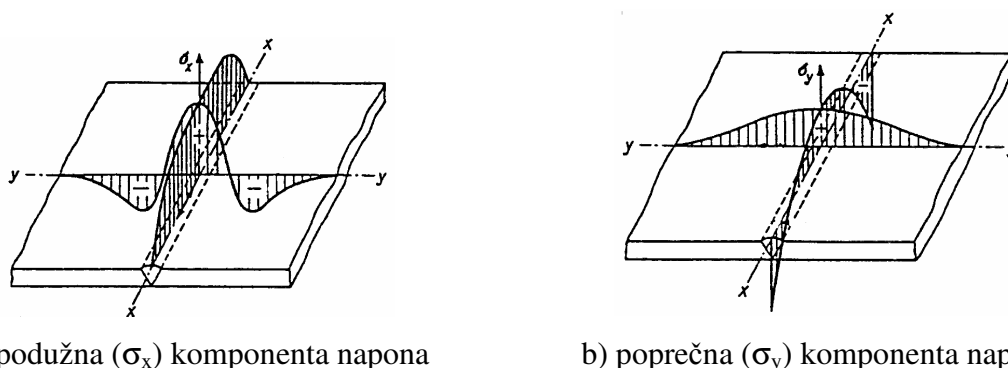
bilo da su u pitanju slojevi različitih materijala, ili istog materijala, ali različite strukture i svojstava (strukturni naponi). Uzrok nastanka strukturnih napona je objašnjen na sl. 4.1 [64], gde je ponašanje zakaljivog čelika prikazano modelom dva austenitna vlakna u neposrednom kontaktu, od kojih se gornje vlakno ne transformiše, a donje vlakno se na relativno niskim temperaturama transformiše u martenzit. Da nema kohezije između vlakana, koja su pre transformacije bila iste dužine (sl. 4.1 a), vlakno koje se transformiše iz austenita u martenzit bi se izdužilo, dok bi austenitno vlakno bilo nepromenjeno (sl. 4.1 b). Kako u stvarnom materijalu kohezija između susednih slojeva postoji, to će stvarno izduženje martenzitnog vlakna biti manje od izduženja prikazanog na sl. 4.1 b, a austenitno vlakno će se izdužiti za istu veličinu (sl. 4.1 c). Ove razlike u izduženjima izazivaju zatezne napone u austenitnom vlaknu, odnosno pritisne napone u martenzitnom vlaknu. Treba imati u vidu da strukturni naponi nastaju i usled ravnotežne transformacije $\gamma\text{-Fe}$ u $\alpha\text{-Fe}$, ali nestaju pri hlađenju jer napon tečenja čelika na uobičajenim temperaturama za ovu transformaciju praktično ne postoji.



Slika 4.1. Sopstveni naponi pri zagrevanju kod čelika sa martenzitnom transformacijom [64]

4.1. SOPSTVENI NAPONI U ZAVARENOM SPOJU

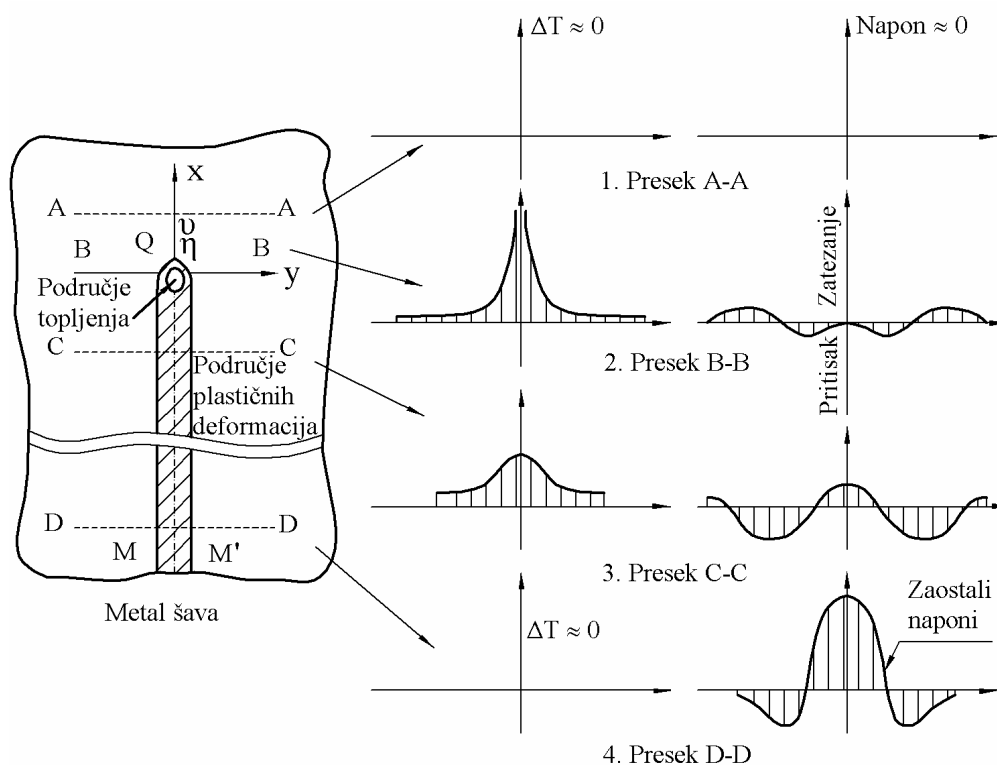
Raspodela podužnih i poprečnih termičkih zaostalih napona je prikazana na sl. 4.2 [64] u dve ravni, poprečnoj ($y = 0$) i podužnoj ($x = 0$). Raspodela termičkih zaostalih napona može da se objasni neravnomernim i ometenim širenjem i skupljanjem zavarenog spoja pri zagrevanju i hlađenju. Na primer, kod poprečnih napona u poprečnom preseku (σ_y , sl. 4.2) tokom zagrevanja metal šava i deo osnovnog metala do njega teže da se šire, ali ih u tome sprečava okolni osnovni metal, koji nije zagrejan. Suprotno tome, tokom hlađenja, metal šava i deo osnovnog metala do njega teže da se skupe, u čemu ih opet sprečava okolni osnovni metal. Posledica toga su zaostali zatezni naponi u metalu šava i delu osnovnog metala u okolini šava.



Slika 4.2. Raspodela termičkih zaostalih napona u podužnom ($y = 0$) i poprečnom ($x = 0$) pravcu [64]

Detaljnije objašnjenje termičkih zaostalih napona je dato na sl. 4.3 [64], gde su pomoću četiri karakteristična preseka ($A-A$, $B-B$, $C-C$ i $D-D$) prikazane prostorne i vremenske promene temperature i podužnog napona u poprečnom pravcu. Presek $A-A$ je dovoljno udaljen od izvora toplote, tako da u njemu nema termičkih napona jer nema uticaja

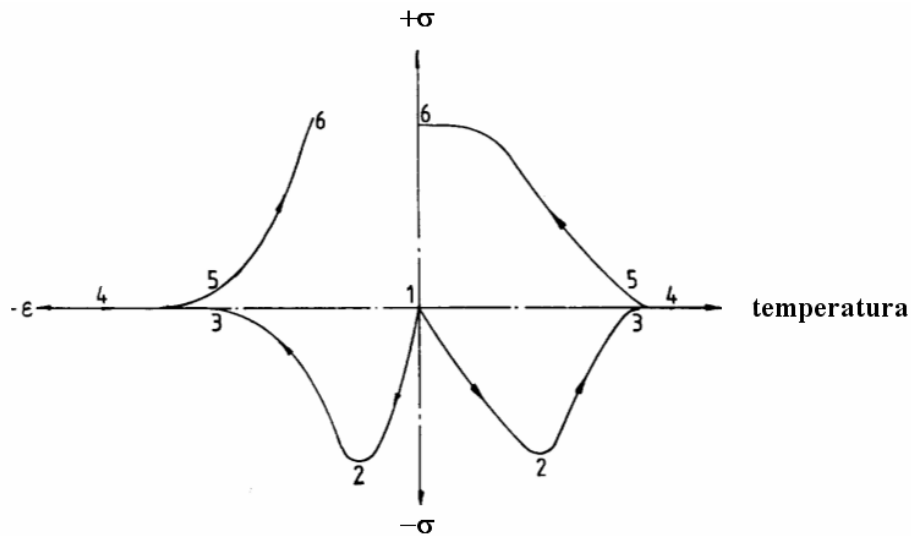
toplote. U preseku $B-B$, postavljenom na mestu izvora toplote, postoji velika promena temperature, koja je praćena srazmerno malim naponima. Raspodela napona u preseku $B-B$ je posledica termičkog širenja materijala u okolini izvora toplote, čemu se suprotstavlja okolni nezagrejani materijal. Stoga u delu preseka oko izvora toplote nastaju pritisni naponi, koji su uravnoteženi udaljenim zateznim naponima. Pri tome treba uočiti da u delu preseka koji je u tečnom stanju napona praktično nema jer materijal ne pruža otpor dejstvu termičkih sila. Presek $C-C$ je izabran tako da je hlađenje centralnog dela preseka brže od njegovog zagrevanja, tako da nastaje obrnuta situacija u odnosu na raspodelu napona u preseku $B-B$. Naime, materijal u centru preseka $C-C$ teži da se skupi, a tome se suprotstavlja okolni materijal u kome su gradijenti temperature mnogo manji. Stoga u centralnom delu preseka $C-C$ nastaju zatezni naponi, koji su uravnoteženi udaljenim pritisnim (i eventualno zateznim) naponima. Kako je temperatura u preseku $C-C$ bitno niža nego u preseku $B-B$, to se u centralnom delu pojavljuju naponi (još uvek srazmerno mali) jer materijal pruža izvesni otpor dejstvu termičkih sila. Konačno, u preseku $D-D$, udaljenom od izvora toplote dovoljno da nema promene temperature, ponašanje materijala je u osnovi isto kao u preseku $C-C$, s tim da su zatezni naponi u centru znatno veći, jer je na nižoj temperaturi otpor materijala dejstvu termičkih sila znatno veći.



Slika 4.3. Shematski prikaz nastanka termičkih zaostalih napona [64]
(podužna komponenta u poprečnom pravcu)

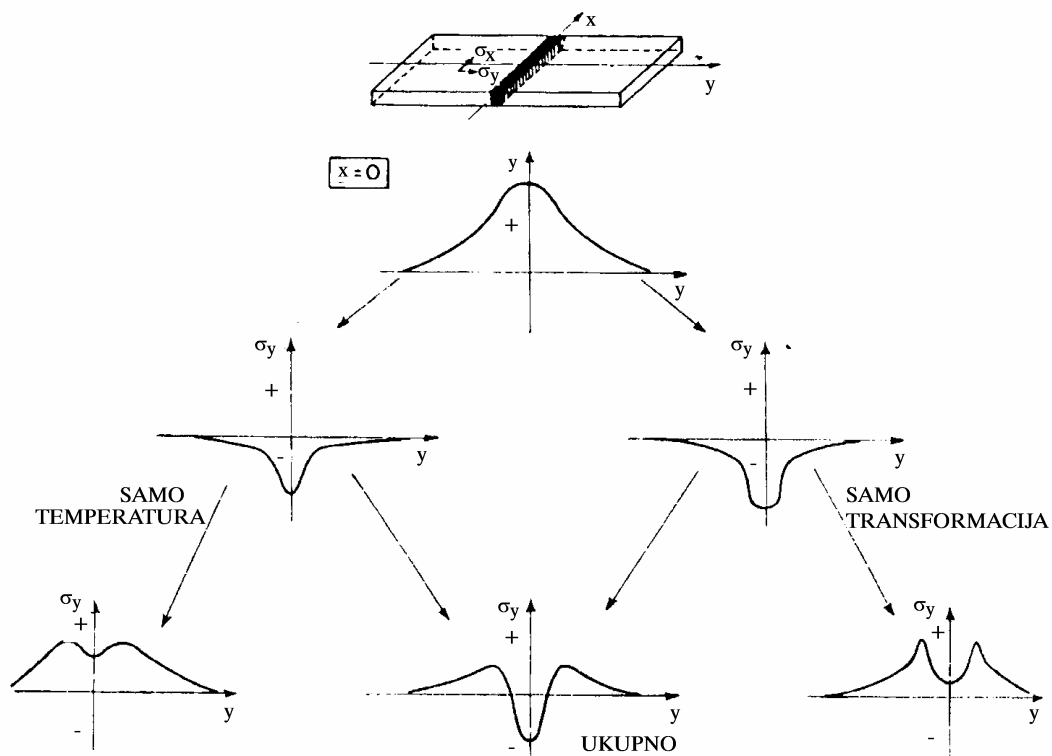
Na osnovu objašnjenja nastanka termičkih zaostalih napona, očigledno je da promena svojstava materijala sa promenom temperature igra veoma važnu ulogu. Ova činjenica se još jasnije uočava kada se analiziraju zavisnosti napona od temperature i zavisnost deformacije od napona u centru poprečnog preseka zavarenog spoja, sl. 4.4 [64]. Ciklus zagrevanja je na oba dijagrama označen tačkama 1-4, a ciklus hlađenja tačkama 4-6. Smanjenje modula elastičnosti sa porastom temperature se ogleda u nelinearnosti krive napon-deformacija između tačaka 1 i 2. Tačka 2 odgovara naponu tečenja, posle čega se napon smanjuje, jer se daljim zagrevanjem materijala smanjuje napon tečenja, sve do tačke 3 kada pada na nulu. Zaključno sa tačkom 4 napona praktično nema, ali se javlja značajna plastična deformacija.

U ciklusu hlađenja elastični deo deformacije nestaje, a javlja se zatezni napon, koji raste nelinearno usled porasta modula elastičnosti sa sniženjem temperature (tačke 4-6). Tačka 6 označava kraj zavarivanja, posle čega ostaju termički zaostali naponi i deformacije.



Slika 4.4. Zavisnost napon-deformacija i napon-temperatura u centru zavarenog spoja [64]

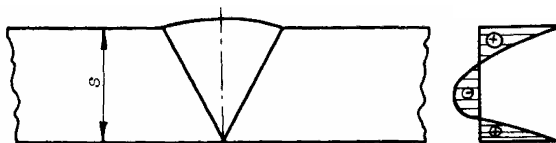
Druga vrsta zaostalih napona, strukturni naponi, imaju veliki značaj kod zakaljivih čelika, odnosno legura sklonih martenzitnoj transformaciji, a zanemarljivi su kod niskougljeničnih čelika. Postoje dva uzroka nastanka strukturnih zaostalih napona, jedan koji je posledica različitog termičkog širenja austenita i martenzita, sl. 4.1, i drugi koji je posledica **transformacione plastičnosti**. Strukturni zaostali naponi usled različitog termičkog širenja mogu da deluju suprotno termičkim zaostalim naponima, kao što je prikazano na sl. 4.5 u slučaju poprečne komponente napona.



Slika 4.5. Shematski prikaz ukupnog dejstva termičkih i strukturnih zaostalih napona [64] (poprečna komponenta u poprečnom pravcu)

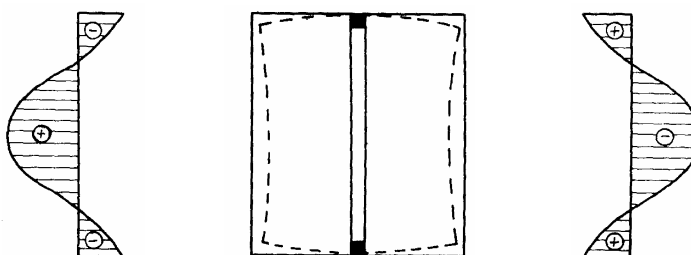
Transformaciona plastičnost je posledica neravnomernosti deformacije i lokalnog prekoračenja napona tečenja, a poprečna komponenta ovog napona takođe deluje suprotno termičkim zaostalim naponima, sl. 4.5 [64]. Shematski prikaz ukupnog dejstva zaostalih napona, dat na sl. 4.5, ukazuje na bitan uticaj transformacije kao što je martenzitna, jer ukupni zaostali napon (u slučaju poprečne komponente u poprečnom pravcu, sl. 4.5) može da se promeni od zateznog (termički) ka pritisnom (strukturni, tj. ukupni), sl. 4.5, što sprečava rast podužnih prslina.

Osim poprečnih i podužnih zaostalih napona, na isti način u zavarenom spoju nastaju i zaostali naponi po debljini, koji su zanemarljivi kod tanjih limova, ali mogu da budu od značaja kod konstrukcija veće debljine. Raspodela zaostalih napona po debljini slobodne ploče je data na sl. 4.6 [64].



Slika 4.6. Raspodela zaostalih napona po debljini [64]

Reaktivni naponi, odnosno uklještenje, mogu bitno da utiču na raspodelu ukupnih sopstvenih napona, kao što je pokazano u slučaju poprečnih napona, sl. 4.7 [64]. U ovom primeru pripojni šavovi na krajevima ploča se u jednom slučaju ne tope (uklještenje ostaje i posle zavarivanja, sl. 4.7 a), a u drugom slučaju se tope (uklještenje nestaje posle zavarivanja, sl. 4.7 b).



a) bez topljenja pripoja

b) sa topljenjem pripoja

Slika 4.7. Uticaj uklještenja na raspodelu sopstvenih napona [64]

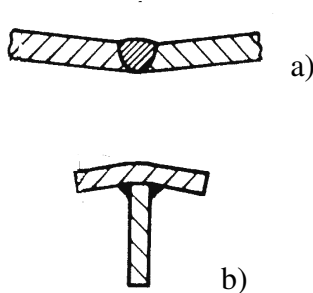
Zaostali naponi, u kombinaciji sa radnim naponima, mogu da izazovu krta lom kod materijala koji nemaju dovoljnu plastičnost, pa im treba posvetiti posebnu pažnju. Naime, kombinovanim dejstvom radnih i zaostalih napona može lokalno da se dostigne napon tečenja i izazove nastanak plastične deformacije. Ukoliko čelik, odnosno legura koja se zavaruje, ima dovoljnu plastičnost ovakva lokalna pojava ne može da ugrozi sigurnost konstrukcije, ali kod relativno krta materijala, u prisustvu prslina može da dođe do krtaog loma. Pojava lokalne plastične deformacije može da se iskoristi za smanjenje (relaksaciju) zaostalih napona, ali samo kod materijala sa izraženom plastičnošću.

Uticaj reaktivnih napona, odnosno ukupnih sopstvenih napona, na ponašanje zavarene konstrukcije je sličan uticaju zaostalih napona. U svakom slučaju što su sopstveni naponi manji, tim je zavarena konstrukcija sigurnija u radu.

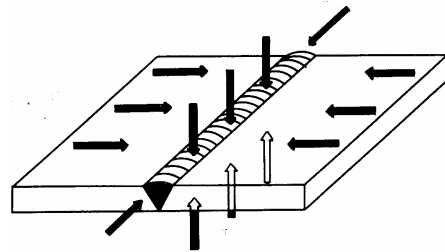
4.2. DEFORMACIJE ZAVARENIH SPOJEVA

Osim sopstvenih napona, pri zavarivanju mogu da nastanu i značajne deformacije zavarenog spoja. Najčešće deformacije su **ugaono savijanje**, (prikazano za sučeoni spoj na sl. 4.8 a, a za ugaoni spoj na sl. 4.8 b), **poprečno, podužno i upravno skupljanje**, sl. 4.9, i

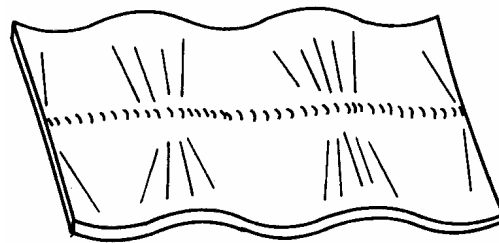
vitoperenje, sl. 4.10 [64]. Ugaono savijanje je posledica neravnomernog skupljanja u preseku šava usled veće količine rastopljenog metala sa lica šava nego u korenu šava i tipično je za sučeone 'V' šavove, sl. 4.8 a, i za ugaone šavove, sl. 4.8 b. Skupljanje zavarenog spoja je posledica neravnomernog zagrevanja i skupljanja materijala u odgovarajućem pravcu (poprečno-širini, podužno-dužini i upravno-debljini), a njegova veličina zavisi od količine unete toplote, dimenzija, vrste i oblika šava, i krutosti konstrukcije. Vitoperenje je posledica gubitka stabilnosti oblika izazvanog neravnomernim zagrevanjem i skupljanjem, koje je posebno izraženo kod tzv. tankozidnih konstrukcija (debljina znatno manja od dužine i širine). Stoga su na ovu pojavu naročito osetljive mašinske konstrukcije kao što su posude pod pritiskom, brodski trupovi, školjke i kabine motornih vozila, pa pri njihovoj izradi o tome mora posebno da se vodi računa.



Slika 4.8. Primeri ugaonog savijanja [64]



Slika 4.9. Poprečno, podužno i upravno skupljanje [64]



Slika 4.10. Vitoperenje usled skupljanja [64]

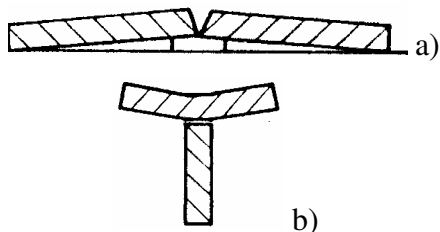
4.2.1. Mere za sprečavanje i smanjenje deformacija i sopstvenih napona

Postoji više načina da se deformacije zavarenih spojeva spreče ili smanje, a najčešće se koriste prethodna deformacija (suprotna očekivanoj), uklještenje pogodnim steznim alatom, smanjenje količine unete toplote i specijalne tehnike zavarivanja, posebno u smislu redosleda popunjavanja žleba. Kada se primenjuju navedene mere treba imati u vidu i njihov uticaj na sopstvene napone, posebno kod smanjenja količine unete toplote, čime se povećavaju zaostali naponi, i kod uklještenja zavarenog spoja, koje može da izazove pojavu značajnih reaktivnih napona. Suprotno tome, pogodan redosled popunjavanja žleba, osim što smanjuje deformacije, istovremeno utiče i na smanjenje zaostalih napona, pa se u praksi najčešće koristi. Zaostali naponi se najefikasnije smanjuju termičkom obradom posle zavarivanja (žarenjem), što međutim iziskuje dodatne troškove, pa se termička obrada koristi samo kada je neophodno.

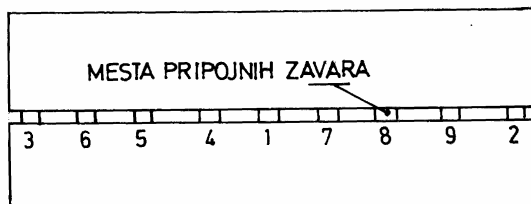
Ugaono savijanje može da se neutrališe prethodnim savijanjem osnovnog metala na suprotnu stranu, sl. 4.11 [64]. Poprečno i podužno skupljanje može da se nadoknadi tzv. dodacima za obradu, a efikasan način njegovog smanjenja je smanjenje poprečnog preseka šava, npr. zamenom 'V' šava 'X' šavom. Primenom simetričnih šavova se takođe značajno smanjuje ugaono savijanje, ali je ovo rešenje moguće samo ako su dostupne obe strane zavarene konstrukcije. U tom slučaju se često koristi tehnika istovremenog zavarivanja, što

uz pogodan redosled popunjavanja žleba po pravilu rešava sve probleme vezane za deformacije i zaostale napone zavarenih spojeva. Vitoperenje, karakteristično za tanke limove, najefikasnije se sprečava ili smanjuje **pripajanjem**, sl. 4.12 [64], i pogodnim redosledom popunjavanja žleba, sl. 4.13 [64].

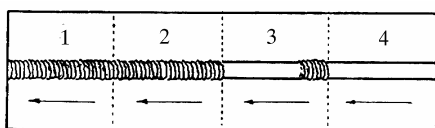
Tehnika pripajanja (prethodno mestimično spajanje) se često koristi kod dugačkih šavova, jer se time smanjuje aktivna dužina šava i sve odgovarajuće deformacije. Pogodan redosled popunjavanja žleba, koji ujedno smanjuje i ugaono savijanje, najčešće se postiže **zavarivanjem povratnim korakom**, sl. 4.13 a, **zavarivanjem povratnim korakom na preskok**, sl. 4.13 b. Ove tehnike su posebno pogodne za E postupak, jer dužina koraka može da se podese da odgovara dužini zavara napravljenog jednom elektrodom.



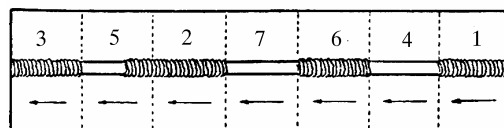
Slika 4.11. Neutralisanje ugaonog savijanja [64]



Slika 4.12. Zavarivanje pripajanjem [64]



a) zavarivanje povratnim korakom



b) zavarivanje povratnim korakom sa preskokom

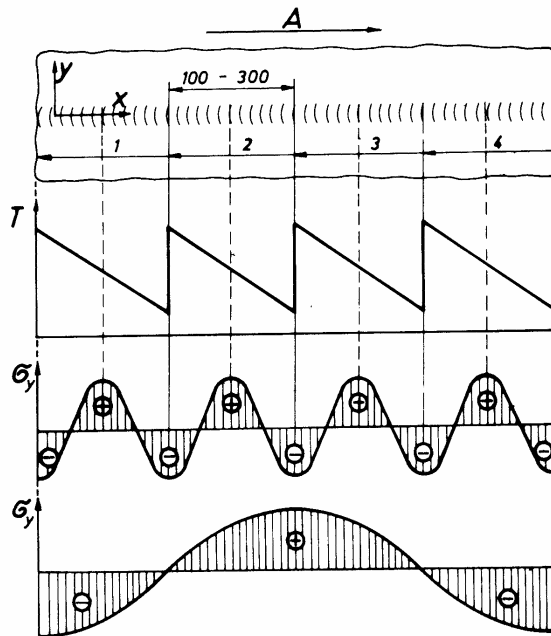
Slika 4.13. Načini sprečavanja deformacija [64]

Uticaj redosleda popune žleba na raspodelu i veličinu zaostalih napona je dat na sl. 4.14 [64], gde je prikazana raspodela temperature i zaostalih napona u slučaju zavarivanja povratnim korakom i raspodela zaostalih napona pri kontinualnom zavarivanju (smer zavarivanja označen sa 'A').

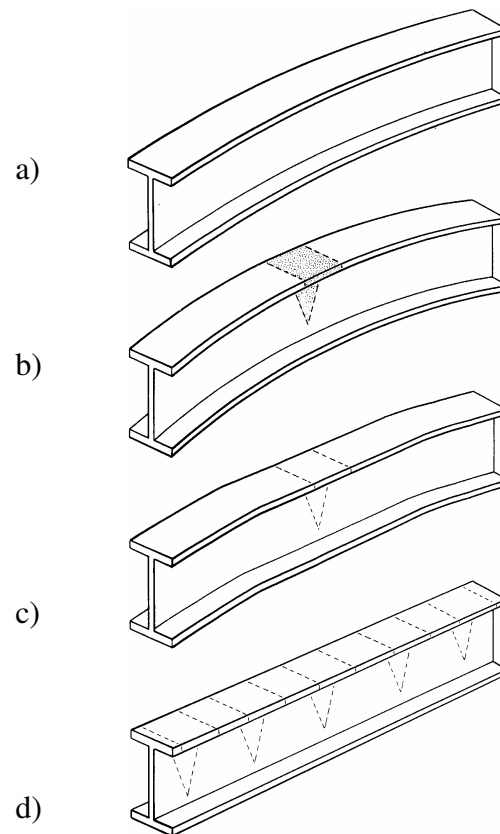
Osim količine unete toplote, tj. linijske energije, na veličinu zaostalih napona i deformacija bitno utiče i gustina snage toplotnog izvora. Toplotni izvori velike gustine snage znatno smanjuju deformacije zavarenog spoja, tako da je kod zavarenih spojeva gde deformacija mora da bude minimalna ponekad neophodna primena postupaka zavarivanja velike gustine snage, kao što je elektronski snop. Svi navedeni problemi u vezi sa deformacijama i zaostalim naponim su najizraženiji kod postupaka zavarivanja sa malom gustinom snage, kao što su gasni i E postupak.

Ukoliko je zavareni spoj deformisan moguće je njegovo naknadno ispravljanje, termički ili mehanički. Kao i prethodno savijanje u suprotnu stranu, naknadno ispravljanje zahteva veliku stručnost i što precizniju procenu veličine deformacije, a osim toga neophodno je poznavati njegov uticaj na sopstvene napone.

Primer termičkog ispravljanja deformisanog zavarenog spoja je dat na sl. 4.15 [64], gde je prikazano ispravljanje dugačkog 'T' profila, savijenog oko vertikalne ose usled podužnog zavarivanja vertikalne i horizontalnih stranica, sl. 4.15 a. Da bi se ovako savijeni profil ispravio treba brzo zagrejati srednji deo (osenčena oblast, sl. 4.15 b) do temperature crvenog usijanja, a zatim ga ohladiti na vazduhu, posle čega će se deo profila ispraviti, sl. 4.15 c. Da bi se ceo profil ispravio, potrebno je ponoviti ciklus zagrevanje-hlađenje na dovoljnom broju mesta, sl. 4.15 d.



Slika 4.14. Uticaj redosleda popune žleba na raspodelu zaostalih napona [64]



Slika 4.15. Ispravljanje dugačkih profila [64]

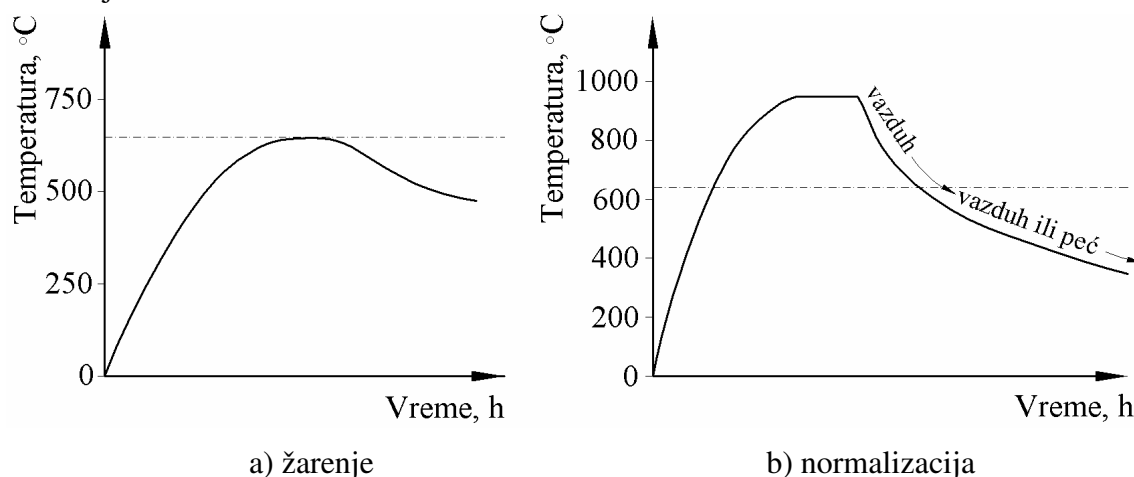
4.3. TERMIČKA OBRADA POSLE ZAVARIVANJA

Termička obrada posle zavarivanja se najčešće izvodi u cilju smanjenja zaostalih napona (**žarenje**), **otpuštanja** zakaljenih struktura i usitnjavanja zrna (**normalizacija**) u ZUT. Termičku obradu treba primenjivati samo kada je to neophodno, jer po pravilu bitno poskupljuje izradu zavarenog spoja.

Žarenje je osnovna mera za smanjenje zaostalih napona i najčešće je neophodno kod zavarenih spojeva velike debljine, posebno kod onih koji se nalaze u zavarenoj konstrukciji velikog uklještenja, kao što su posude pod pritiskom, parovodi i rezervoari. Smanjenje zaostalih napona se postiže žarenjem na temperaturi pri najmanje 550°C , a gornja granica temperature i vreme progrevanja su određeni zahtevom da se ne smanjuju mehanička svojstva kao što su napon tečenja ili čvrstoća puzanja, što znači da je temperatura žarenja u svakom slučaju ispod A_{c1} . Zagrevanje ne sme da bude prebrzo da ne bi nastale prsline usled ponovnog zagrevanja, i obično iznosi $80-100^{\circ}\text{C/h}$, a hlađenje treba da bude u peći ili na vazduhu, zavisno od vrste materijala. Vreme progrevanja je približno 2min/mm preseka šava, ali ne manje od 30min, sl. 4.16 a. Posebnu pažnju treba posvetiti mikrolegiranim čelicima povišene čvrstoće kod kojih ovakva termička obrada može da bude više štetna nego korisna.

Cilj otpuštanja zavarenih spojeva je praktično isti kao kada se ova termička obrada izvodi posle kaljenja (poboljšanje), tj. da se martenzit dobijen kaljenjem, koji je veoma krt, prevede u neku od struktura koje imaju zadovoljavajuću žilavost. Otpuštanje treba primenjivati kod zavarenih spojeva koji u ZUT imaju tvrdoću veću od 350HV. Kao i kod žarenja, pri izboru temperature zagrevanja i vremena progrevanja treba voditi računa o

njihovom uticaju na smanjenje čvrstoće. Svi parametri ove termičke obrade su slični kao kod žarenja.



Slika 4.16. Režim termičke obrade posle zavarivanja [64]

Normalizacija se izvodi radi homogenizacije i usitnjavanja zrna u metalu šava (popravljanje stubičasto-slojevite livene strukture) i usitnjavanja zrna u krupnozrnoj oblasti ZUT. Najčešće se koristi posle zavarivanja pod troskom, jednoslojnog zavarivanja pod praškom i kod visokofrekventnog zavarivanja u proizvodnji šavnih cevi. S obzirom na relativno visoku temperaturu zagrevanja kod ove termičke obrade treba posebno voditi računa o vremenu zagrevanja i progrevanja zbog opasnosti od razugljeničenja površinskih slojeva i daljeg rasta zrna u ZUT. Stoga je u ovakvim slučajevima bolje koristiti jake indukcione grejače i brzine zagrevanja oko $150^{\circ}\text{C}/\text{h}$, sl. 4.16 b, nego sporo zagrevanje u peći. Vreme progrevanja ne treba da bude duže od 30min. Brzina hlađenja takođe mora da bude kontrolisana da bi se izbegao porast zrna u području faznog preobražaja ($\gamma \rightarrow \alpha$). Kod legiranih čelika, posebno ako su skloni samozakaljivanju, često se primenjuje izotermalno hlađenje do 600°C prinudnim strujanjem vazduha, a zatim sledi hlađenje u peći ili na mirnom vazduhu.

4.3.1. Oprema za termičku obradu posle zavarivanja

Oprema za termičku obradu posle zavarivanja može da se podeli na peći (globalna obrada cele konstrukcije) i na opremu za lokalnu obradu, kao što su gorionici, elektrotoporni i indukcioni grejači. Globalna obrada je pogodna za manje zavarene konstrukcije, koje mogu cele da se ubace u peć, a neophodna je kod konstrukcija koje bi se lokalnom obradom deformisale. Lokalna termička obrada je pogodna posebno u slučaju kada je zagrevanje neophodno pre, u toku i posle zavarivanja i što je moguće uređaj premeštati od spoja do spoja.

Peći. Postoje peći različitih konstrukcija i dimenzija, počev od malih laboratorijskih peći, preko peći srednje veličine za opštu namenu, pa do velikih peći, koje se po pravilu zidaju namenski za neku zavarenu konstrukciju, i najčešće su montažnog tipa. Po konstrukciji peći mogu da budu stacionarne, najčešće sa jednom komorom za ceo ciklus obrade, prolazne sa pomičnim dnom iznad kojeg su postavljene komore za zagrevanje različitim termičkim režimima, što obezbeđuje kontinualnu termičku obradu, i kapaste, koje imaju grejnu komoru u obliku kape, dok je dno pomerljivo, kod kojih je toplotni izvor postavljen bočno sa svih strana.

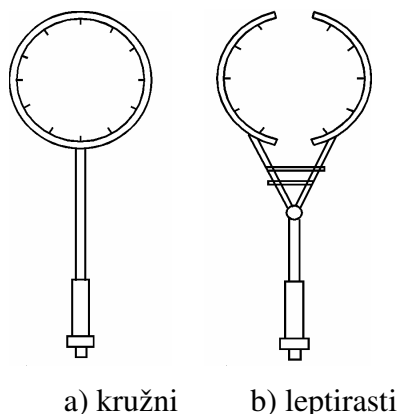
Gasni gorionici. Najčešće se koriste gorionici sa direktnim plamenom i sa katalitičkim sagorevanjem. U oba slučaja toplota se pretežno predaje konvekcijom i to tako

što se toplotno deluje na površinu šava i njegovu okolinu. Prednost katalitičkih gorionika je u tome što se umanjuje proces difuzije ugljenika u površinski sloj obrađivanih delova. Na sl. 4.17 [64] prikazani su namenski gasni gorionici za termičku obradu cevi.

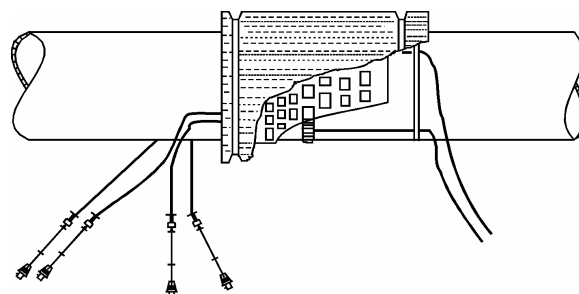
Za uske tolerancije regulacije temperature prednost ima korišćenje električne energije za zagrevanje, uz merenje i regulaciju temperature i beleženje temperaturnog ciklusa. Osnovni uređaji koji rade na ovom principu su elektrootporni i indukcioni.

Elektrootporni uređaji. Uređaji za lokalnu termičku obradu elektrootpornim zagrevanjem mogu da budu poluautomatski ili automatski. Ovi uređaji za lokalno zagrevanje koriste pogodno oblikovani električni grejač, sl. 4.18 [64]. Veoma je važno proračunati broj grejnih tela i njihovu snagu, zatim pravilno rasporediti grejače po zoni grejanja i pogodno postaviti izolaciju. Izolacija se postavlja slojevito tako što se preko grejača stavlja nekoliko slojeva platna od vatrostalnog materijala, a preko toga industrijska vuna u raznim oblicima.

Neophodne informacije o temperaturi zone žarenja daju termoparovi, kao što je *Ni-CrNi*. Termoregulatori uključuju ili isključuju iz transformatora izlazne sklopke velike snage. Od sklopki se nastavljaju kablovi sa konektorima do grejača. Grejači se izrađuju od žica specijalnih legura, koje se uvlače u keramičke perle-izolatore. Ispod grejača, na sam šav se postavlja ili pripaja termopar čija impendansa varira sa promenom temperature, pa se taj fenomen koristi u termoregulatoru za korekciju procesa termičke obrade. Termoparovima u svakom momentu može da se kontroliše temperatura u zoni šava.



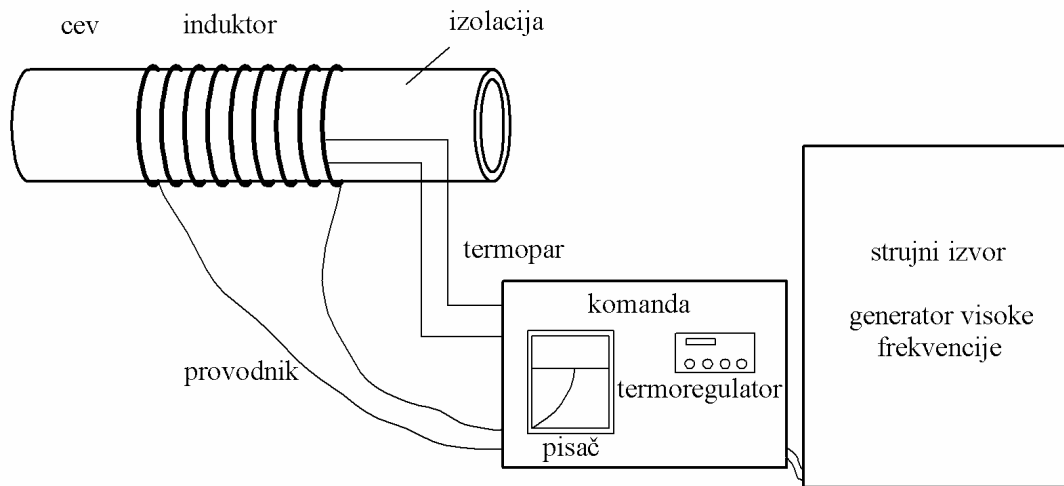
Slika 4.17. Gorionici za cilindrične spojeve [64]



Slika 4.18. Elektrootporno zagrevanje cevi [64]

Indukcioni uređaji. Indukcioni uređaj za lokalnu termičku obradu se sastoji od elektrogeneratora, srednje ili visoke frekvencije (od 2 do 10kHz), koji preko sklopki uključuju ili isključuju dovod struje, ili pak sam generator umanjuje ili povećava izlaznu snagu prema induktoru. Umesto grejača ovde se koristi debela bakarna žica koja se izoluje i namotava oko zone grejanja. Zahvaljujući delovanju Fukoovih struja, unutar samog zavarenog komada, kao sekundara u kratkom spoju, komad se više greje od bakarnog primara namotanog oko njega.

Osnovna prednost indukcionog zagrevanja je ravnomerno zagrevanje po čitavom preseku u zoni indukcionog kalema. Kod elektrootpornog postupka često nastaje oksidna skrama ispod grejača, pa je osnova nedovoljno progrejana, dok se kod indukcionog postupka to ne javlja, jer se izolacija postavlja između namotaja induktora i grejanog komada. Na sl. 4.19 [64] prikazana je opšta shema indukcionog postupka lokalnog žarenja cevi.



Slika 4.19. Shema indukcionog postupka zagrevanja cevi [64]

Postupak indukcionog zagrevanja je pre svega ekonomičan i jedino moguć kod većih konstrukcija i većih debljina, posebno u slučaju debelozidnih cevi velikog prečnika.

5. PRIKAZ I ANALIZA EKSPERIMENTALNO DOBIJENIH REZULTATA

Dugogodišnji eksploatacioni period posude pod pritiskom-reaktora (preko 40 godina) kao i posledice bombardovanja, prouzrokovali su određena oštećenja na plaštu reaktora. Pojava ovih oštećenja je zahtevala vrlo ozbiljan pregled same konstrukcije reaktora, kao i sanaciju oštećenih delova. Sanacija reaktora je uključivala i zamenu dela plašta reaktora novougrađenim materijalom. Imajući u vidu ove elemente, važno je znati i specifičnosti eksploatacije reaktorskih postrojenja koja rade u prisustvu vodonika. Prema podacima API PUBLICATION 941/83 koju je izdao AMERICAN PETROLEUM INSTITUT (API) definisana je granica upotrebljivosti prema vrsti materijala i radnim uslovima (temperatura, parcijalni pritisak vodonika), kako bi se izbegla oštećenja usled dekarbonizacije i pojava prslina, za period eksploatacije od 35 godina, u atmosferi vodonika.

Predmetna posuda pod pritiskom (reaktor) je izrađena od niskolegiranog *Cr-Mo* čelika A-387 Gr. B prema ASTM standardu sa (0,8-1,15)% *Cr* i (0,45-0,6)% *Mo*. Za projektovane radne parametre ($p = 35\text{bar}$ i $t = 537^\circ\text{C}$) materijal se nalazi u području sklonosti ka dekarbonizaciji (razugljeničenju) površine koja se nalazi u kontaktu sa vodonikom. Kao posledica površinske dekarbonizacije može da dođe do smanjenja čvrstoće materijala.

Reaktor po svojoj konstrukciji predstavlja vertikalnu posudu pod pritiskom sa cilindričnim omotačem. Sa donje i gornje strane plašta zavarena su duboka danca, istog kvaliteta kao i sam plašt reaktora. U reaktoru se odigrava najvažniji proces u fazi proizvodnje motornog benzina a to je platformiranje u cilju izmene strukture ugljovodoničnih jedinjenja i postizanja većeg oktanskog broja benzina. Tehnički podaci za reaktor su:

⇒ Radni fluid	- ugljovodonic
⇒ Zapremina reaktora, V_{uk}	- $26,64\text{m}^3$
⇒ Debljina plašta reaktora, d_p	- 102mm
⇒ Debljina danca reaktora, d_d	- 111mm
⇒ Unutrašnji prečnik reaktora, d_u	- 2796mm
⇒ Radni pritisak u reaktoru, $p_{rad.}$	- 26bar
⇒ Proračunski pritisak u reaktoru, $p_{pr.}$	- 35bar
⇒ Ispitni pritisak u reaktoru, $p_{isp.}$	- 108bar
⇒ Proračunska temperatura reaktora, $t_{pror.}$	- 537°C
⇒ Radna temperatura reaktora, $t_{rad.}$	- 487°C
⇒ Dodatak na koroziju (plašt i dance)	- 4,6 i 4,9mm
⇒ Klasa posude	- II

Uticaj vremena eksploatacije i temperature na mehaničko-eksploatacione i strukturne osobine osnovnog metala (OM) reaktora je analiziran ispitivanjem uzoraka eksploatisanog OM i novog OM. Analiza je obuhvatila i ispitivanje mehaničko-eksploatacionih i strukturnih osobina zavarenog spoja eksploatisani OM-novi OM.

Ispitivanja novog i eksploatisanog OM, kao i komponenti zavarenog spoja (metala šava-MŠ i zone uticaja toplote-ZUT), niskolegiranog čelika od koga je napravljen reaktor, obuhvatila su:

- ⇒ određivanje zateznih osobina eksploatisanog OM, novog OM i sučeono zavarenog spoja eksploatisani OM-novi OM na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C;
- ⇒ ispitivanje tehnoloških proba savijanjem sučeono zavarenog spoja;
- ⇒ merenje tvrdoće sučeono zavarenog spoja po preseku;
- ⇒ makroskopski pregled zavarenog spoja i mikrostrukturna analiza OM, MŠ i ZUT;
- ⇒ određivanje udarnih osobina eksploatisanog i novog OM i komponenti zavarnog spoja na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C, na instrumentiranom Šarpijevom klatnu;
- ⇒ određivanje parametara mehanike loma eksploatisanog i novog OM i komponenti zavarnog spoja, na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C;
- ⇒ određivanje parametara visokocikličnog zamora sučeono zavarnog spoja i novog OM na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C, i
- ⇒ određivanje parametara rasta zamorne prsline eksploatisanog i novog OM i komponenti zavarnog spoja, na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C.

Ekspperimentalno dobijeni rezultati mehaničko-eksploatacijskih ispitivanja predstavljaju neophodne polazne podatke za proračun i definisanje kritičnih mesta na samoj posudi pod pritiskom, njeno ispitivanje pri probi hladnim vodenim pritiskom (HVP) i u eksploataciji (radnim uslovima).

Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza treba da daju praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na ponašanje OM, komponenti zavarenog spoja i same posude pod pritiskom (reaktora), a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, kao i revitalizacije i produženja radnog veka procesne opreme (reaktora) izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

5.1. OSNOVNI MATERIJAL

Eksploatisani OM (u daljem tekstu **E**) je bio čelik kvaliteta *A-387 Gr. B* debljine 102mm, a novi OM (u daljem tekstu **N**) je takođe čelik kvaliteta *A-387 Gr. B* i debljine 102mm. Hemijski sastav i mehaničke osobine eksploatisanog i novog OM prema atestnoj dokumentaciji su dati u tab. 5.1 i tab. 5.2.

Tabela 5.1. Hemijski sastav uzoraka eksploatisanog i novog OM

Oznaka uzorka	% mas.							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu
E	0,15	0,31	0,56	0,007	0,006	0,89	0,47	0,027
N	0,13	0,23	0,46	0,009	0,006	0,85	0,51	0,035

Tabela 5.2. Mehaničke osobine uzoraka eksploatisanog i novog OM

Oznaka uzorka	Napon tečenja, $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje, A , %	Energija udara, J
E	320	450	34,0	155
N	325	495	35,0	165

5.2. TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA LIMOVA OD NISKOLEGIRANOG ČELIKA

Zavarivanje čeličnih limova eksploatacionog i novog OM, je izvedeno u dve faze, a prema zahtevu sadržanom u postupku zavarivanja koji je propisan od strane specijaliste zavarivanja, i to:

- ⇒ koreni zavar-ručnim elektrolučnim postupkom (E postupak) obloženom elektrodom LINCOLN SI 19G (AWS: E8018-B2), i
- ⇒ popuna-elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom praha (EPP), gde se kao dodatni materijal koristila žica oznake LINCOLN LNS 150 i prah LINCOLN P230.

Hemijski sastav obložene elektrode oznake LINCOLN SI 19G, i žice oznake LINCOLN LNS 150 prema atestnoj dokumentaciji je dat u tab. 5.3, a osnovnih mehaničkih osobina, takođe prema atestnoj dokumentaciji u tab. 5.4.

Tabela 5.3. Hemijski sastav dodatnog materijala za zavarivanje

Dodatni materijal	% mas.						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
LINCOLN SI 19G	0,07	0,31	0,62	0,009	0,010	1,17	0,54
LINCOLN LNS 150	0,10	0,14	0,71	0,010	0,010	1,12	0,48

Tabela 5.4. Mehanička svojstva dodatnog materijala

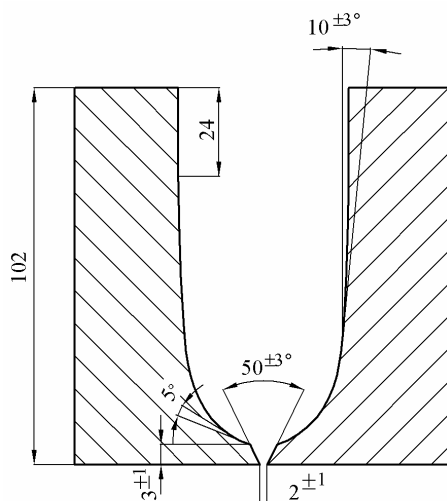
Dodatni materijal	Napon tečenja, $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje, A, %	Energija udara, J na 20°C
LINCOLN SI 19G	515	610	20	> 60
LINCOLN LNS 150	495	605	21	> 80

Oblik žleba za pripremu zavarivanja je izabran u odnosu na debljinu lima, a u skladu sa odgovarajućim standardima. Shema pripreme žleba za sučeono zavarivanje limova eksploatacionog OM-novi OM debljine 102mm, je data na sl. 5.1.

Stranice žleba su obrađene mašinski, skidanjem strugotine, i nakon mašinske obrade su očišćene od masnoća i prljavštine rastvaračem, trihloretilenom. Obložene elektrode za E postupak zavarivanja su vizuelno pregledane i odbačene su elektrode sa ekscentričnom ili oštećenom oblogom. Neposredno pre korišćenja, elektrode su sušene najmanje dva časa na 200 do 250°C u sušnici sa ventilatorom. Na samom radnom mestu elektrode su čuvane u tobojcima (prenosnim sušačima) na temperaturi 150°C. Žica za EPP zavarivanje je, pre upotrebe, brusnim papirom očišćena do metalnog sjaja.

Podaci o temperaturi i uslovima predgrevanja se propisuju za svaki tip zavarenog spoja. Temperatura predgrevanja limova oznake **E** i **N**, debljine 102mm iznosila je 250±5°C, a širina zone koja se predgrevala je definisana standardom prema kojem treba da bude jednaka trostrukoj debljini limova, ali ne sme da bude manja od 100mm. U konkretnom slučaju je bila 200mm sa jedne i druge strane pripremljenog žleba. Temperatura predgrevanja se morala održavati tokom čitavog procesa zavarivanja. Brzina zagrevanja do dostizanja temperature predgrevanja treba da bude umerena, i iznosila je 10°C/min. Temperatura predgrevanja se kontrolisala pomoću termoparova i registrovala pisačima. Za limove debljine veće od 50mm obavezno se zahteva elektrootporno ili elektroindukcijsko zagrevanje.

Koreni prolaz se po pravilu izvodi E postupkom obloženom elektrodom LINCOLN SI 19G. Odmah posle završenog nanošenja korenog prolaza i tri do pet narednih prolaza, pristupilo se popuni žleba elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom praha (EPP), gde se kao dodatni materijal koristila žica oznake LINCOLN LNS 150 i prah LINCOLN P230.



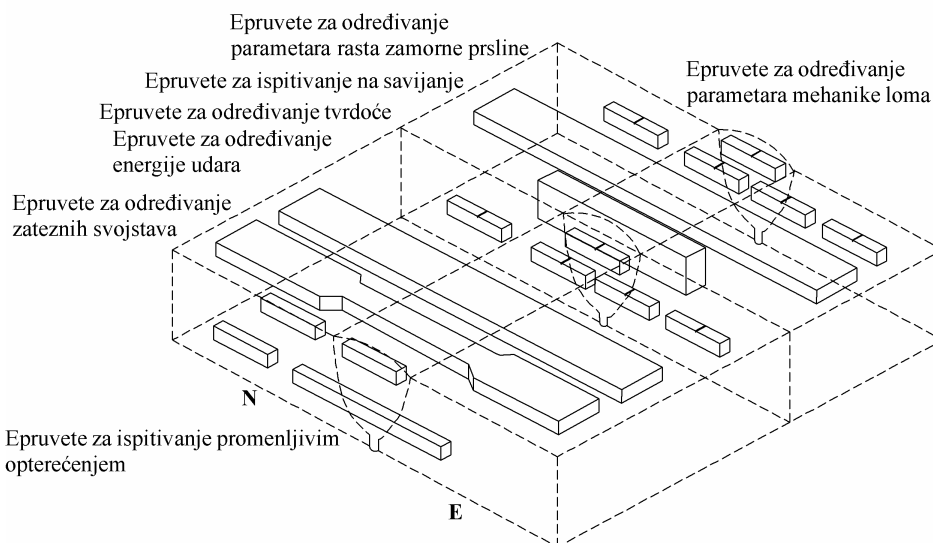
Slika 5.1. Priprema žleba za zavarivanje limova

Termička obrada radi otklanjanja zaostalih napona je urađena pod stručnim nadzorom tehnologa za zavarivanje, neposredno nakon završenog zavarivanja. Načelno, termička obrada se obavlja na 720-780°C, sa brzinom zagrevanja do 220°C/h i brzinom hlađenja do 150°C/h. Vreme zadržavanja na temperaturi termičke obrade je 5min/1mm debljine zida, a najmanje 2 časa. Širina zone termičke obrade je najmanje jednaka trostrukoj debljini lima, ali nikako ispod 100mm. Hlađenje se izvodi propisanim brzinom do temperature 300°C, a zatim se zavareni spoj hladi na mirnom vazduhu.

Zavareni spoj se posle zavarivanja mora držati jedan čas na temperaturi 120-150°C. Kontrola propisanog režima termičke obrade je obavljena sa tri termopara i pisačima, jer za svaki termički obrađen zavareni spoj mora postojati zapisan dijagram.

5.3. UZORKOVANJE

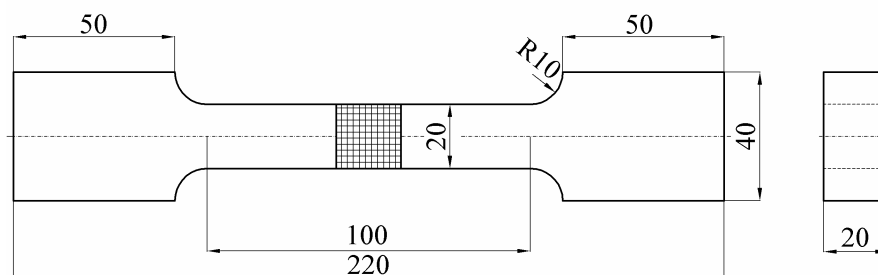
Na osnovu programa eksperimentalnih ispitivanja definisana je i shema vađenja epruveta iz dostavljenog uzorka sučeono zavarenih limova eksploatacionog i novog OM dimenzija 500x500x102mm sa 'U' šavom po sredini, sl. 5.2.



Slika 5.2. Shematski prikaz 'U' šava i mesta vađenja epruveta

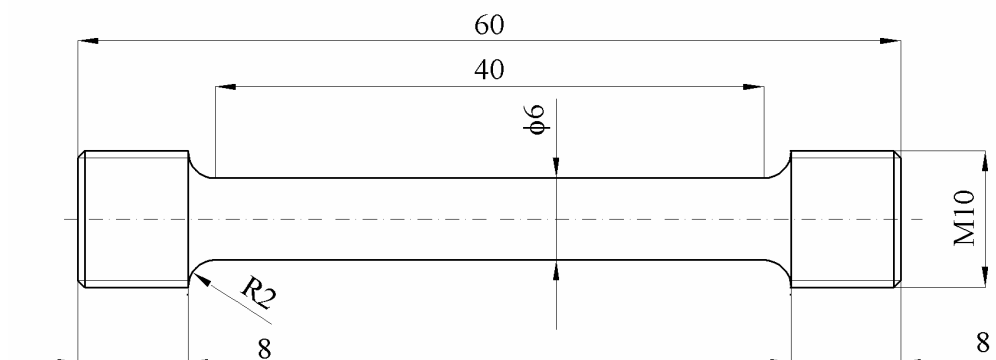
5.4. ODREĐIVANJE ZATEZNIH OSOBINA

Osnovne karakteristike čvrstoće materijala, kao i krive napon-izduženje neophodne za naponsku analizu posude pod pritiskom (reaktora), dobijaju se zateznim ispitivanjima. Ispitivanje zatezanjem sučeono zavarenog spoja na sobnoj temperaturi, uključujući oblik i dimenzije epruveta kao i sam postupak ispitivanja su definisani standardom EN 895 [54]. Ovaj standard pre svega definiše poprečno zatezanje, odnosno uvođenje opterećenja poprečno na zavareni spoj. Kod poprečnog zatezanja sučeono zavarenog spoja po pravilu se određuje samo zatezna čvrstoća ispitivanog uzorka, koja ne bi trebala da bude niža od zatezne čvrstoće osnovnog materijala. Oblik i dimenzije epruvete za poprečno zatezanje sučeono zavarenog spoja su dati na sl. 5.3.



Slika 5.3. Epruveta za određivanje zateznih svojstava sučeono zavarenog spoja [54]

Standard EN 895 predviđa i određivanje zateznih osobina OM i MŠ na sobnoj temperaturi. Određivanje zateznih osobina OM je definisano standardom SRPS EN 10002-1 [55]. Oblik i dimenzije epruvete za određivanje zateznih osobina OM i MŠ su dati na sl. 5.4.



Slika 5.4. Epruveta za određivanje zateznih svojstava OM i MŠ [56]

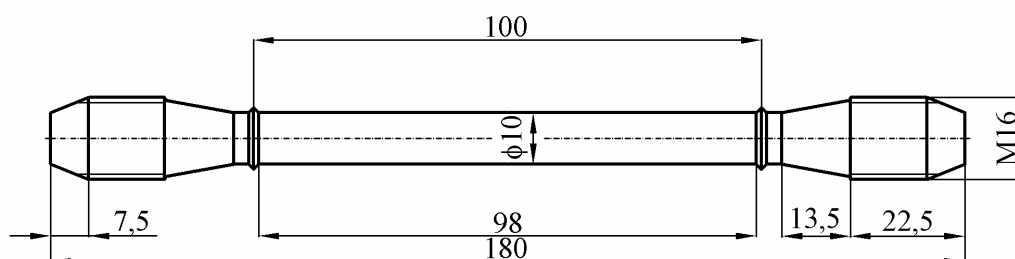
Samo ispitivanje epruveta zavarenog spoja, OM i MŠ na sobnoj temperaturi je rađeno na elektromehaničkoj kidalici, sl. 5.5 u kontroli deformacije. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5mm/min. Izduženje je registrovano pomoću dvostrukog ekstenzometra i induktivnog davača. Tačnost merenja ekstenzometra je $\pm 0,001$ mm.

Za razliku od ispitivanja na sobnoj temperaturi, postupak ispitivanja na povišenoj temperaturi od 540°C kao i geometrija epruvete su definisani standardom EN 10002-5 [71]. Oblik i dimenzije epruvete za ispitivanje zatezanjem na povišenoj temperaturi dati su na sl. 5.6.

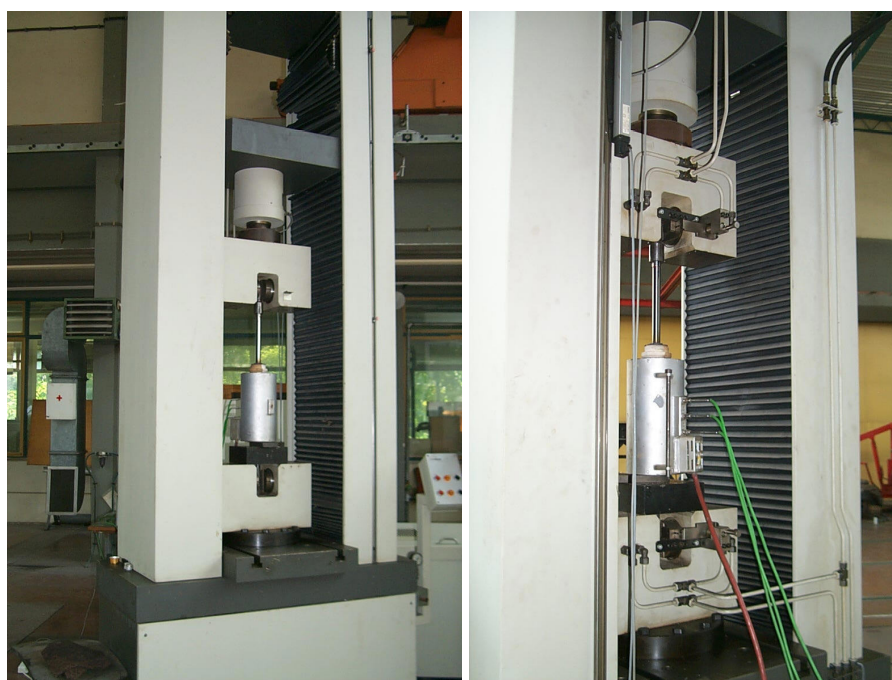
Ispitivanje epruveta zavarenog spoja, eksploatacionog i novog OM, i MŠ izvađenih iz uzorka "**Zavareni spoj U**" na povišenoj temperaturi je rađeno na elektromehaničkoj kidalici (sl. 5.7) u kontroli deformacije. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5mm/min. Izduženje je registrovano pomoću induktivnog davača. Tačnost merenja induktivnog davača je $\pm 0,01$ mm.



Slika 5.5. Elektromehanička kidalica za ispitivanje na sobnoj temperaturi



Slika 5.6. Epruvete za ispitivanje zatezanjem na povišenoj temperaturi [71]



Slika 5.7. Elektromehanička kidalica za ispitivanje na povišenoj temperaturi

Radna temperatura od 540°C je ostvarena u komornoj električnoj peći. Temperatura je merena na tri mesta duž epruvete, zbog relativno velike dužine mernog dela (100mm). Cilj je bio da se, preciznom kontrolom i blagovremenim korigovanjem, obezbedi približno jednaka temperatura duž cele epruvete, jer je prema standardu EN 10002-5 [71] dozvoljeno odstupanje $\pm 3^\circ\text{C}$.

5.4.1. Rezultati zateznih ispitivanja zavarenog spoja

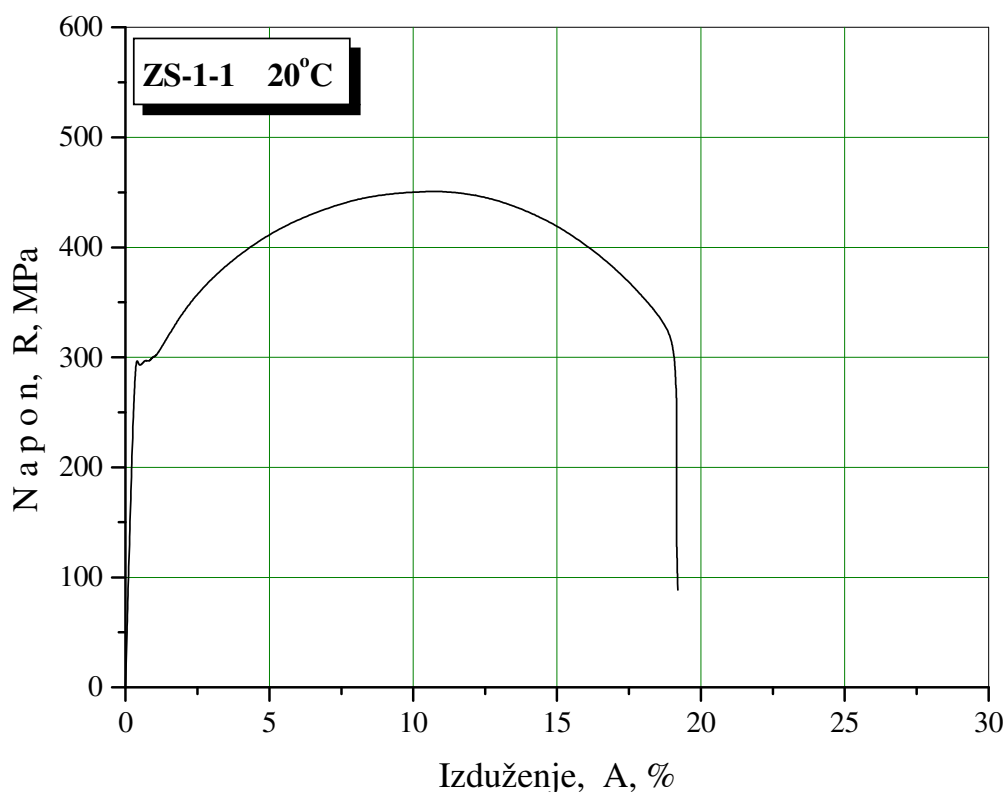
Rezultati ispitivanja epruveta sučeono zavarenog spoja poprečnim zatezanjem na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C su dati u tab. 5.5.

Tabela 5.5. Rezultati zateznih ispitivanja zavarenog spoja

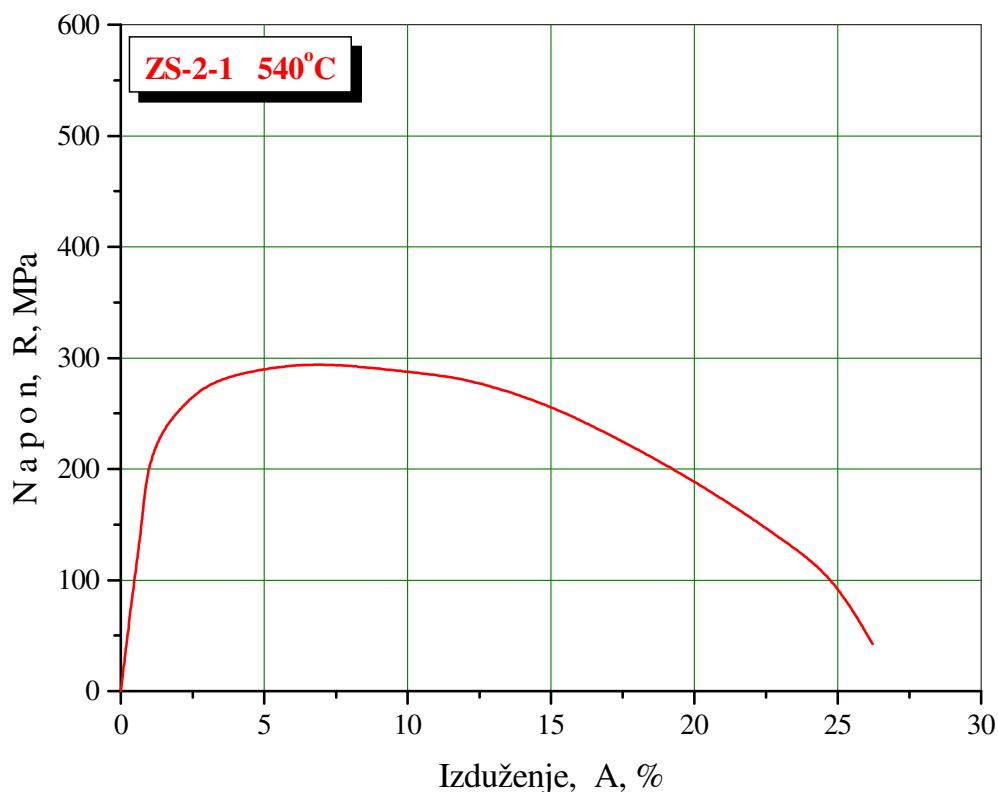
Oznaka uzorka	Temperatura ispitivanja, °C	Napon tečenja, $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje*, A, %	Mesto loma
ZS-1-1		295	451	19,2	Ekspl. OM
ZS-1-2	20	285	448	20,4	Ekspl. OM
ZS-1-3		291	454	19,7	Ekspl. OM
ZS-2-1		217	293	26,3	Ekspl. OM
ZS-2-2	540	205	285	25,6	Ekspl. OM
ZS-2-3		211	287	26,9	Ekspl. OM

* izmereno na $L_0 = 100\text{mm}$, kao uporedna veličina (ne kao svojstvo materijala).

Tipična kriva zatezanja napon-izduženje za epruvetu sučeono zavarenog spoja oznake ZS-1-1, ispitanu na sobnoj temperaturi data je na sl. 5.8, a za epruvetu oznake ZS-2-1, ispitanu na radnoj temperaturi data je na sl. 5.9.



Slika 5.8. Dijagram napon-izduženje epruvete zavarenog spoja oznake ZS-1-1



Slika 5.9. Dijagram napon-izduženje epruvete zavarenog spoja oznake ZS-2-1

Analizirajući rezultate zatezanja epruveta sučeono zavarenog spoja, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće, a povećanja izduženja, što se vidi na dijagramima prikazanim na sl. 5.8 i sl. 5.9. Sve epruvete su pukle u eksploatisanom OM, čime smo dobili i zatezne karakteristike eksploatisanog OM.

Vrednosti napona tečenja se kreću od 290MPa na 20°C, i opadaju do 211MPa na radnoj temperaturi od 540°C, dok vrednosti zatezne čvrstoće takođe opadaju od 451MPa dobijene na 20°C, do 288MPa dobijene ispitivanjem na 540°C. Izduženje raste sa povećanjem temperature ispitivanja, i kreće se od 19,8% na 20°C do približno 26,3% na 540°C.

5.4.2. Rezultati zateznih ispitivanja osnovnog materijala

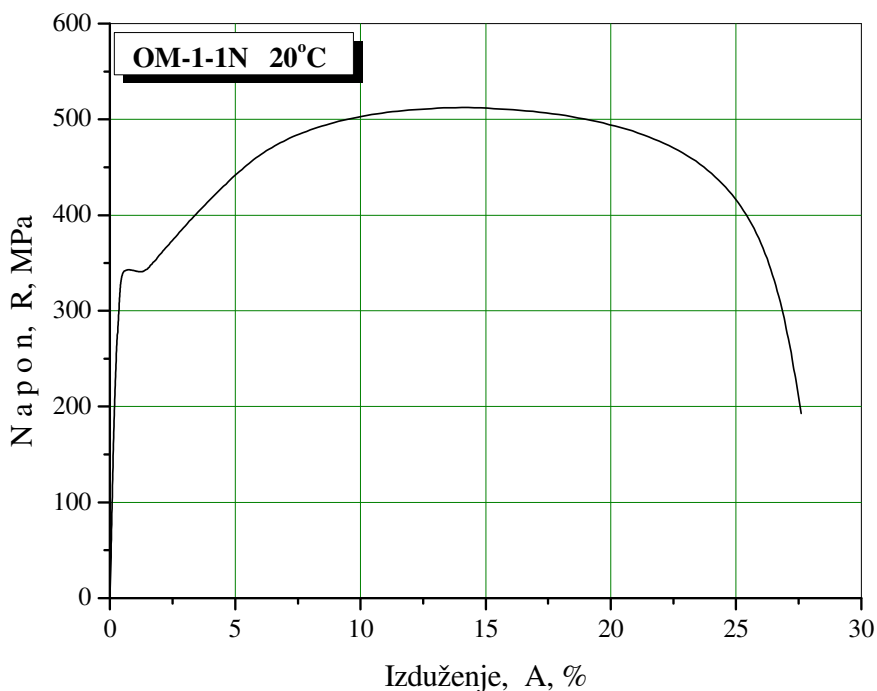
Rezultati ispitivanja epruveta novog OM na sobnoj i radnoj temperaturi su dati u tab. 5.6. Ispitivanja eksploatisanog OM nije rađeno, zato što su kod ispitivanja epruveta zavarenog spoja, sve ispitivane epruvete pukle u eksploatisanom OM, čime smo dobili karakteristike eksploatisanog OM.

Tabela 5.6. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta novog OM

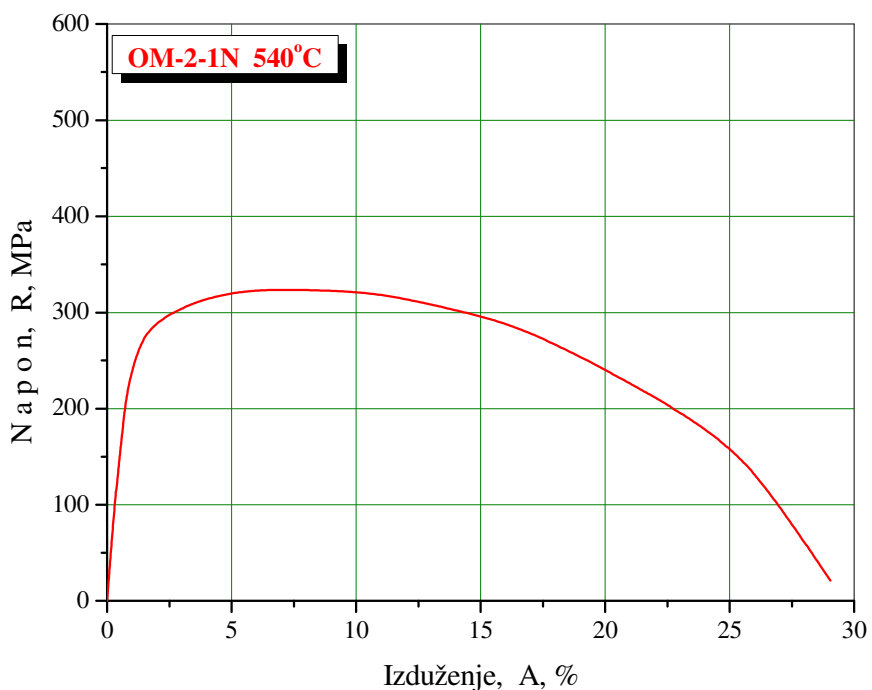
Oznaka uzorka	Temperatura ispitivanja, °C	Napon tečenja, $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje, A, %
OM-1-1N	20	342	513	27,5
OM-1-2N		339	505	28,3
OM-1-3N		335	498	28,6
OM-2-1N	540	251	323	29,1
OM-2-2N		242	316	30,8
OM-2-3N		247	320	30,4

Tipična kriva zatezanja napon-izduženje za epruvetu oznake OM-1-1N izvađenu iz novog OM i ispitana na sobnoj temperaturi od 20°C je data na sl. 5.10, a za epruvetu oznake OM-2-1N takođe izvađenu iz novog OM ali ispitana na radnoj temperaturi od 540°C je data na sl. 5.11.

Vidimo da se sa povećanjem temperature i vremena eksploatacije smanjuju vrednosti svojstava čvrstoće (napon tečenja i zatezna čvrstoće). Uticaj navedenih parametara na svojstva deformacije (izduženje) je nešto drugačiji, jer sa povećanjem temperature povećava se izduženje.



Slika 5.10. Dijagram napon-izduženje epruvete novog OM oznake OM-1-1N



Slika 5.11. Dijagram napon-izduženje epruvete novog OM oznake OM-2-1N

Dobijene vrednosti napona tečenja na 20°C, su oko 339MPa. Sa povećanjem temperature vrednost napona tečenja opada i kod novog OM je oko 247MPa.

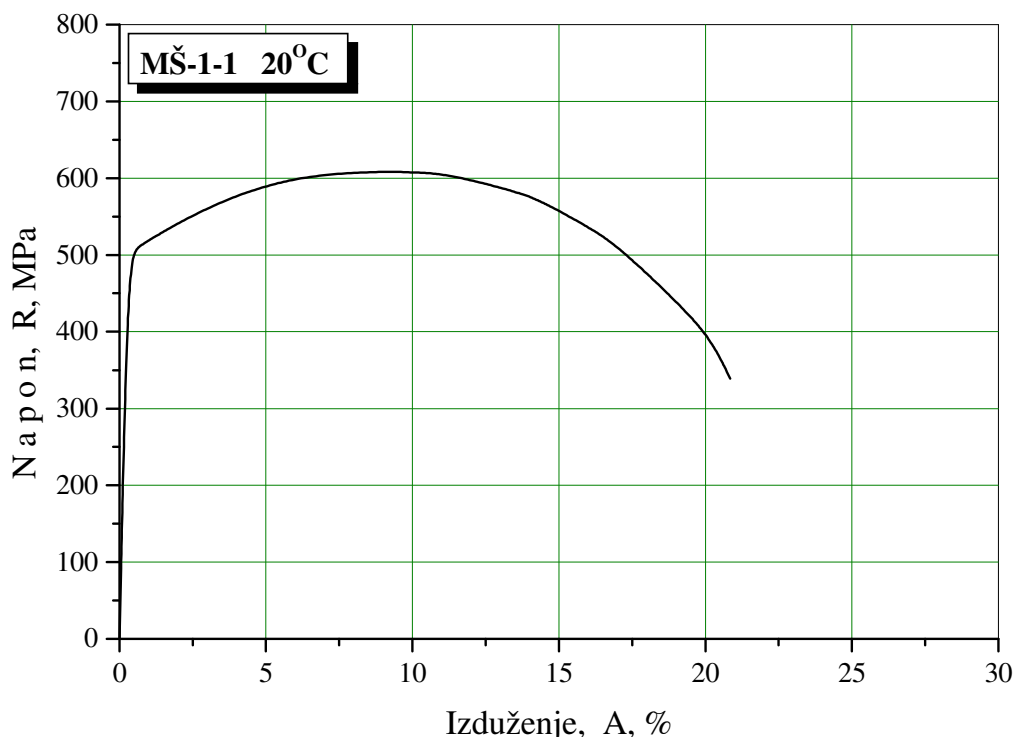
Zatezna čvrstoća ima istu tendenciju promene kao i napon tečenja. Dobijena vrednost zatezne čvrstoće kod novog OM je oko 505MPa na 20°C, dok sa povećanjem temperature vrednost zatezne čvrstoće opada na 320MPa. Vrednosti izduženja opadaju sa vremenom eksploatacije, a rastu sa povećanjem temperature i kreću se kod novog OM od 28,1% na 20°C i 30,1% na 540°C.

5.4.3. Rezultati zateznih ispitivanja metala šava

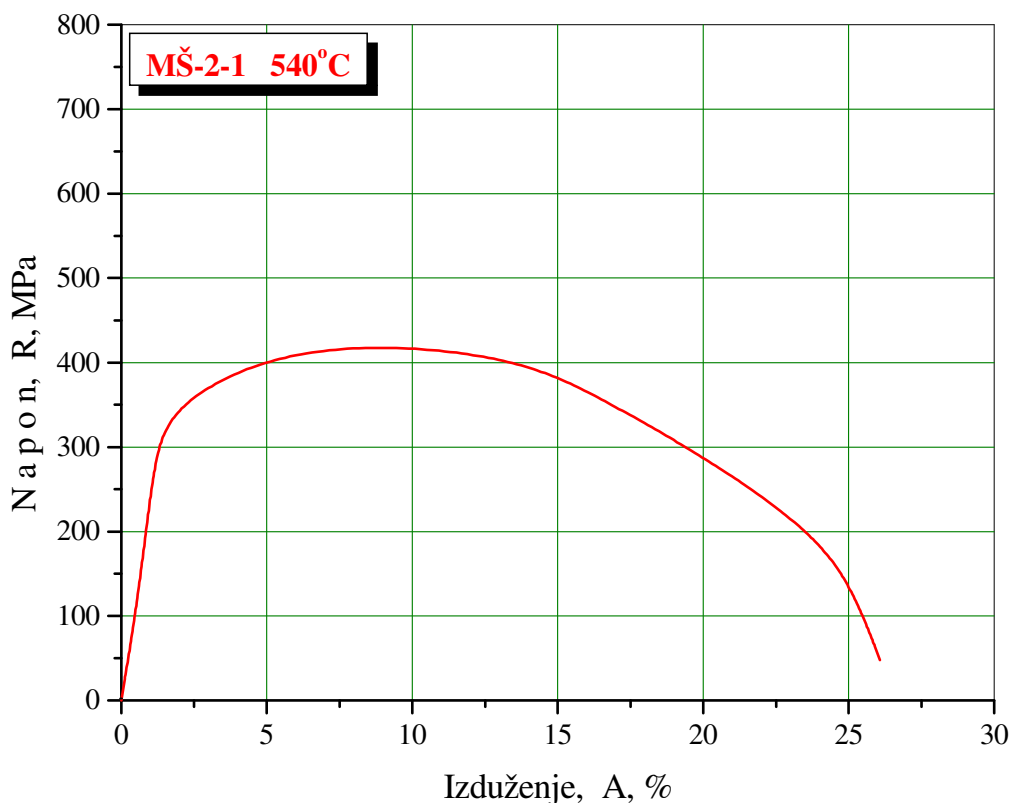
Rezultati ispitivanja epruveta metala šava (MŠ) ispitanih na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C su dati u tab. 5.7. Tipična kriva zatezanja napon-izduženje za epruvetu MŠ oznake MŠ-1-1, ispitanu na sobnoj temperaturi data je na sl. 5.12, a za epruvetu oznake MŠ-2-1, ispitanu na radnoj temperaturi data je na sl. 5.13.

Tabela 5.7. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta MŠ

Oznaka uzorka	Temperatura ispitivanja, °C	Napon tečenja, $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje, A, %
MŠ-1-1	20	518	611	20,9
MŠ-1-2		510	597	22,7
MŠ-1-3		514	605	21,3
MŠ-2-1	540	331	419	26,1
MŠ-2-2		319	406	27,3
MŠ-2-3		325	412	27,7



Slika 5.12. Dijagram napon-izduženje epruvete MŠ oznake MŠ-1-1



Slika 5.13. Dijagram napon-izduženje epruvete MŠ oznake MŠ-2-1

Ispitivanjem epruveta izvađenih iz MŠ, vidimo da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće, a povećanja izduženja. Dobijene vrednosti napona tečenja epruveta MŠ se kreću od 514MPa na 20°C, dok na temperaturi od 540°C padaju do 325MPa. Isto tako vrednosti zatezne čvrstoće se kreću od 604MPa dobijene na 20°C, do 412MPa dobijene ispitivanjem na 540°C. Izduženje raste sa povećanjem temperature ispitivanja i kreće se od 21,6% na 20°C do 27% na 540°C.

5.4.4. Diskusija zateznih ispitivanja

Uticaj temperature i vremena eksploatacije na zatezna svojstva čelika *A-387 Gr. B* namenjenih za izradu reaktora, odnosno posuda pod pritiskom koji rade u uslovima povišene temperature, je analiziran ispitivanjem epruveta izvađenih iz uzorka zavarenog spoja i novog i eksploatisanog osnovnog materijala (OM). Cilj ispitivanja je bio pre svega:

- ⇒ Određivanje svojstava čvrstoće (napona tečenja i zatezne čvrstoće) zavarenog spoja u celini (maksimalne sile kidanja) uvođenjem opterećenja poprečno na zavareni spoj.
- ⇒ Određivanje zateznih osobina (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje) novog i eksploatisanog OM.

Ispitivanjem epruveta zavarenog spoja uvođenjem opterećenja poprečno na zavareni spoj dobijeni su neophodni podaci kako izabrana tehnologija zavarivanja i vreme eksploatacije utiče na čvrstoću zavarenog spoja, kao i komponente zavarenog spoja. Dobijeni rezultati ispitivanja, tab. 5.5, ukazuju na to da su sve ispitivane epruvete pukle u eksploatisanom OM. Ovaj podatak je vrlo bitan, jer ukazuje na slabljenje OM koji je bio u eksploataciji. Lom epruveta u OM nam jasno ukazuje na karakter zavarenog spoja. U pitanju je "over-matching" što znači da je čvrstoća metala šava viša od čvrstoće osnovnog materijala. Rezultati poprečnog zatezanja epruveta zavarenog spoja ukazuju da sa

povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće, a povećanja izduženja, što se vidi u tab. 5.5.

Karakter dobijenih krivih zatezanja na sobnoj temperaturi odgovara duktilnom materijalu sa približnim učešćem homogenog i nehomogenog izduženja u odnosu 1/2:1/2, gde se pod homogenim izduženjem podrazumeva izduženje do maksimalne sile, a nehomogenim izduženjem izduženje od maksimalne sile do loma, znači od momenta kada se na epruveti stvara vrat, odnosno počinje nestabilni rast inicirane prsline u materijalu.

Kod ispitivanja na radnoj temperaturi imamo sličnu tendenciju promene osobina čvrstoće kao i kod ispitivanja na sobnoj temperaturi, ali se razlika javlja kod svojstava deformacije (izduženja). Naime, ovde imamo slučaj da je odnos homogenog i nehomogenog izduženja približno 1/4:3/4, što je dosta nepovoljno sa aspekta eksploatacionih osobina. Rezerva homogene plastičnosti materijala je dosta manja, pa je i opasnost po OM od posledica eventualnog lošeg rada postrojenja realna.

Analizirajući dobijene rezultate ispitivanja zatezanjem na sobnoj temperaturi epruveta izvađenih iz uzorka novog OM datih u tab. 5.6, može se konstatovati da su rezultati ispitivanja novog OM u granicama standardom propisanih vrednosti za taj materijal, odnosno vrednosti koje je dao proizvođač u atestnoj dokumentaciji. Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće novog OM dat je u tab. 5.6. I ovde se jasno vidi opadanje svojstava čvrstoće, i rast svojstava deformacije sa porastom temperature ispitivanja. Međutim, kao i kod epruveta zavarenog spoja, povećanje izduženja je praćeno fenomenom promene odnosa homogenog i nehomogenog izduženja.

Dobijeni rezultati zateznih ispitivanja MŠ potvrđuju pravilno izabranu tehnologiju zavarivanja, odnosno parametre zavarivanja. Napon tečenja i zatezna čvrstoća zadovoljavaju standardom propisane vrednosti, dok su osobine deformacije znatno bolje od onih sadržanim u standardu za ovaj dodatni materijal [72]. Ova pojava ukazuje na kvalitetno izabran režim termičke obrade posle zavarivanja.

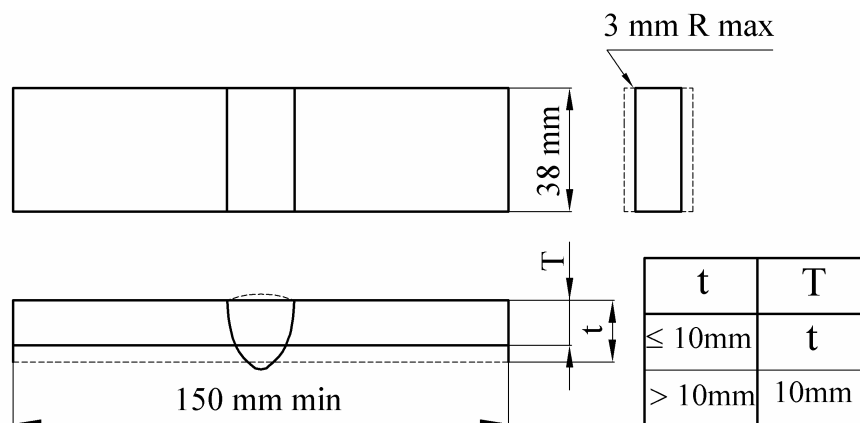
Ponašanje ZUT u opterećenom zavarenom spoju je uslovljeno njenim malim zapreminskim udelom, kao i heterogenošću strukture i različitim mehaničkim osobinama pojedinih područja ZUT. Dobro izveden zavareni spoj, projektovan po principu veće čvrstoće MŠ, pri ispitivanju zatezanjem treba da se pokida u OM, što se kod predmetnih ispitivanja i desilo.

Generalno, na osnovu dobijenih rezultata zateznih osobina epruveta izvađenih iz zavarenog spoja, novog OM i MŠ na izabranim temperaturama, može se zaključiti da je dobijeno smanjenje osobina čvrstoće, odnosno, napona tečenja i zatezne čvrstoće sa porastom temperature. Isto tako, sa porastom temperature ispitivanja dolazi do porasta izduženja. Povećanje izduženja sa porastom temperature se objašnjava povećanom ukupnom plastičnošću materijala na višim temperaturama, ali isto tako i znatno nepovoljnijim odnosom homogenog i nehomogenog izduženja.

Takođe, vreme eksploatacije značajno utiče na smanjenje i osobine čvrstoće i osobine deformacije, što se može dovesti u vezu sa mikrostrukturama eksploatacionog i novog OM, koje su prikazane na sl. 5.20 i 5.21. Bez obzira što oba osnovna metala pokazuju ravnomernu strukturu, koja pored svetlih poligonalnih kristala ferita, sadrži i transformisane oblasti, osnovna razlika između novog i starog materijala je u veličini zrna. Novougrađeni osnovni metal ima strukturu sa veličinom zrna 5 prema ASTM skali, dok eksploatacioni materijal ima strukturu sa veličinom zrna 3 prema ASTM skali. Ova posledica povećanja zrna je rezultat delovanja povišene temperature i pritiska u dugom vremenskom periodu.

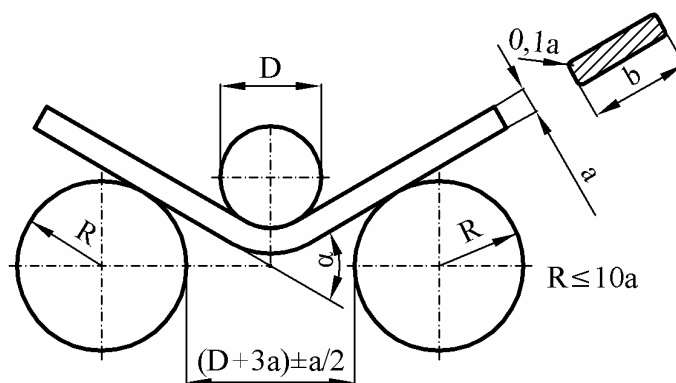
5.5. ISPITIVANJE SAVIJANJEM

Ispitivanje tehnoloških proba savijanjem sučeono zavarenog spoja je rađeno sa ciljem da se utvrdi sposobnost čelika da se deformiše savijanjem oko zavarenog spoja. Postupak ispitivanja, kao i same epruvete na kojima se vrši ispitivanje savijanjem sučeono zavarenog spoja definisani su standardom EN 910: Sučeono zavareni spojevi na metalnim materijalima -Ispitivanje savijanjem (Welded butt joints in metallic materials-Bend test) [65]. Epruvete, čija geometrija je data na sl. 5.14 su savijane oko lica (L) zavarenog spoja i oko korenog dela (K) zavarenog spoja pomoću trna prečnika $4a$ sa uglom savijanja do 180° .



Slika 5.14. Epruveta za poprečno savijanje sučeono zavarenog spoja lima (lice ili koren metala šava)

Schema postupka ispitivanja savijanjem u tri tačke je data na sl. 5.15. Samo ispitivanje je izvedeno na mehaničkoj kidalici AMSLER u kontroli hoda, sl. 5.16.



Slika 5.15. Shema ispitivanja savijanjem

Geometrijske karakteristike značajne za ispitivanje savijanjem su:

$L_0 = 300\text{mm}$, dužina epruvete;

$a = 15\text{mm}$, debljina epruvete;

$b = 40\text{mm}$, širina epruvete;

$D = 60\text{mm}$, prečnik trna;

$R = 25\text{mm}$, poluprečnik valjaka (oslonaca), i

$D + 3a = 60 + 3 \cdot 15 = 105\text{mm}$, rastojanje valjaka.



Slika 5.16. Mehanička kidalica "Amsler"

Rezultati ispitivanja na savijanje epruveta sučeono zavarenog spoja dati su u tab. 5.8.

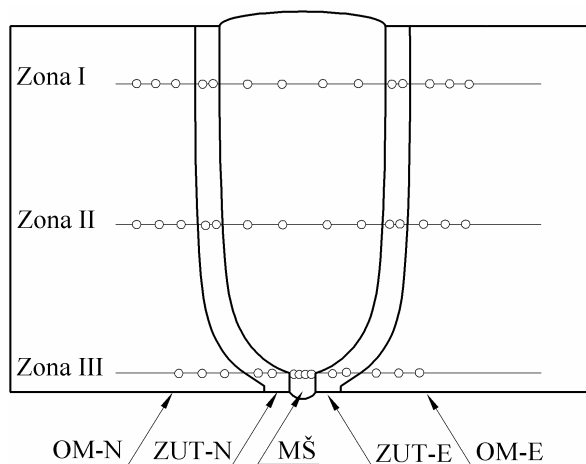
Tabela 5.8. Rezultati ispitivanja na savijanje sučeono zavarenog spoja

Oznaka uzorka	Max. ugao savijanja, °	Mesto pojave prsline
ZS-L-1	180	nema prsline
ZS-L-2	180	nema prsline
ZS-K-1	180	nema prsline
ZS-K-2	180	nema prsline

Rezultati ispitivanja epruveta izvađenih iz zavarenih limova savijanjem, tab. 5.8, ukazuju na kvalitetno izvedeno zavarivanje, jer pri dostizanju ugla savijanja od 180° nije došlo do pojave prsline. Na osnovu rezultata ispitivanja i njihove analize možemo zaključiti da je izabrana tehnologija zavarivanja dobra i da su svi rezultati ispitivanja dostavljenog uzorka zadovoljavajući.

5.6. MERENJE TVRDOĆE

Merenje tvrdoće sučeono zavarenog spoja eksploatisanog i novog OM je rađeno prema standardu EN 1043 [57]. Korišćena je Vickers metoda, a primenjeno opterećenje je bilo HV30. Tvrdoća je merena linijski Novi OM-Novi ZUT-MŠ-Eksploatisani ZUT-Eksploatisani OM, kako je to shematski prikazano na sl. 5.17.



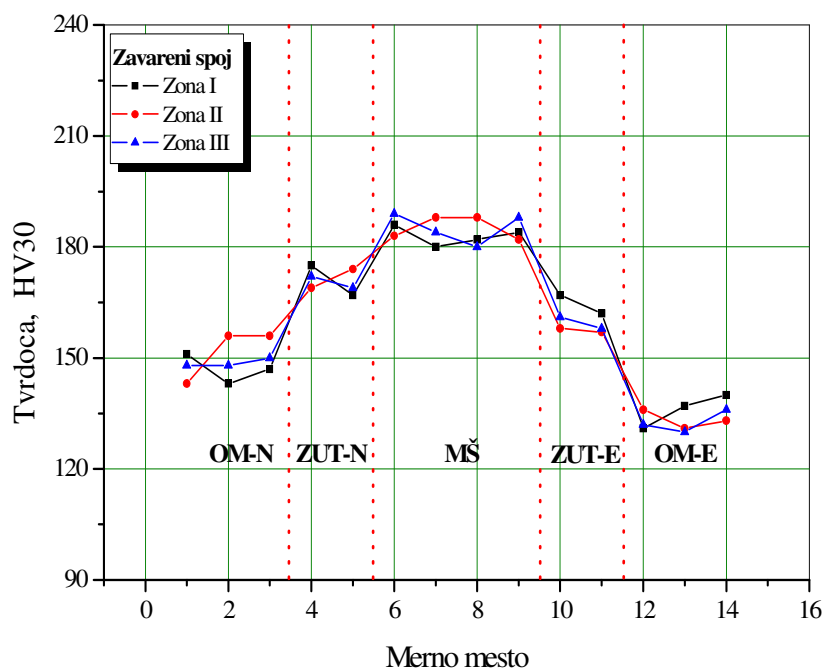
Slika 5.17. Shema merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju

Rezultati merenja tvrdoće sučeono zavarenog spoja novog i eksploatisanog OM dati su u tab. 5.9, a prikazani su i grafički, na sl. 5.18.

Tabela 5.9. Rezultati merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju

Mesto merenja	Tvrdoća HV 30													
	OM-N			ZUT-N		MŠ				ZUT-E		OM-E		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zona I	151	143	147	175	167	186	180	182	184	167	162	131	137	140
Zona II	143	156	156	169	174	183	188	188	182	158	157	136	131	133
Zona III	148	148	150	172	169	189	184	180	188	161	158	132	130	136

Analizirajući dobijene vrednosti tvrdoće prikazanih u tab. 5.9, kao i njihovoj grafičkoj interpretaciji na sl. 5.18, jasno se vidi da su najveće izmerene vrednosti tvrdoće u MŠ. Idući od MŠ preko ZUT ka OM, tvrdoća beleži postepen pad.



Slika 5.18. Grafički prikaz rezultata merenja tvrdoće na sučeono zavarenom spoju novog i eksploatisanog OM

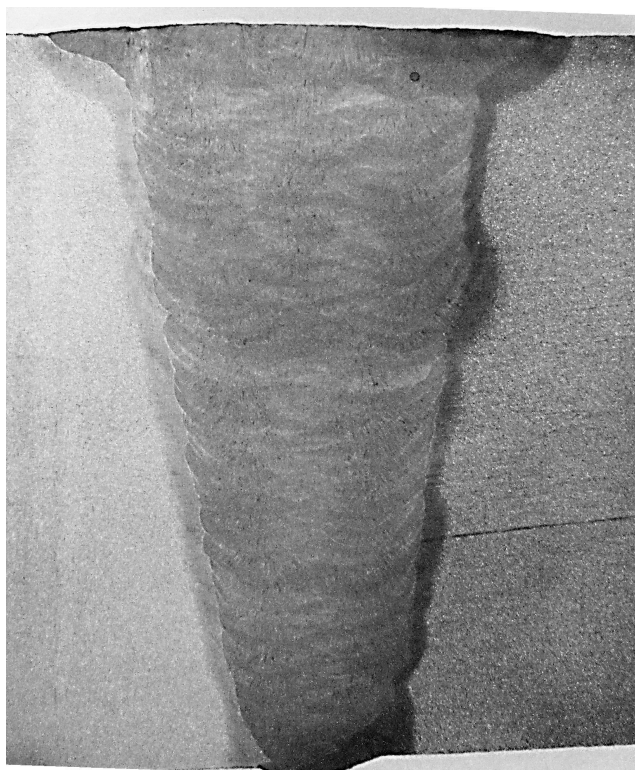
Izmerene vrednosti tvrdoće sučeono zavarenog spoja se kreću od 180 do 189HV u MŠ. U ZUT su dobijene nešto niže vrednosti nego u MŠ. Jasno se razlikuju zone ZUT sa strane novog i sa strane eksploatisanog OM. Veća izmerena tvrdoća je u ZUT sa strane novog OM i dobijene vrednosti se kreću od 167 do 175HV, a u ZUT sa strane eksploatisanog OM se kreću od 157 do 167HV. Različite vrednosti tvrdoće su konstatovane i kod novog i eksploatisanog OM. Naime, izmerene vrednosti tvrdoće novog OM se kreću od 143 do 156HV, dok kod eksploatisanog OM se kreću od 131 do 140HV.

5.7. MAKRO I MIKROSTRUKTURNA ISPITIVANJA

Za uspešnu primenu čelika *A-387 Gr. B* i njegovu maksimalnu otpornost na puzanje, zahtevaju se garantovane mehaničke osobine na povišenim temperaturama, kao i otpornost na puzanje na radnim temperaturama u toku perioda eksploatacije koji može biti i duži od 150000 sati. Ove osobine čelika se postižu adekvatnom termičkom obradom, koja treba da obezbedi strukturu koja se sastoji od ferita i beinita. Veoma fini karbidi, koji počinju da se talože pri ovakvom termičkom tretmanu, izdvajaju se po granici zrna ali i unutar zrna što se može videti samo pri velikim uvećanjima [73, 74].

Precipitacija karbida, koja započinje tokom termičkog tretmana radi uklanjanja zaostalog naprezanja, se nastavlja tokom eksploatacije na radnim temperaturama i radnim pritiscima [75, 76]. Ova pojava krutih faza se može konstatovati metalografskom analizom pri većim uvećanjima.

Ova ispitivanja su rađena sa ciljem da se da ocena vremena eksploatacije osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja na promenu mikrostrukturnih osobina. Makro snimak sučeono zavarenog spoja novog OM i eksploatisanog OM je dat na sl. 5.19.



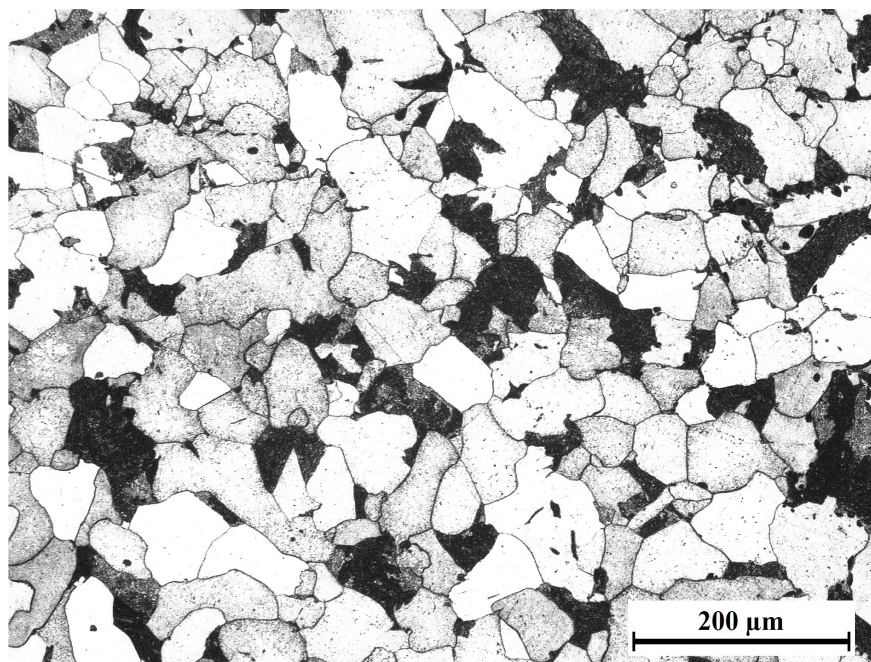
Slika 5.19. Makrosnimak zavarenog spoja

Posle nagrizanja sučeono zavarenog spoja jasno se razlikuju:

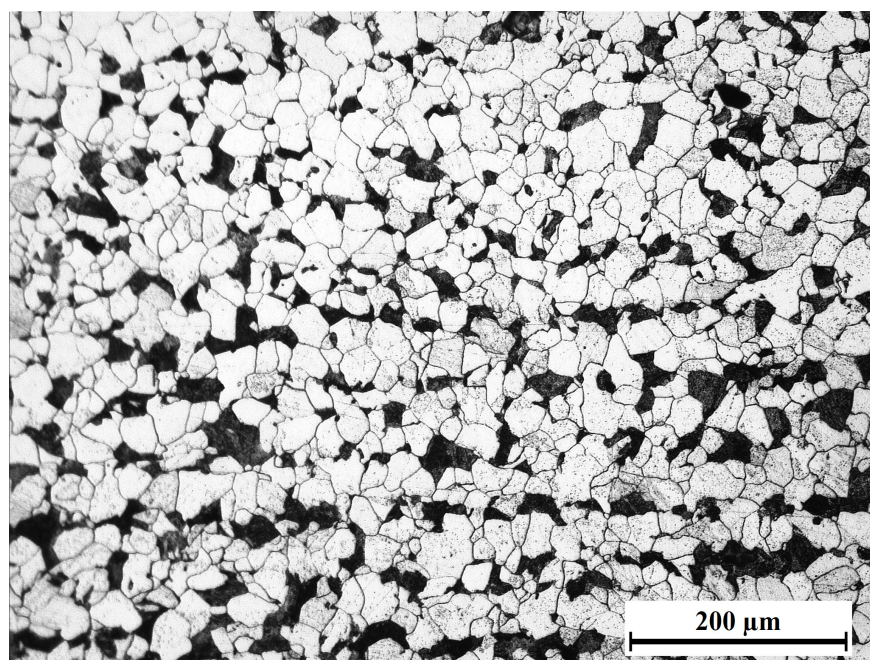
⇒ novi i eksploatisani osnovni metal;

- ⇒ zona uticaja toplote sa strane novog i eksploatisanog OM, i
- ⇒ metal šava u okviru koga je izražena zona popune žleba.

Oba osnovna metala pokazuju ravnomernu strukturu, koja pored svetlih poligonalnih kristala ferita, sadrži i transformisane oblasti čiji detalji mogu biti analizirani pri većim povećanjima. Te transformisane oblasti predstavljaju tamne površine perlita, koji izgleda kao kompaktan tamni mikrokonstituent. Na sl. 5.20 je prikazana mikrostruktura OM koji je bio u eksploataciji preko 30 godina, a na sl. 5.21 mikrostruktura novog OM. Razlika između novog i eksploatisanog materijala je u veličini zrna. Novougrađeni osnovni metal ima strukturu sa veličinom zrna 5 prema ASTM skali, dok eksploatisani materijal ima strukturu sa veličinom zrna 3 prema ASTM skali.



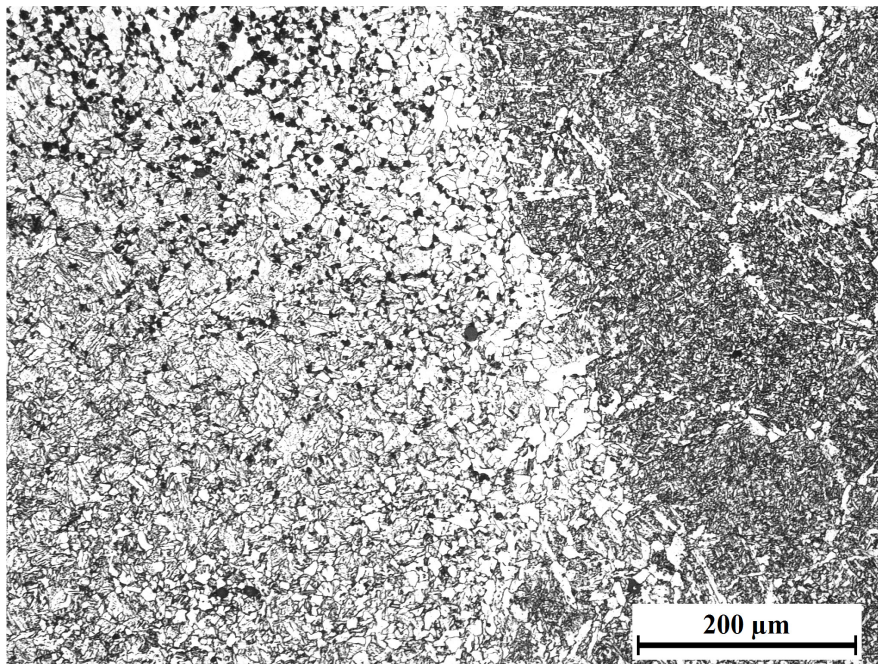
Slika 5.20. Mikrostruktura eksploatisanog OM, feritno-perlitna struktura



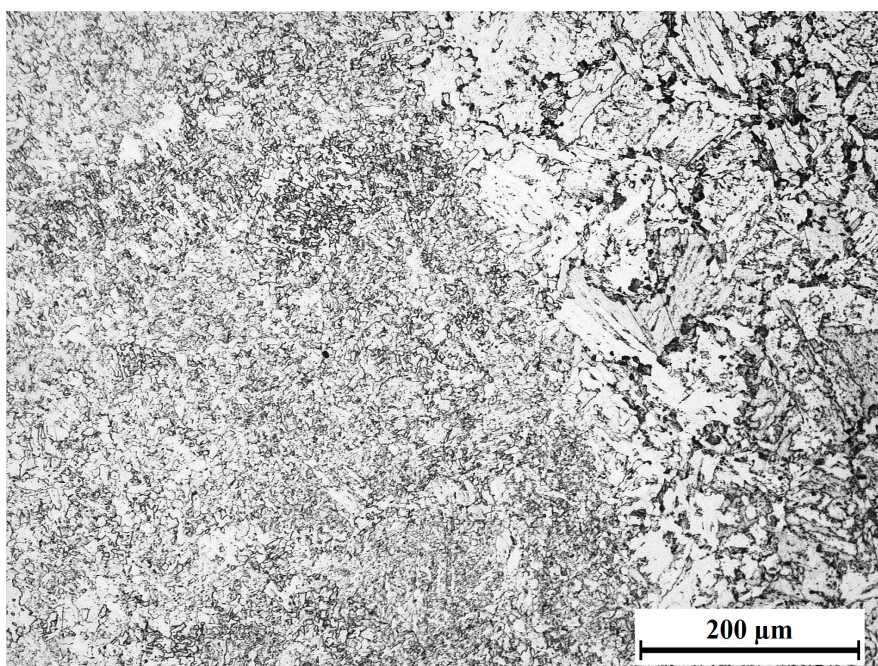
Slika 5.21. Mikrostruktura novog OM, feritno-perlitna struktura

Očigledno je da pri povećanjima do 100x nije moguće zapaziti suštinsku razliku između materijala koji je bio u eksploataciji i novog materijala, osim razlike u veličini zrna koja je posledica vremena eksploatacije.

Mikrostruktura u zoni uticaja toplote sa strane eksploatisanog i novog OM je data na sl. 5.22 i 5.23 respektivno. Sastoji se od ferita, beinita i perlita. Beinit u zoni uticaja toplote, nastaje kao posledica veće brzine hlađenja dela osnovnog metala koji je u toku zavarivanja bio zagrejan na temperaturu austenitizacije. Sadržaj beinita opada sa porastom rastojanja od linije spoja.

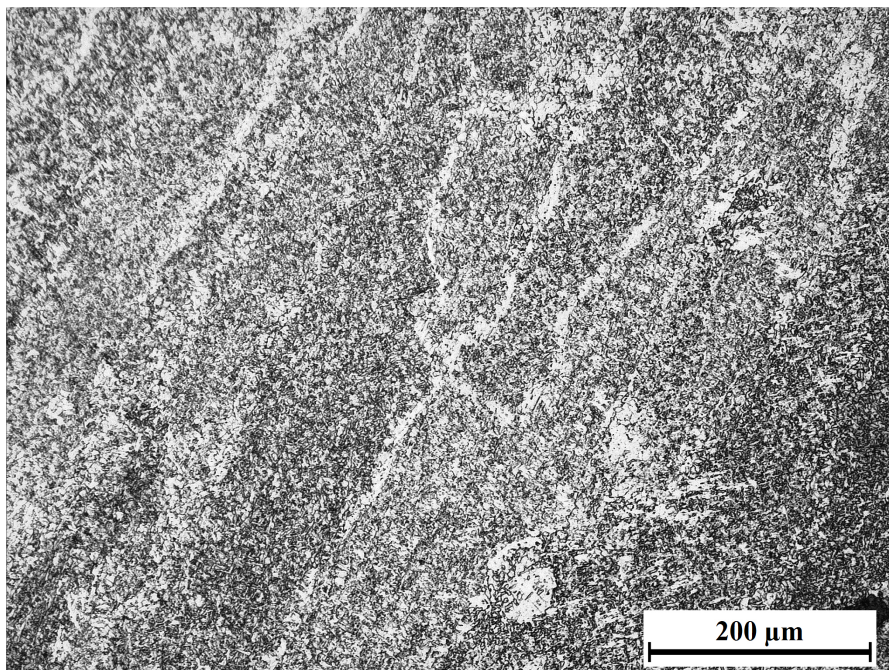


Slika 5.22. Mikrostruktura ZUT sa strane eksploatisanog OM
ZUT zona (levo), linija stapanja (LS) i metal šava (MŠ)



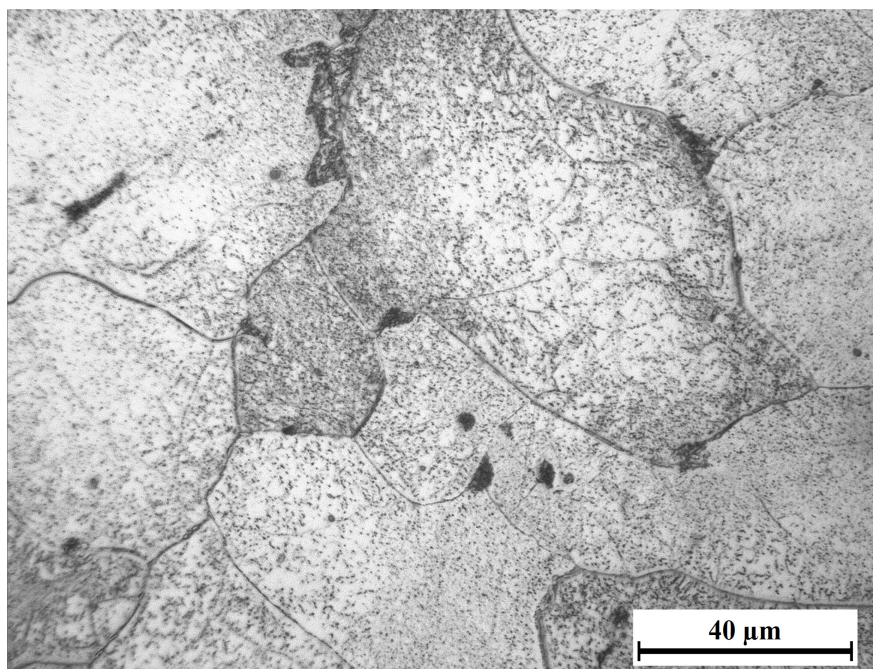
Slika 5.23. Mikrostruktura ZUT sa strane novog OM
ZUT zona (desno), linija stapanja (LS) i metal šava (MŠ)

Struktura metala šava gde su prisutni krupni dendriti nastali kao posledica veličine livačkog kupatila zbog dimenzija zavarenih ploča prikazana je na sl. 5.24.

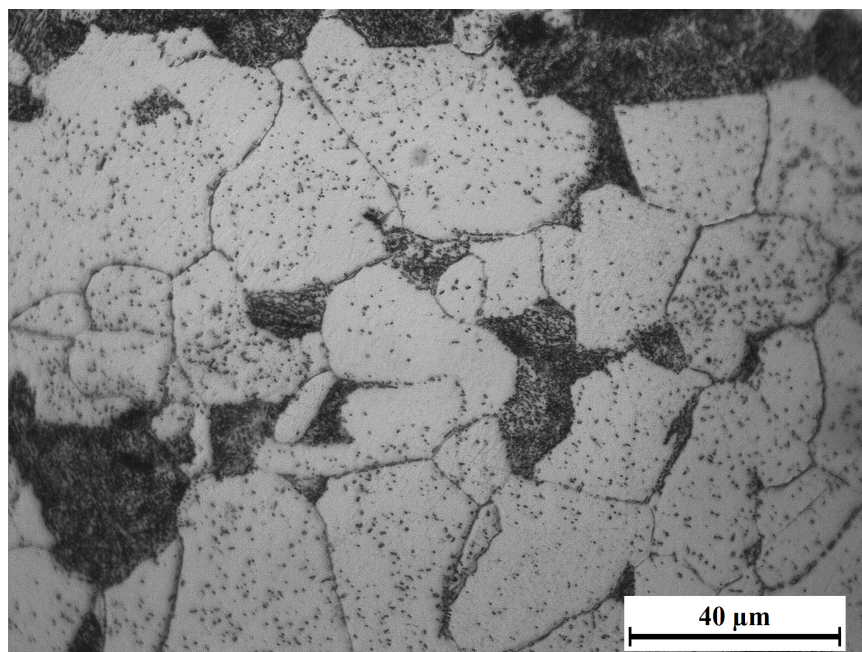


Slika 5.24. Mikrostruktura MŠ, dendritna struktura metala šava

Veća povećanja (500x i više), su omogućila da se otkriju razlike u strukturnim karakteristikama eksploatisanog i novog OM. Naime, period eksploatacije od blizu 40 godina je uticao na značajno prisustvo karbida na granicama i unutar zrna, sl. 5.25. Količina karbida u novom OM značajno je manja i karbidi su sitniji, sl. 5.26. Količina izdvojenih karbida po granici zrna, ali i unutar samog zrna, je posebno značajna kod ponašanja OM u uslovima delovanja promenljivog opterećenja.



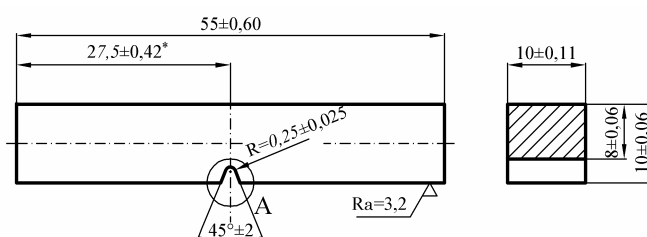
Slika 5.25. Mikrostruktura eksploatisanog OM
krupna svetla zrna ferita, tamno beinit, karbid po granicama i unutar zrna



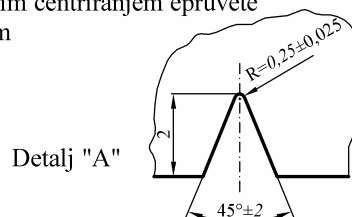
Slika 5.26. Mikrostruktura novog OM
krupna svetla zrna ferita, tamno beinit, količina karbida po granicama i unutar zrna minimalna

5.8. UDARNA ISPITIVANJA

Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala, kao i njegove obrade. Ovim postupkom ispitivanja može se utvrditi sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije (starenje) [63]. Udarna ispitivanja epruveta sa zarezom u novom i eksploatisanom osnovnom metalu (OM), metalu šava (MŠ) i zoni uticaja toplote (ZUT), sa strane eksploatisanog OM i sa strane novog OM, 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. 5.27, je definisan standardom EN 10045-1 [58], odnosno ASTM E23-02 [59].

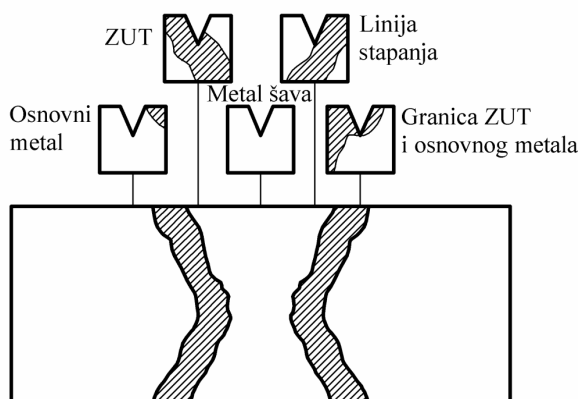


*) Za klatna sa automatskim centriranjem epruvete preporučuje se $\pm 0,165$ mm



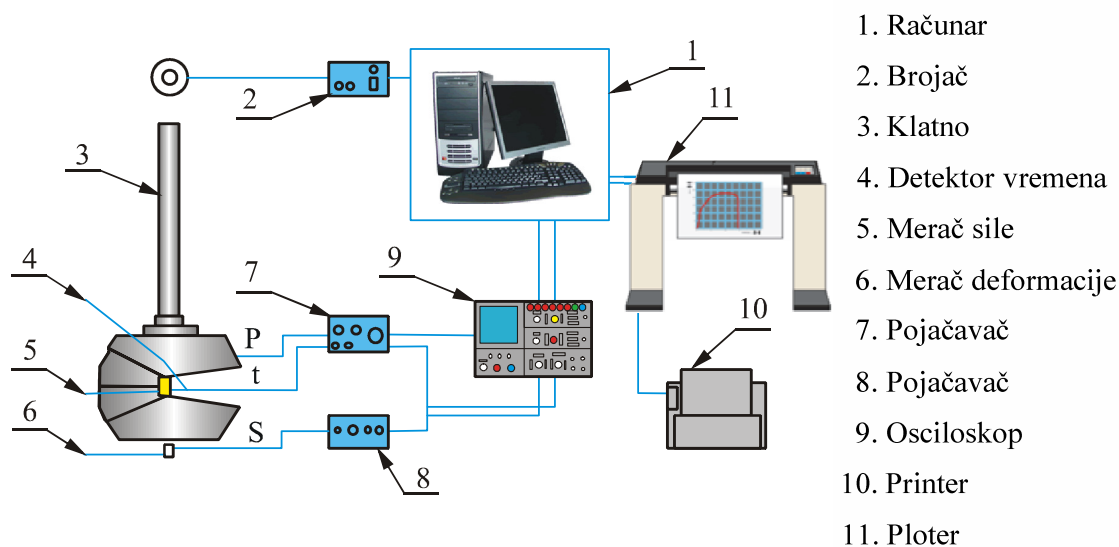
Slika 5.27. Oblik i dimenzije standardne epruvete za ispitivanje metodom po Šarpiju sa V-zarezom [59]

Položaj zarez u odnosu na zavareni spoj je definisan standardom EN 875 [60], sl. 5.28. 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 5.28. Položaj zarez u odnosu na zavareni spoj [60]

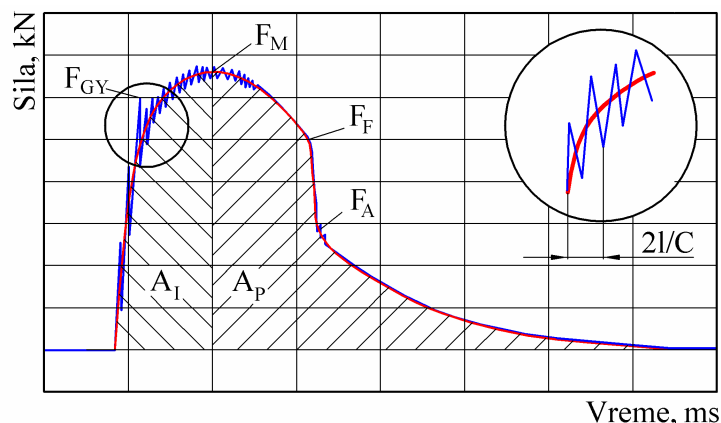
Pri ispitivanju savojnim udarnim opterećenjem energija loma određuje se kao integralna veličina. Tako određena energija loma ne daje mogućnost razdvajanja na energiju stvaranja, odnosno energiju širenja prsline. Da bi se to postiglo udarna sila i vreme treba da budu kontinualno registrovani tokom ispitivanja, što je moguće izvesti instrumentiranjem klatna. Shema savremenog instrumentiranog klatna je data na sl. 5.29 [61].



Slika 5.29. Shematski prikaz savremenog instrumentiranog klatna [61]

Iz priložene šeme je vidljivo da instrumentiranje klatna obuhvata povezivanje merača sile, koji je instaliran u čekić klatna, detektora vremena loma i merača deformacije preko pojačavača sa osciloskopom. Kako je lom epruvete izazvan udarom, kratkotrajna pojava (0,5-12ms), to je uloga osciloskopa da registrovane signale učini vidljivim. Osciloskop se zatim povezuje sa računarom radi obrade dobijenih signala pri merenju.

Praćenje 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. Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom, odnosno dobijanje dijagrama sila-vreme, sl. 5.30 [61].



Slika 5.30. Tipičan dijagram sila-vreme dobijen na instrumentiranom klatnu [61]

Tako dobijen dijagram sila-vreme, sl. 5.30, 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, i

F_A - sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline.

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

Definisane sile na sl. 5.30 odgovaraju deformacijama koje nose iste indekse kao i ove sile:

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, i

s_T - deformacija na kraju krive sila-deformacija, pri čemu je kraj ove sile definisan kao $0,02F_M$.

Iz dijagrama sila-vreme, sl. 5.30, moguće je izračunati energiju A , potrebnu za lom uzorka:

$$A = \int_0^{t_1} F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

gde je:

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

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

t - vreme trajanja loma.

Da bi se povećala sposobnost prikaza energije udara, ova 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 . Ugib se proračunava dvostrukom integracijom:

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

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

Za celovitiju 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.

Najprihvatljiviji postupak određivanja energije širenja prsline je preko "zamorne prsline". Suština ovog postupka je u tome da se na epruvetama sa V-zarezom izaziva zamorna prsline, pa se takva epruveta lomi na Šarpi klatnu i energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline, A_P . Ukoliko je poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala, onda može da se izračuna deo energije potrebne za stvaranje prsline, A_I :

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

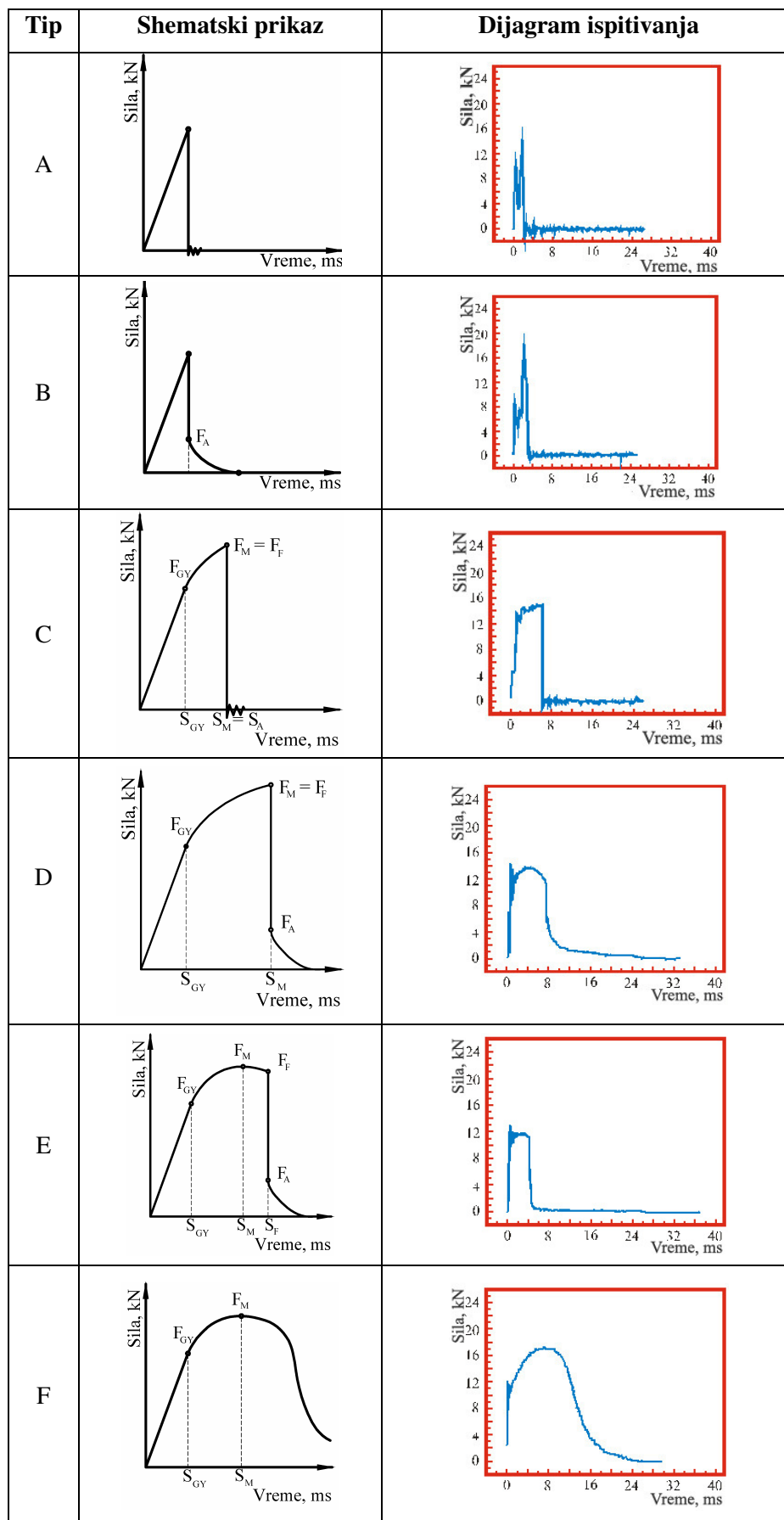
Određivanje energije stvaranja i energije širenja prsline po ovoj metodi obavlja se na jednom uzorku (za razliku od drugih postupaka), što daje veću tačnost. Na dijagramu sila-vreme, sl. 5.30, obeležene su površine A_I i A_P koje su proporcionalne energijama stvaranja i širenja prsline. Dva materijala koja imaju jednake vrednosti ukupne energije loma udarom, mogu da imaju različite energije stvaranja i širenja prsline. S tačke gledišta sigurnosti konstrukcije bolji je onaj materijal koji ima malu energiju stvaranja prsline, a veliku energiju širenja prsline. U zavisnosti od vrste ispitivanog materijala, temperature ispitivanja, režima termičke obrade, ispitivanjem na instrumentiranom klatnu mogu da se dobiju različiti tipovi zavisnosti sila-vreme, odnosno sila-ugib. Na osnovu krivih sa sl. 5.31 možemo odrediti kom tipu ponašanja pri lomu pripadaju ispitani uzorci (A do F) [62].

Tipovi A i B odgovaraju krtom ponašanju materijala. Ako 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:

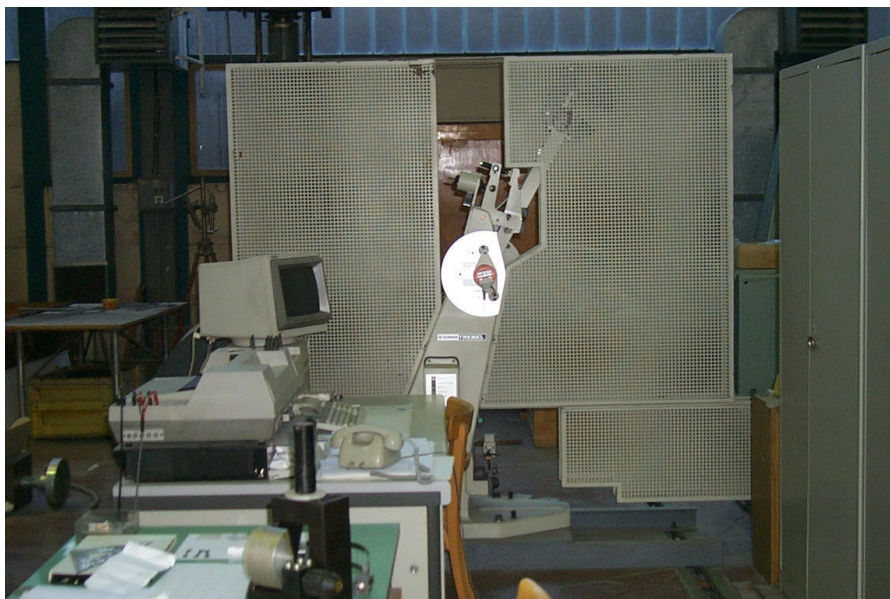
$$\%DL = \left(1 - \frac{F_F - F_A}{F_M} \right) \cdot 100 \quad (5.5)$$

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

Udarna ispitivanja epruveta sučeono zavarenog spoja sa zarezom u eksploatisanom i novom OM, MŠ i ZUT sa strane eksploatisanog OM i sa strane novog OM rađena su na sobnoj temperaturi od 20°C, i radnoj temperaturi od 540°C. Samo ispitivanje je rađeno na instrumentiranom Šarpi klatnu SCHENCK TREBELL 150/300 J, sl. 5.32.



Slika 5.31. Tipovi dijagrama dobijeni ispitivanjem instrumentiranim klatnom [62]



Slika 5.32. Instrumentirano Šarpi klatno SCHENCK TREBELL 150/300 J

Kako su ispitivanja eksploitanog i novog OM, kao i komponenti zavarenog spoja rađena na instrumentiranom Šarpijevom klatnu sa osciloskopom, i pri čemu su dobijena dva tipa dijagrama, sila-vreme i energija-vreme, to je bilo moguće dati ocenu kako temperatura ispitivanja i vreme eksploatacije utiču na vrednosti energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , kao integralnih komponenti ukupne energije udara, A_{uk} .

5.8.1. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta OM

Određivanje energije udara je rađeno na epruvetama novog OM i epruvetama eksploitanog OM čelika kvaliteta A-387 Gr. B. Rezultati ispitivanja novog i eksploitanog OM na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C su dati u tab. 5.10 i 5.11.

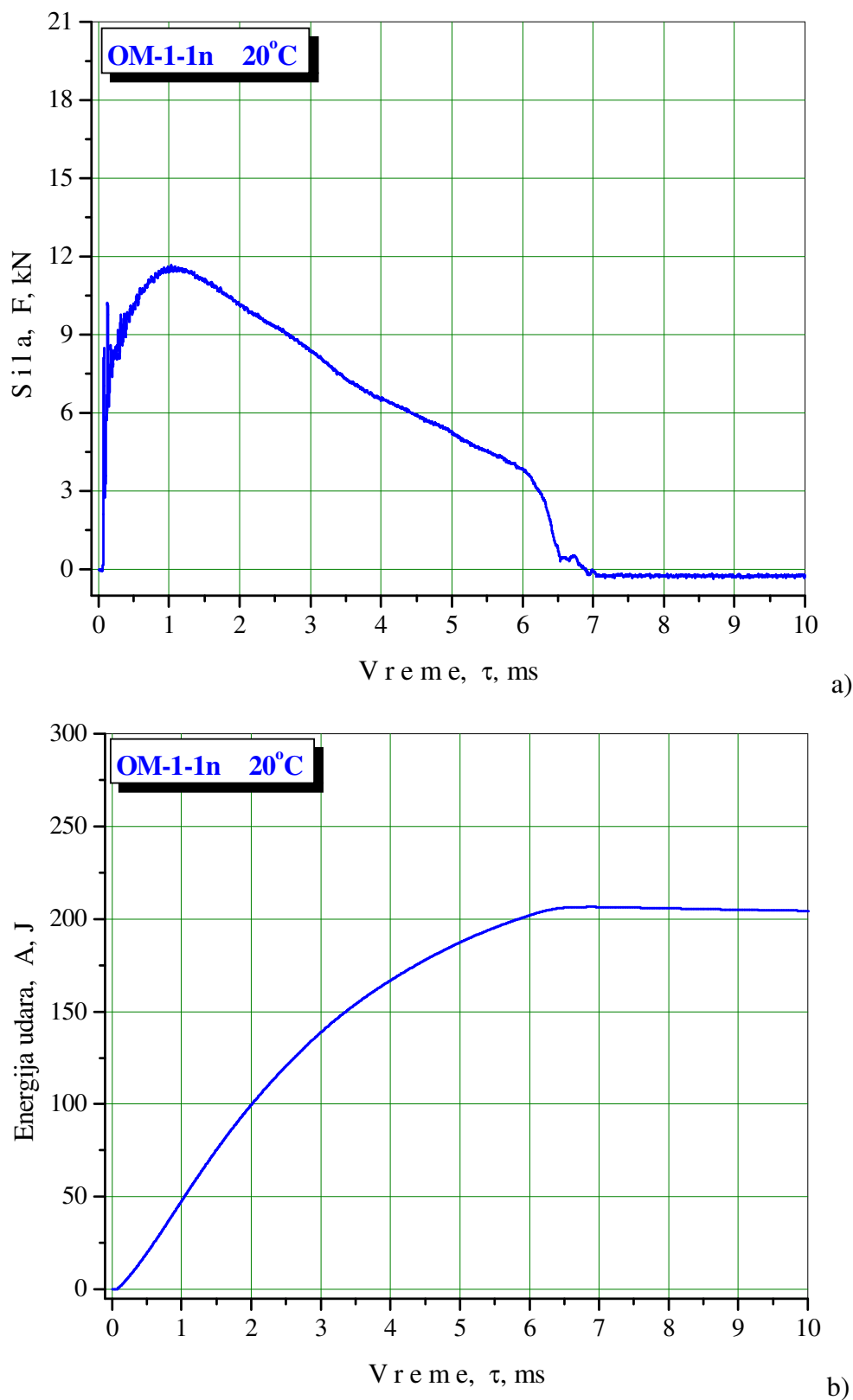
Tabela 5.10. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u novom OM

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J
OM-1-1n	20	204	47	157
OM-1-2n		212	49	163
OM-1-3n		214	49	165
OM-2-1n	540	137	38	99
OM-2-2n		139	40	99
OM-2-3n		145	41	104

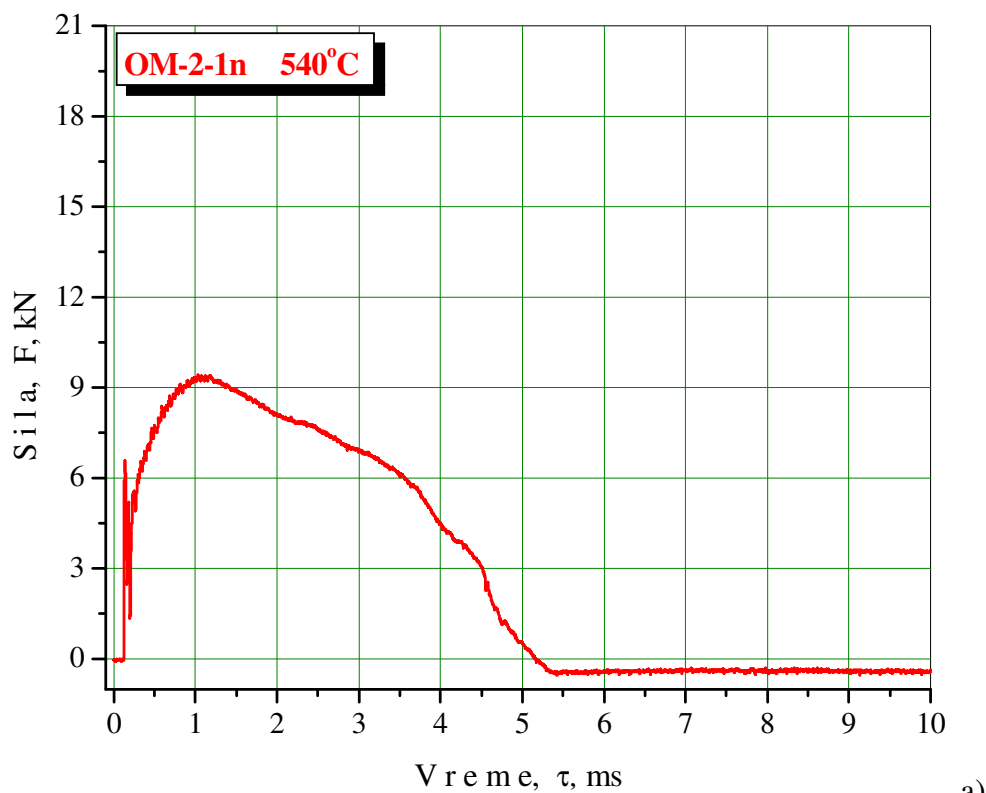
Tabela 5.11. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploitanom OM

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J
OM-1-1e	20	93	48	45
OM-1-2e		92	44	48
OM-1-3e		100	45	55
OM-2-1e	540	79	33	46
OM-2-2e		75	31	44
OM-2-3e		81	32	49

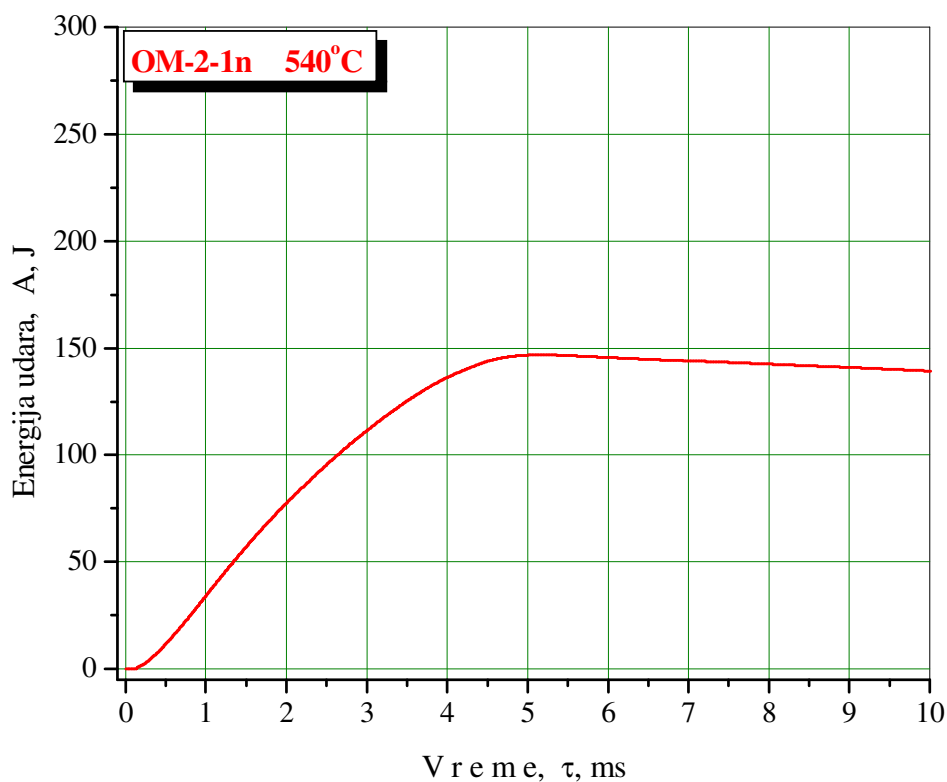
Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem na sobnoj temperaturi epruvete oznake OM-1-1n sa V-zarezom u novom OM su dati na sl. 5.33, a za epruvetu oznake OM-2-1n ispitivanu na radnoj temperaturi na sl. 5.34.



Slika 5.33. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-1-1n
a) sila-vreme, b) energija-vreme



a)

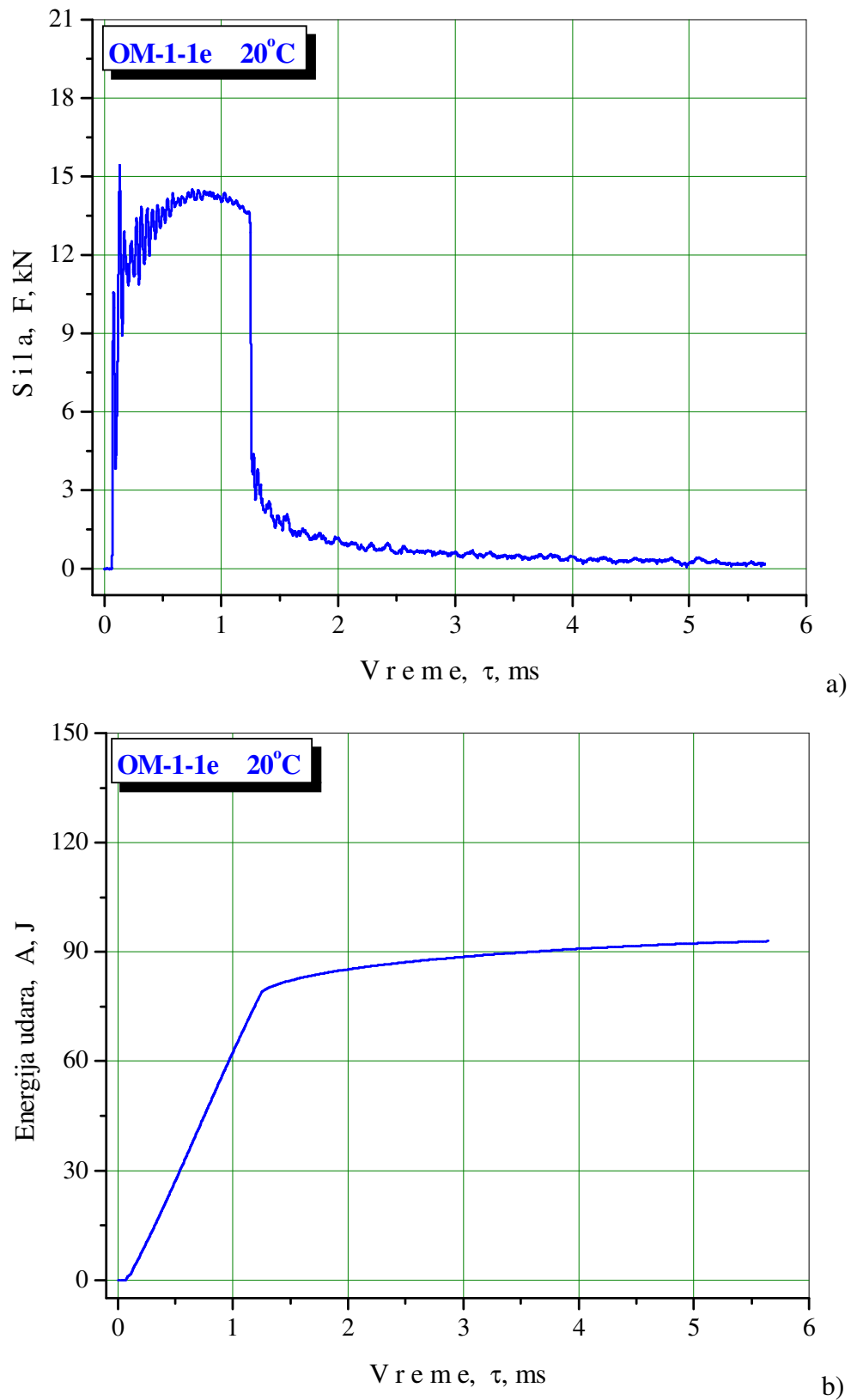


b)

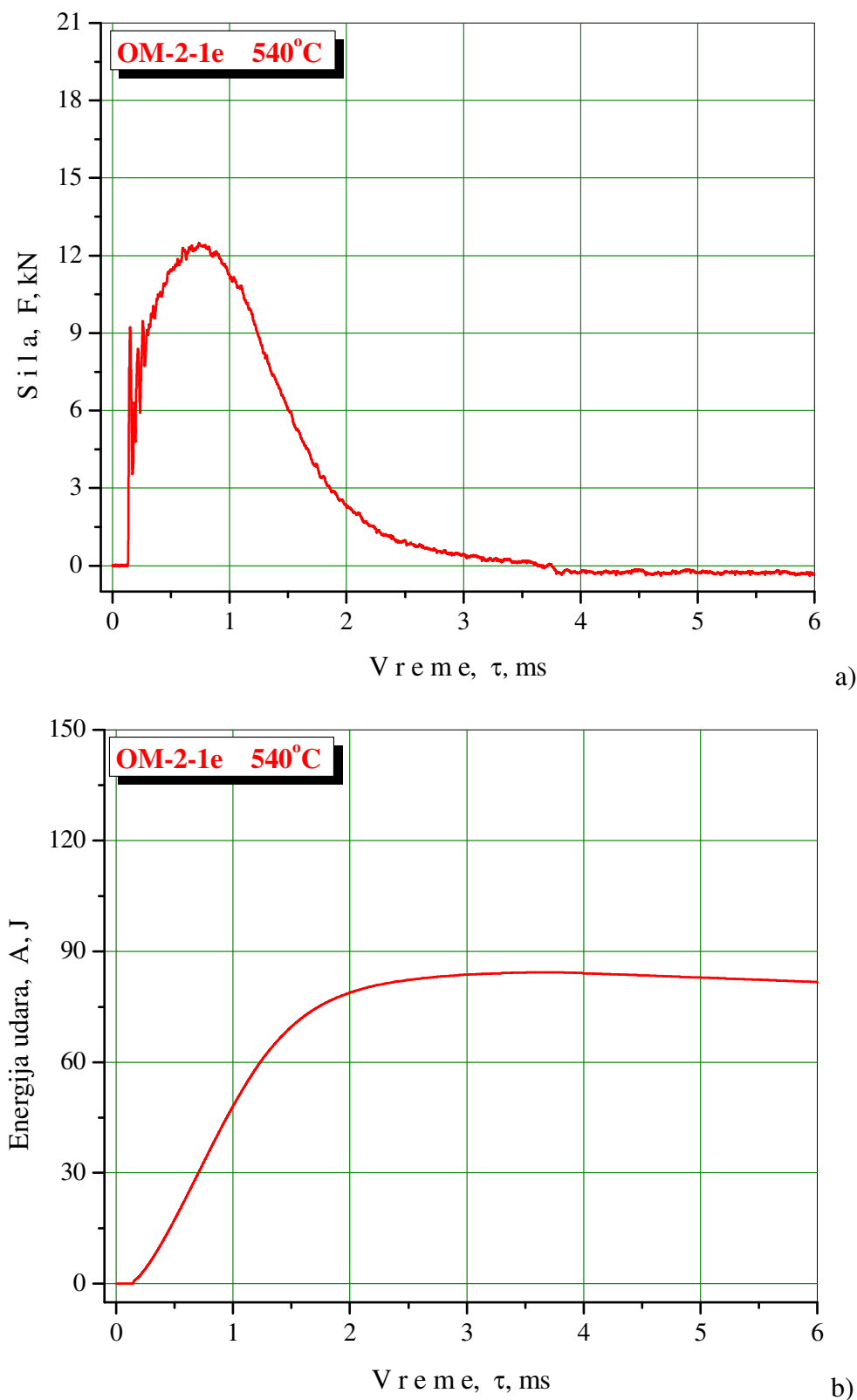
Slika 5.34. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-2-1n
a) sila-vreme, b) energija-vreme

Dijagrami dobijeni ispitivanjem na sobnoj temperaturi epruvete oznake OM-1-1e sa V-zarezom u eksploatisanom OM su dati na sl. 5.35, a za epruvetu oznake OM-2-1e ispitivanu na radnoj temperaturi na sl. 5.36. Ostali dijagrami ispitivanja nisu prikazani jer pokazuju

sličan karakter ponašanja materijala.

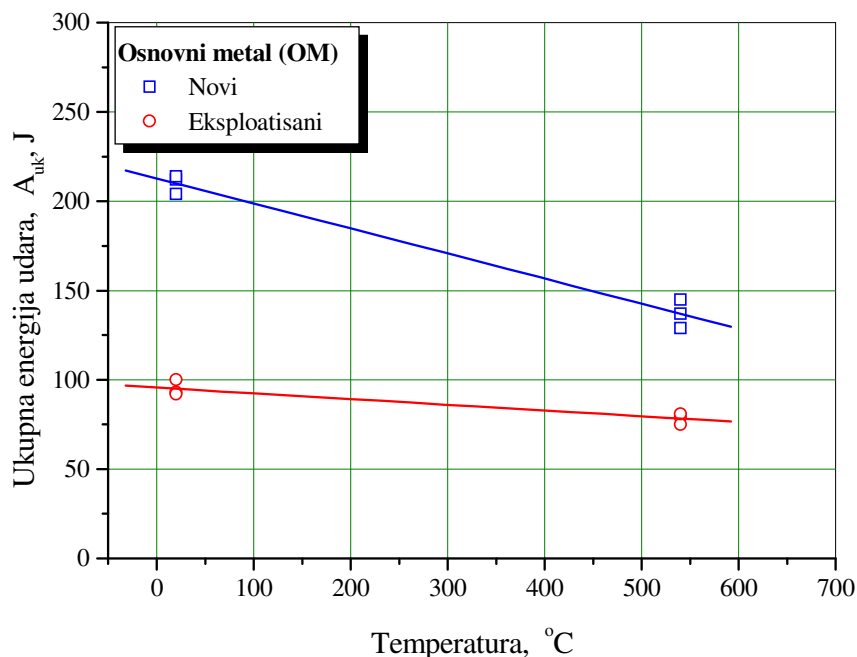


Slika 5.35. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-1-1e
a) sila-vreme, b) energija-vreme



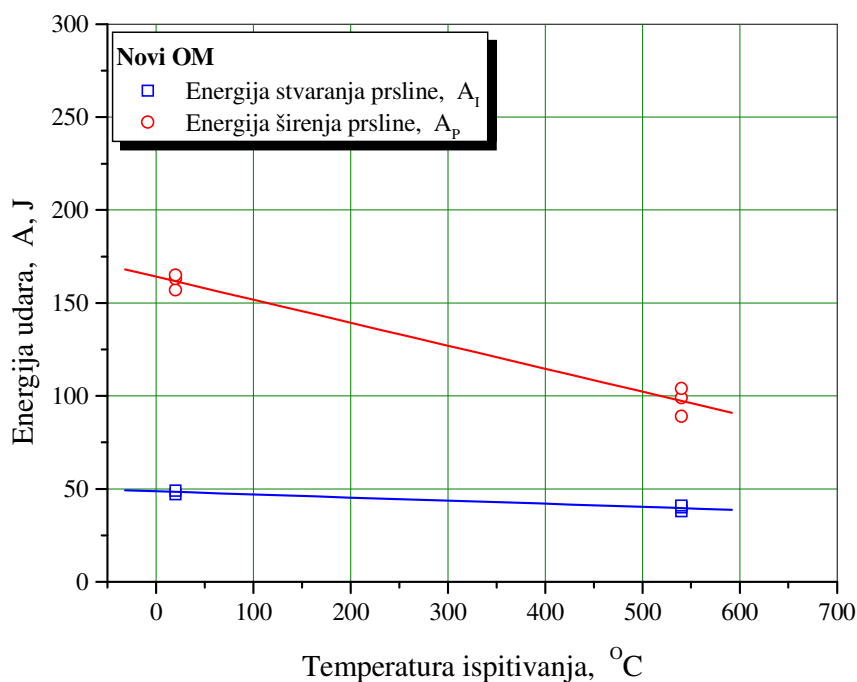
Slika 5.36. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete OM-2-1e
a) sila-vreme, b) energija-vreme

Zavisnost ukupne energije udara, A_{uk} , novog i eksploatisanog OM, od temperature ispitivanja je data dijagramski na sl. 5.37. Uticaj eksploatacionih uslova (vremena eksploatacije i temperature) na vrednosti energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , je dat dijagramski na sl. 5.38 za novi OM, a na sl. 5.39 za eksploatisani OM.

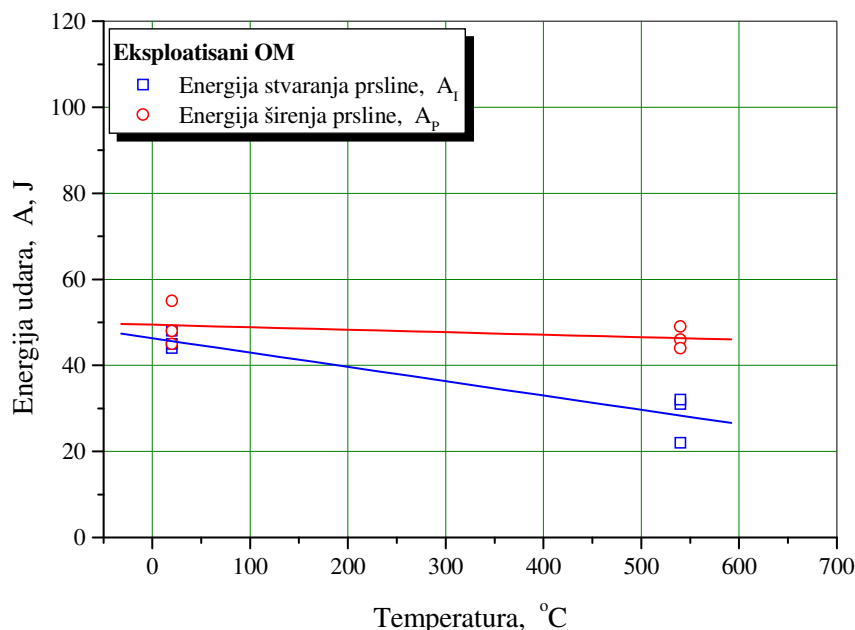


Slika 5.37. Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod novog i eksploatisanog OM

Na osnovu dobijenih rezultata udarnih ispitivanja novog i eksploatisanog OM, vidi se da sa vremenom eksploatacije i porastom temperature ispitivanja dolazi do pada ukupne energije udara, A_{uk} , sl. 5.37. Vrednosti ukupne energija udara, kod novog OM, se kreću od 210J dobijene ispitivanjem na 20°C do 141J dobijene ispitivanjem na 540°C. Vreme eksploatacije dodatno smanjuje ukupnu energiju, A_{uk} , tako da se kod eksploatisanog OM, A_{uk} , kreće od 95J dobijena ispitivanjem na 20°C i opada do 78J dobijena ispitivanjem na 540°C.



Slika 5.38. Promena A_I i A_p u zavisnosti od temperature kod novog OM



Slika 5.39. Promena A_1 i A_p u zavisnosti od temperature kod eksploatisanog OM

Učešće energije stvaranja prsline, A_1 , kod epruveta sa zarezom u novom OM, se kreće od 48J dobijeno na 20°C do 40J dobijeno na 540°C. Vrednosti energije širenja prsline, A_p , se kreću od 162J dobijene na 20°C do 101J dobijene na 540°C. Učešće energije stvaranja prsline, A_1 , kod eksploatisanog OM je slično dobijenim vrednostima kao i kod novog OM na 20°C i iznosi u proseku 46J, da bi na 540°C opalo na 32J. Vreme eksploatacije i temperatura ispitivanja značajno utiču na dobijene vrednosti energije širenja prsline, A_p , koje se se kreću od 49J dobijene na 20°C i opadaju do 46J na 540°C.

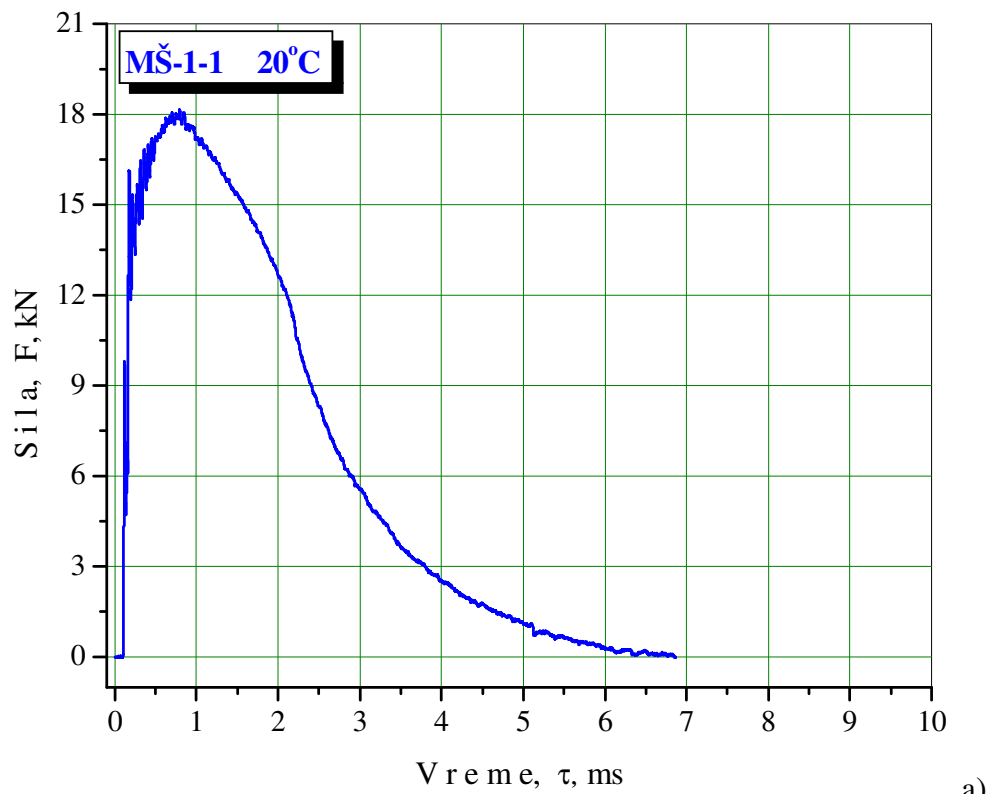
5.8.2. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta MŠ

Rezultati udarnih ispitivanja epruveta MŠ ispitanih na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C su dati u tab. 5.12.

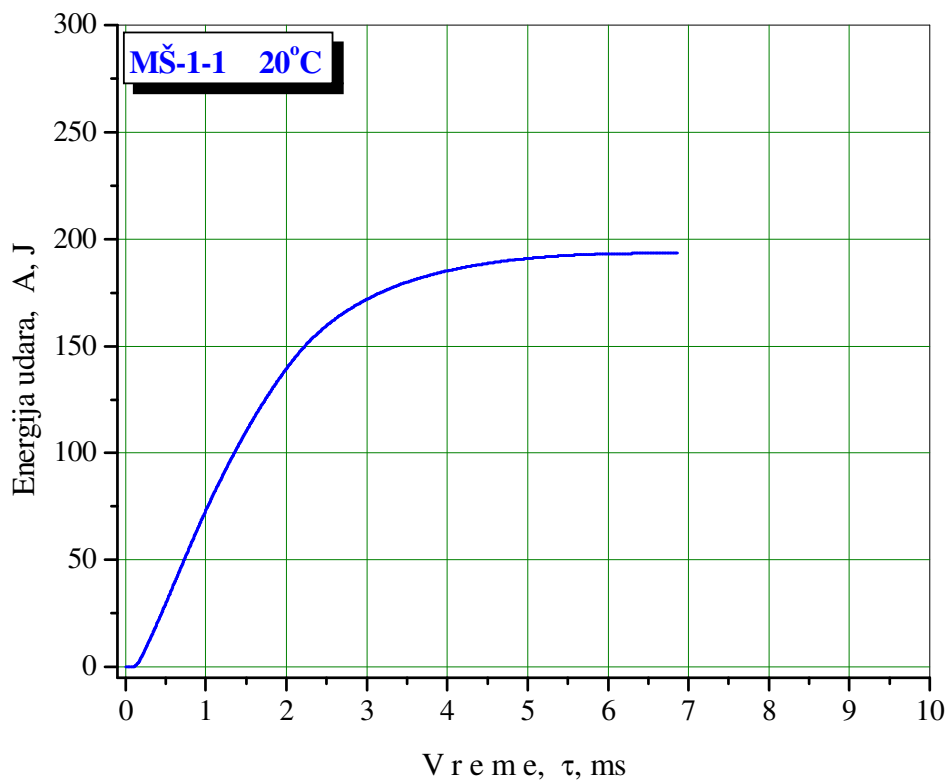
Tabela 5.12. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u MŠ

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_1 , J	Energija širenja prsline, A_p , J
MŠ-1-1	20	193	56	137
MŠ-1-2		190	60	130
MŠ-1-3		183	60	123
MŠ-2-1	540	139	40	99
MŠ-2-2		133	39	94
MŠ-2-3		134	39	95

Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem epruvete oznake MŠ-1-1 sa V-zarezom u MŠ, i ispitane na 20°C su dati na sl. 5.40, a za epruvetu oznake MŠ-2-1 i ispitivanu na 540°C su dati na sl. 5.41. Ostali dijagrami ispitivanja nisu prikazani jer pokazuju isti karakter ponašanja materijala.

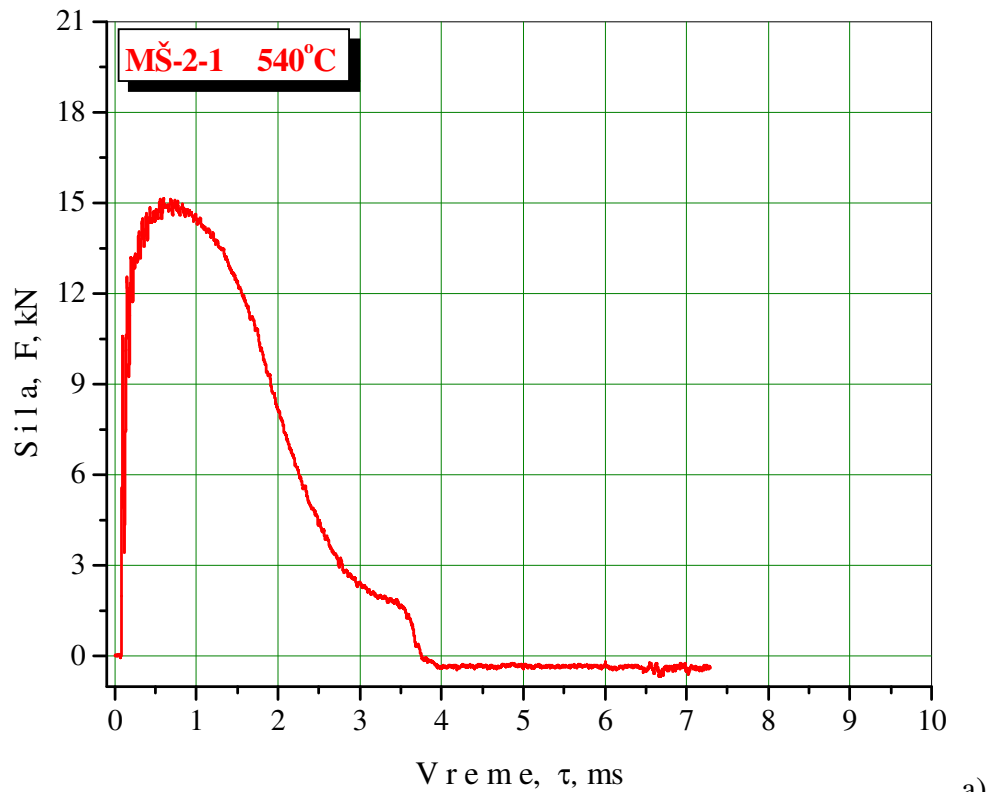


a)

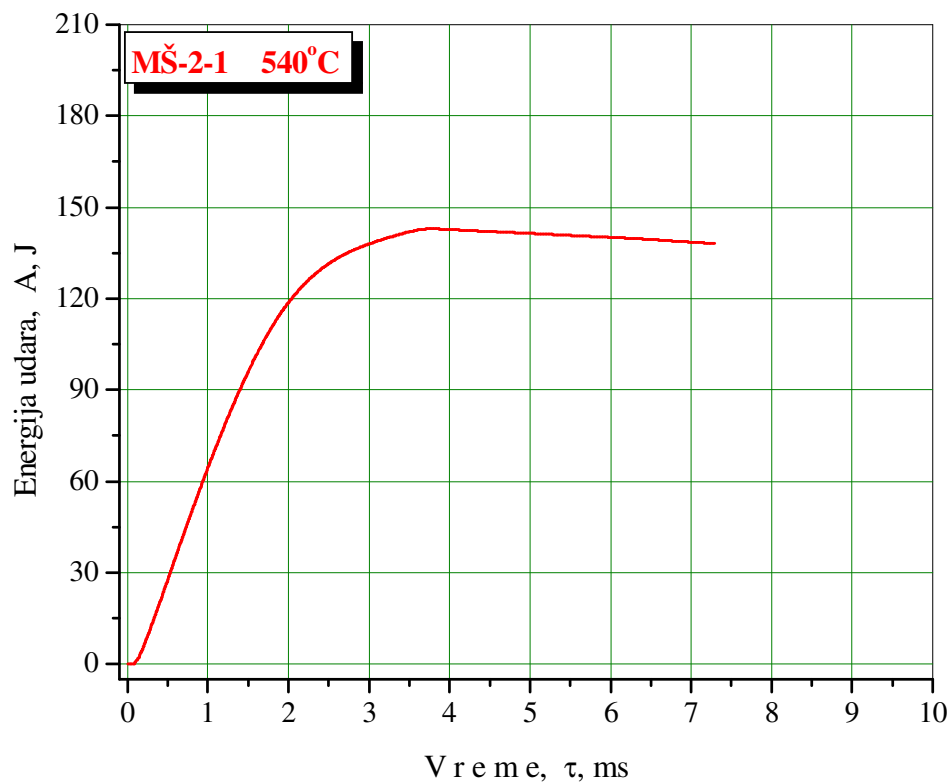


b)

Slika 5.40. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete MŠ-1-1
a) sila-vreme, b) energija-vreme



a)

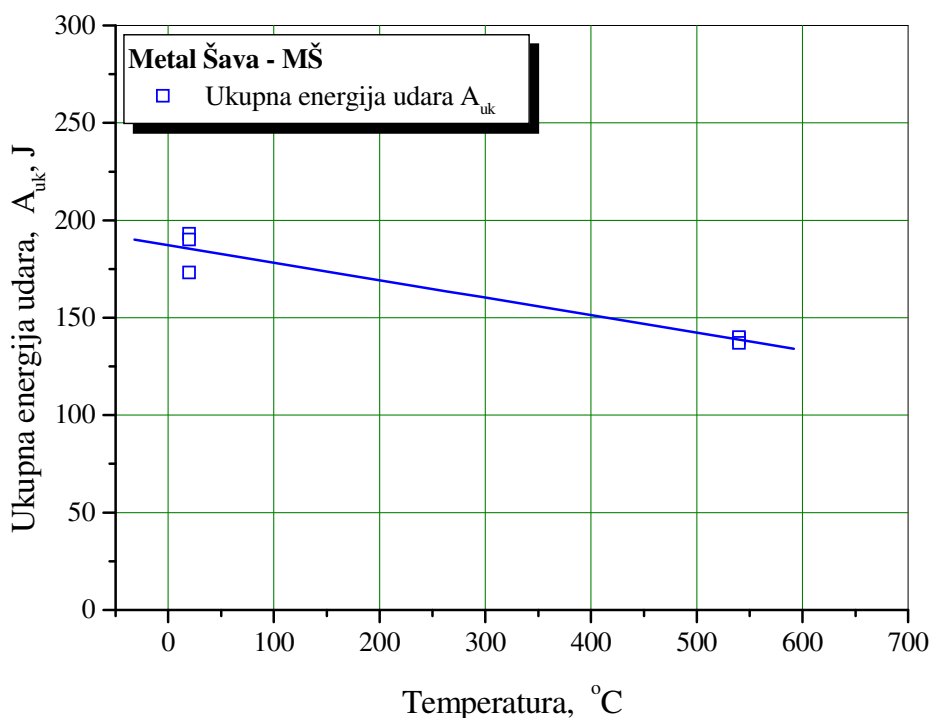


b)

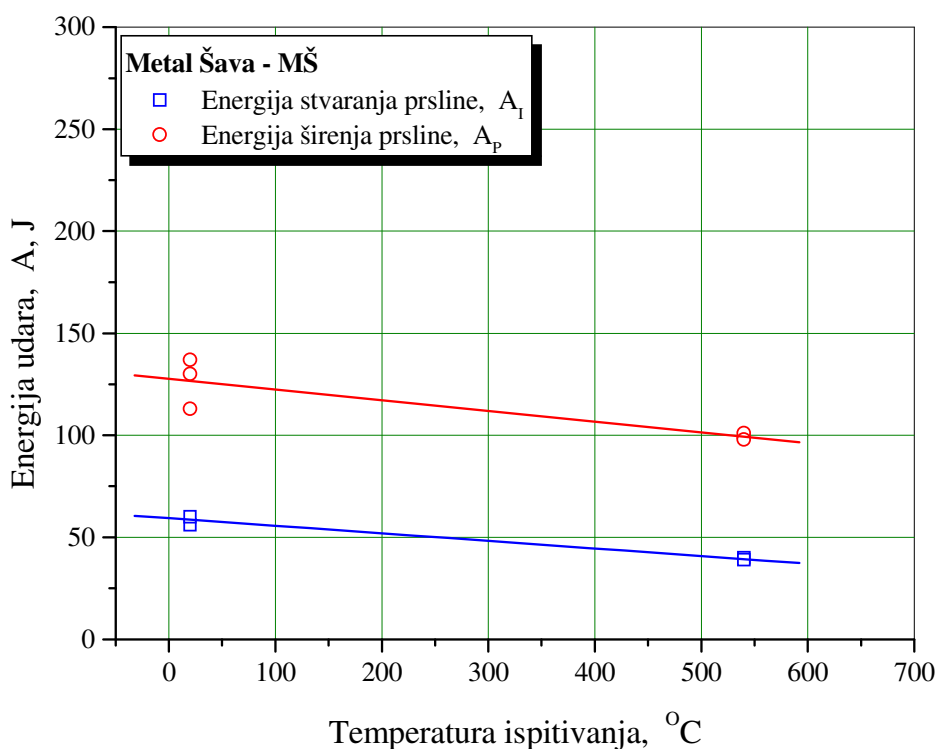
Slika 5.41. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete MŠ-2-1
a) sila-vreme, b) energija-vreme

Uticaj temperature ispitivanja na promenu vrednosti ukupne energije udara, A_{uk} , kod epruveta sa zarezom u MŠ je dat dijagramski na sl. 5.42. Promena učešća vrednosti energije

stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , u ukupnoj energiji udara od temperature ispitivanja je data na sl. 5.43.



Slika 5.42. Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ



Slika 5.43. Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ

Na osnovu dobijenih rezultata udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u MŠ izvađenih iz sučeono zavarenog spoja, tab. 5.12, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja ukupne energije udara, A_{uk} , što je prikazano i grafički na sl. 5.42.

Vrednosti ukupne energija udara, A_{uk} , epruveta sa zarezom u MŠ, tab. 5.12, se kreću od 189J dobijene ispitivanjem na 20°C i opadaju u proseku do 135J dobijene ispitivanjem na 540°C. Učešće energije stvaranja prsline, A_I , se kreće u proseku od 59J dobijeno na 20°C i opada do 39J dobijeno na 540°C. Vrednost energije širenja prsline, A_P , isto tako opada sa povećanjem temperature, od 130J dobijena na 20°C do 96J dobijena na 540°C.

5.8.3. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta ZUT

Rezultati ispitivanja epruveta ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM, ispitanih na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C su dati u tab. 5.13 i 5.14.

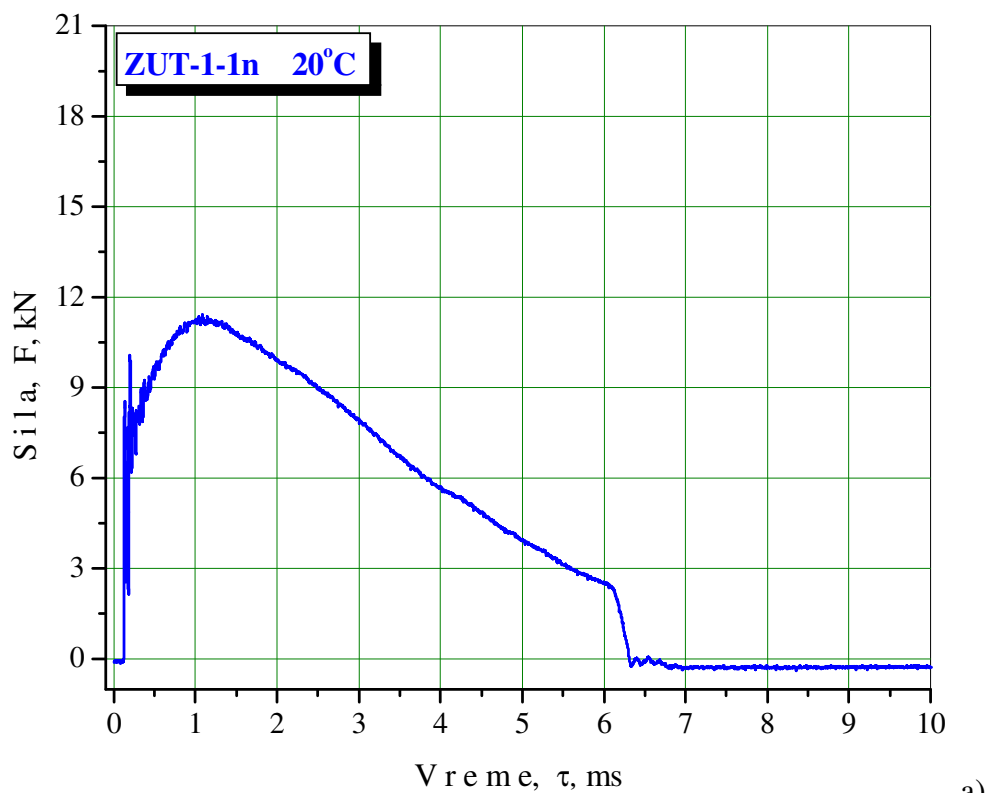
Tabela 5.13. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u novom ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J
ZUT-1-1n	20	186	47	139
ZUT-1-2n		187	45	142
ZUT-1-3n		183	47	136
ZUT-2-1n	540	143	46	97
ZUT-2-2n		131	43	88
ZUT-2-3n		129	42	87

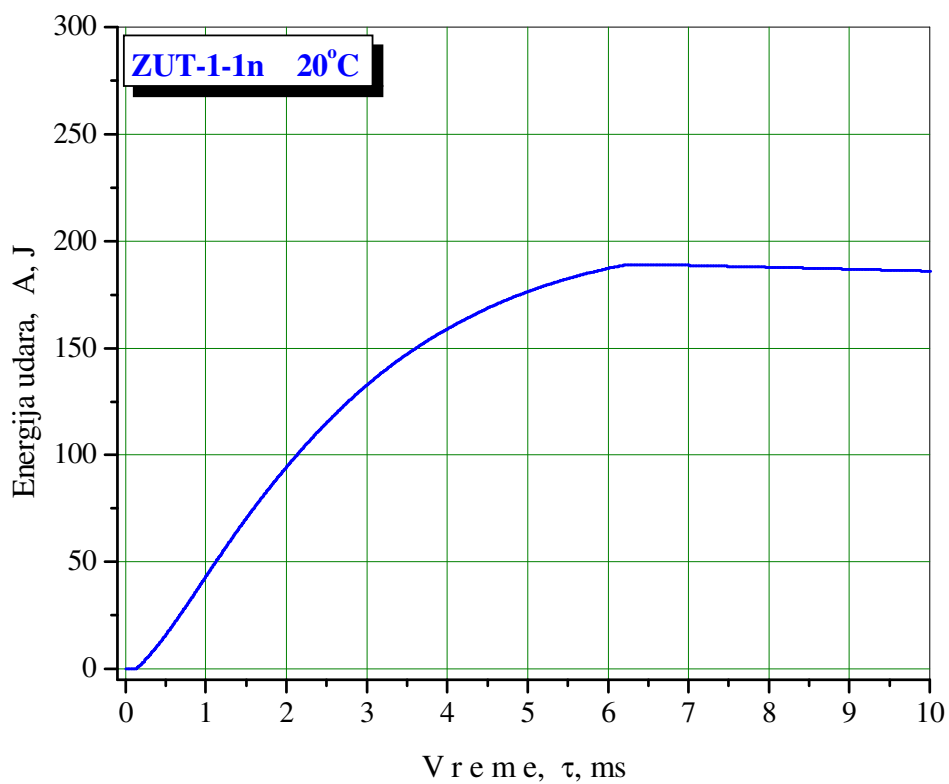
Tabela 5.14. Rezultati udarnih ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Ukupna energija udara, A_{uk} , J	Energija stvaranja prsline, A_I , J	Energija širenja prsline, A_P , J
ZUT-1-1e	20	96	44	52
ZUT-1-2e		88	42	46
ZUT-1-3e		80	43	37
ZUT-2-1e	540	76	31	45
ZUT-2-2e		75	30	45
ZUT-2-3e		76	30	46

Tipični dijagrami sila-vreme i energija-vreme dobijeni ispitivanjem epruvete oznake ZUT-1-1n sa V-zarezom u ZUT sa strane novog OM i ispitane na 20°C su dati na sl. 5.44, a za epruvetu oznake ZUT-2-1n i ispitane na 540°C su dati na sl. 5.45.

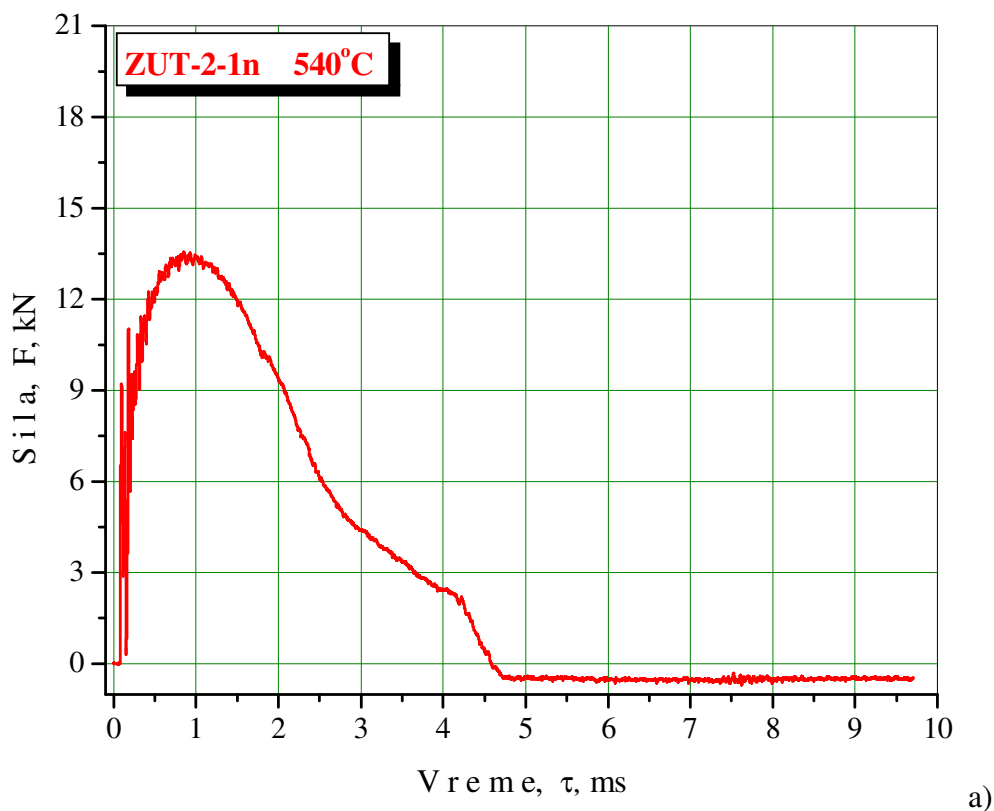


a)

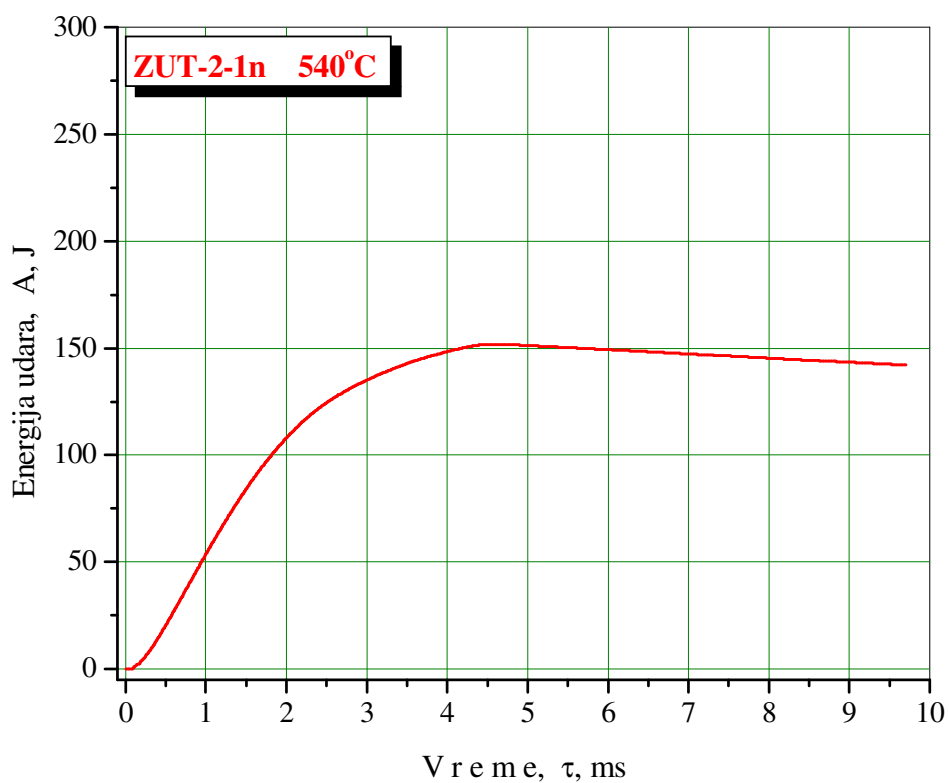


b)

Slika 5.44. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-1-1n
a) sila-vreme, b) energija-vreme



a)

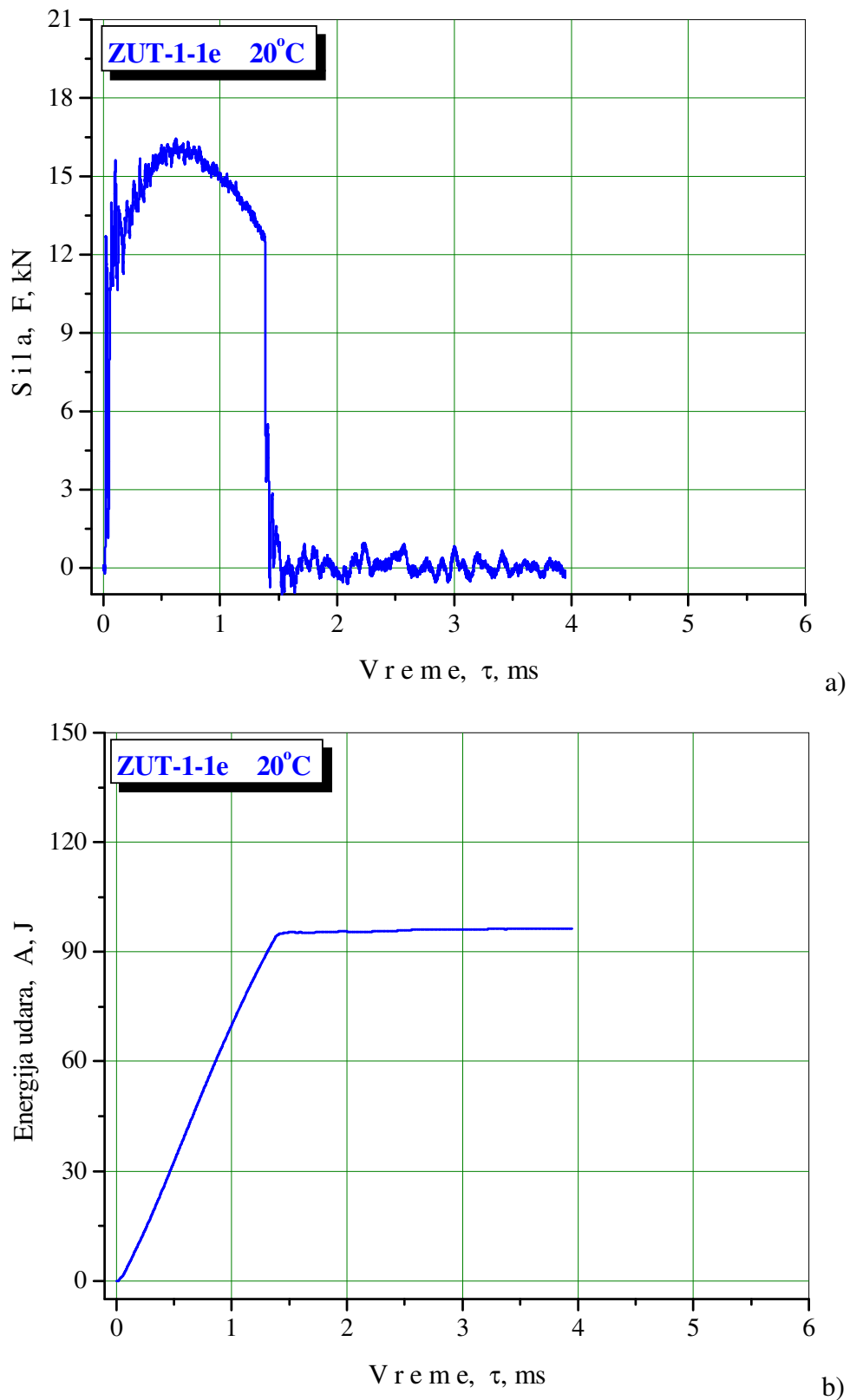


b)

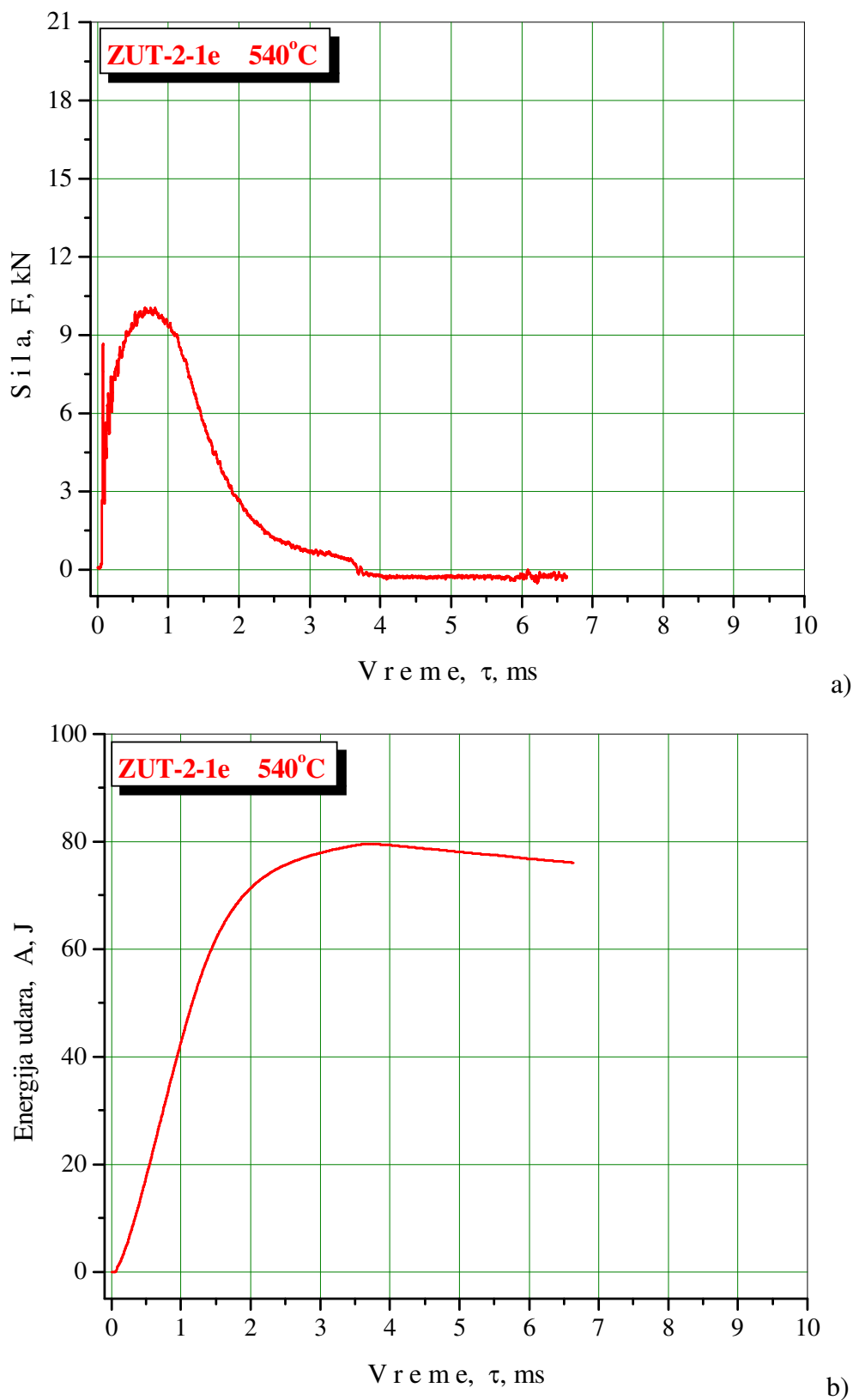
Slika 5.45. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-2-1n
a) sila-vreme, b) energija-vreme

Dijagrami dobijeni ispitivanjem epruvete oznake ZUT-1-1e sa V-zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM i ispitane na 20°C su dati na sl. 5.46, a za epruvetu oznake ZUT-2-1e i ispitane na 540°C su dati na sl. 5.47. Kao i kod prethodnih ispitivanja, ostali dijagrami nisu

prikazani jer pokazuju sličan karakter ponašanja materijala.

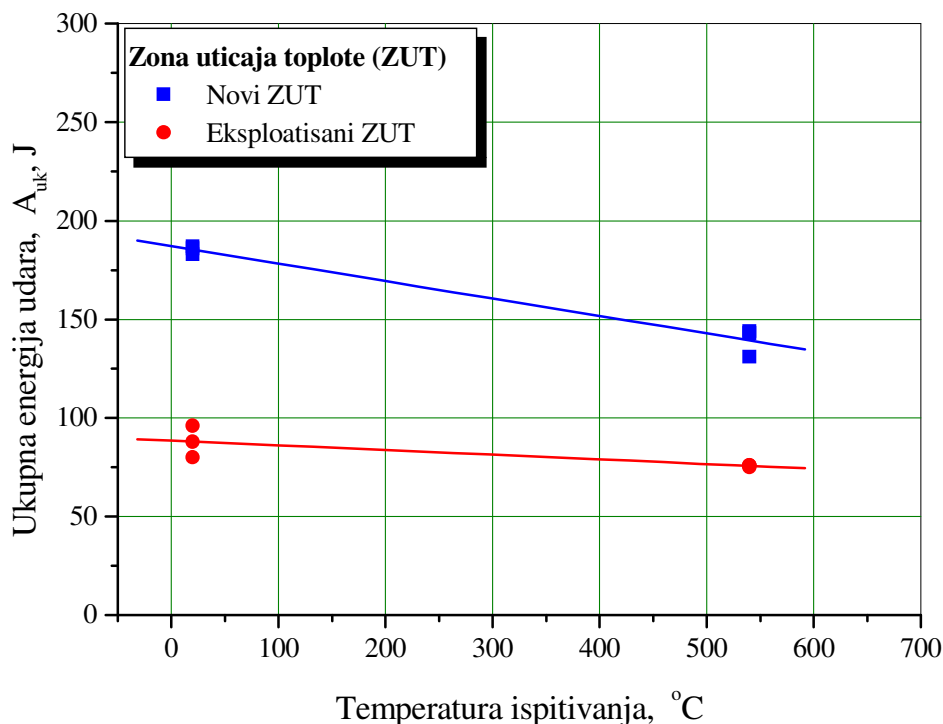


Slika 5.46. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-1-1e
a) sila-vreme, b) energija-vreme



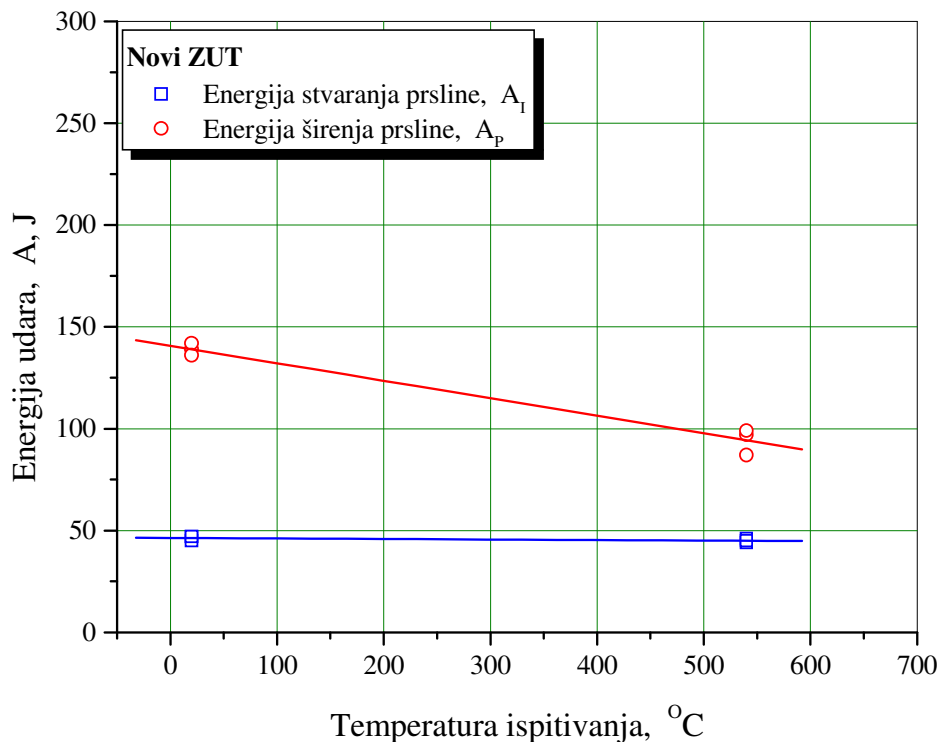
Slika 5.47. Dijagrami dobijeni udarnim ispitivanjem epruvete ZUT-2-1e
a) sila-vreme, b) energija-vreme

Zavisnost ukupne energije udara, A_{uk} , dobijene ispitivanjem epruveta sa V-zarezom u ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM, od temperature ispitivanja je data dijagramski na sl. 5.48.

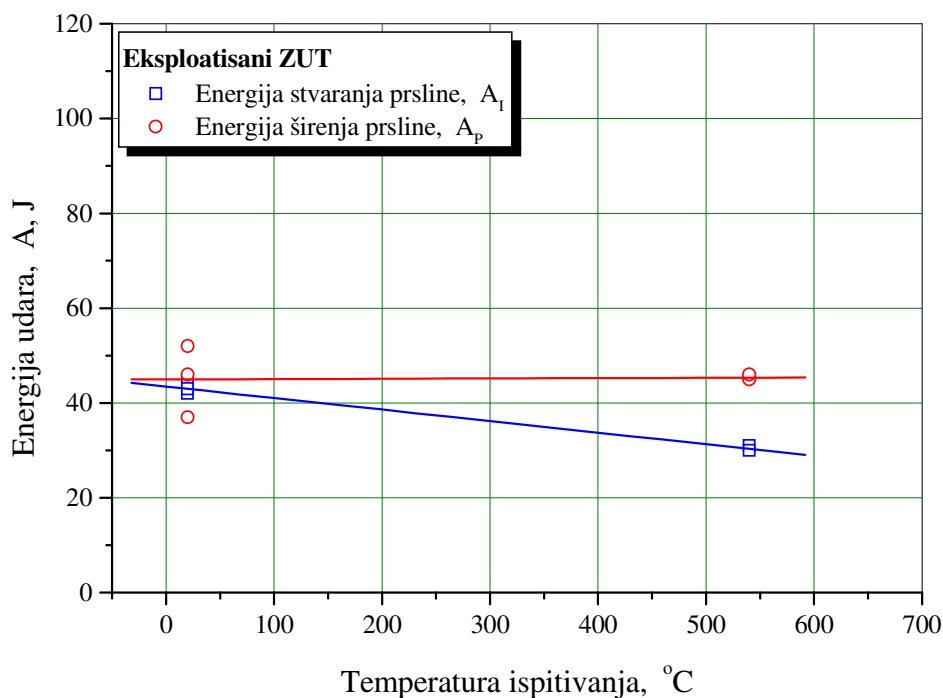


Slika 5.48. Promena A_{uk} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT

Uticaj vremena eksploatacije i temperature na promenu vrednosti energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , u ukupnoj energiji udara kod epruveta sa V-zarezom u ZUT sa strane novog OM je dat dijagramski na sl. 5.49, a za epruvete sa V-zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM, je data na sl. 5.50.



Slika 5.49. Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT sa strane novog OM



Slika 5.50. Promena A_I i A_P u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT sa strane eksploatisanog OM

Najmanje vrednosti udarnih osobina su dobijene kod epruveta sa zarezom u ZUT. Međutim, u odnosu na dobijene vrednosti OM, te vrednosti su zanemarljivo niže, što ide u prilog dobro urađenoj termičkoj obradi posle zavarivanja. Vrednosti ukupne energija udara, A_{uk} , epruveta sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, tab. 5.13, od 185J dobijene ispitivanjem na 20°C opadaju do 134J dobijene ispitivanjem na 540°C. Primetno je da temperatura ispitivanja nema značajnijeg uticaja na dobijene vrednosti energije stvaranja prsline. Naime, i u jednom i u drugom slučaju vrednost energije stvaranja prsline, A_I , se kreće oko 45J. Vrednosti energije širenja prsline, A_P , se kreću od 139J dobijene na 20°C do 90J dobijene na 540°C.

Uticaj temperature ispitivanja kod ispitivanja epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT pokazuje nešto drugačije ponašanje nego kod dobijenih rezultata ispitivanja epruveta sa zarezom u novom ZUT. Vrednosti ukupne energija udara, A_{uk} , epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM, tab. 5.14, se kreću od 88J dobijene ispitivanjem na 20°C i opadaju do 76J dobijene ispitivanjem na 540°C. Kod epruveta eksploatisanog ZUT period eksploatacije ima uticaja na dobijene vrednosti energije stvaranja prsline, A_I . Učešće energije stvaranja prsline, A_I , kod ZUT sa strane eksploatisanog OM iznosi u proseku 43J na 20°C, i opada do 30J kod epruveta ispitanih na 540°C. Međutim, temperatura ispitivanja nema uticaja na dobijene vrednosti energije širenja prsline, A_P , koje su oko 45J i na 20°C i na 540°C.

5.8.4. Diskusija udarnih ispitivanja

Na osnovu dobijenih rezultata udarnih ispitivanja, odnosno izmerenih vrednosti ukupne energije udara, A_{uk} , jasno se uočava da ukupna energija udara zavisi od:

- ⇒ mesta urezivanja V-zareza, odnosno da li je zarez postavljen u OM, MŠ ili ZUT;
- ⇒ temperature ispitivanja, i
- ⇒ vremena eksploatacije odnosno da li je zarez postavljen u novom ili eksploatisanom OM, ili u ZUT sa strane novog ili eksploatisanog OM.

Analizirajući, kako mesto urezivanja, odnosno postavljanja V-zareza utiče na vrednosti ukupne energije udara (tab. 5.10 do 5.14), možemo da zaključimo da heterogenost strukture osnovnog materijala i zavarenog spoja, koju prate različite mehaničke osobine pojedinih područja zavarenog spoja (metal šava i zona uticaja toplote) utiču na vrednosti ukupne energije udara.

Najveću vrednost ukupne energije udara imaju epruvete sa zarezom u OM, a nešto nižu vrednost imaju epruvete sa zarezom u MŠ i ZUT. Ispitivanje je pokazalo gotovo identičan uticaj i temperature ispitivanja na vrednosti ukupne energije udara. Ukupna energija udara, A_{uk} , opada sa povećanjem temperature, a uticaj temperature ispitivanja je najveći kod epruveta sa V-zarezom u OM i ZUT.

Značajan uticaj na promenu ukupne energije udara ima i vreme eksploatacije. Vrlo je bitno da li je zarez postavljen u novom ili eksploatisanom OM, ili u ZUT sa strane novog ili eksploatisanog OM. Vreme eksploatacije značajno smanjuje ukupnu energiju udara kod epruveta sa zarezom u eksploatisanom OM, kao i kod epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM. Ovu pojavu možemo kao i kod zateznih ispitivanja dovesti u vezu sa strukturnim promenama u materijalu uzrokovanim vremenom eksploatacije.

Ispitivanja epruveta sa V-zarezom u OM su pokazala da se odnos energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , menja u zavisnosti od temperature ispitivanja i vremena eksploatacije. Sa povećanjem temperature procentualno opada učešće duktilne komponente u ukupnoj energiji udara (energija širenja prsline), a raste učešće krte komponente (energije stvaranja prsline). Karakter krivih sila-vreme i energija-vreme dobijenih ispitivanjem epruveta na sobnoj temperaturi odgovara karakteru duktilnih materijala, sa malim učešćem energije stvaranja prsline, A_I , i velikim učešćem energije širenja prsline, A_P , dok je karakter istih krivih kod ispitivanja na radnim temperaturama (540°C) nešto nepovoljniji sa aspekta učešća komponenti ukupne energije udara, odnosno sa približno podjednakim učešćem energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P .

Uticaj vremena eksploatacije dodatno menja odnos komponenti energije stvaranja prsline i energije širenja prsline u ukupnoj energiji udara. Na dijagramu sila-vreme epruvete novog OM ne možemo definisati silu početka nestabilnog rasta prsline, F_F , dok se kod istog dijagrama epruvete eksploatisanog OM, sila F_F može videti na dva mesta. Ova pojava strmo padajućeg dela krive sila-vreme kod eksploatisanog OM je jasan znak opadanja duktilnih osobina materijala kao posledica vremena eksploatacije.

Kod ispitivanja epruveta sa V-zarezom u MŠ, takođe sa povećanjem temperature opada učešće duktilne komponente u ukupnoj energiji udara, a raste učešće krte komponente.

Najveći uticaj na promenu odnos energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P , u ukupnoj energiji udara u zavisnosti od temperature ispitivanja i vremena eksploatacije imamo kod epruveta sa zarezom u ZUT. Kod epruveta sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, učešće duktilne komponente u ukupnoj energiji udara (energija širenja prsline) u odnosu na učešće krte komponente (energije stvaranja prsline) je tri puta veće (3:1), i opada sa porastom temperature gde je dva puta veće (2:1). Kod epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT taj odnos je izrazito nepovoljan, i na sobnoj temperaturi je učešće energije stvaranja prsline i energije širenja prsline skoro isti (1:1), i neznatno se menja na temperaturi od 540°C, gde je približno 1:1,5.

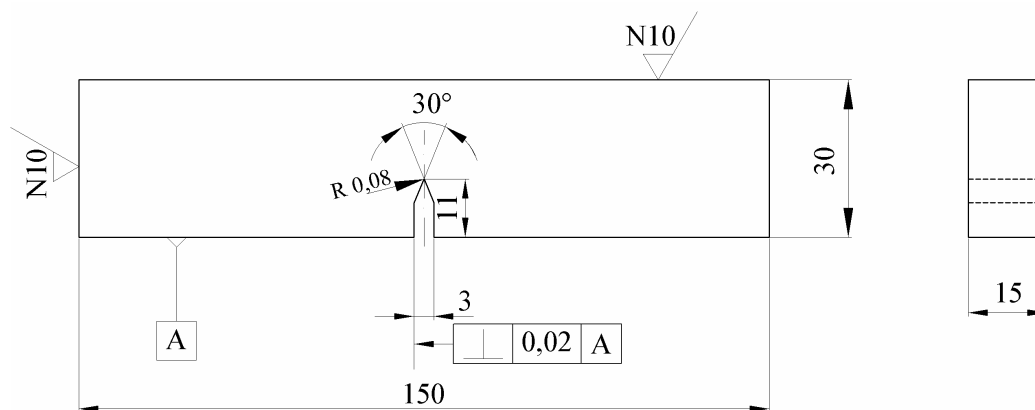
Generalno, karakter krivih sila-vreme i energija-vreme dobijenih ispitivanjem epruveta

kod kojih je V-zarez postavljen u komponentama novog dela zavarenog spoja (novi OM, MŠ i novi ZUT) na sobnoj i radnoj temperaturi odgovara karakteru duktilnih materijala, sa malim učešćem energije stvaranja prsline, A_I , i velikim učešćem energije širenja prsline, A_P . Kod ispitivanja eksploatisanog materijala na sobnoj i radnoj temperaturi, karakter krivih odgovara karakteru duktilno-krtih materijala sa približno podjednakim učešćem energije stvaranja prsline, A_I , i energije širenja prsline, A_P . Ovaj podatak je veoma značajan kod izbora materijala za konkretne eksploatacione uslove.

5.9. ODREĐIVANJE ŽILAVOSTI LOMA PRI RAVNOJ DEFORMACIJI K_{Ic}

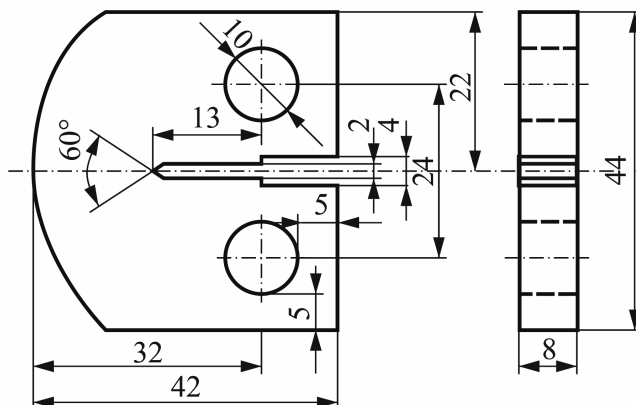
Ispitivanje epruveta sa prslinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline i polazi od pretpostavke da je materijal oko prsline dovoljno homogen, što znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno preneti na odgovarajuću konstrukciju. Uticaj heterogenosti strukture i mehaničkih osobina zavarenog spoja se pre svega ogleda kroz položaj vrha zamorne prsline i osobina područja kroz koje se lom razvija. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji je rađeno u cilju određivanja kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odnosno ocene ponašanja novog i eksploatisanog OM i komponenti zavarenog spoja, metala šava (MŠ) i zone uticaja toplote (ZUT) u prisustvu greške tipa prsline, kao najopasnije od svih grešaka u konstrukcijskim materijalima, a posebno zavarenim spojevima. Samo ispitivanje je rađeno na sobnoj temperaturi od 20°C, i radnoj temperaturi od 540°C [26].

Rađeno je pet grupa epruveta: epruvete sa zarezom u novom OM, epruvete sa zarezom u eksploatisanom OM, epruvete sa zarezom u MŠ, epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, i epruvete sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM. Za određivanje K_{Ic} na sobnoj temperaturi korišćene su epruvete za savijanje u tri tačke (SEB) čija je geometrija definisana standardom ASTM E399 [26, 32] i data je na sl. 5.51.



Slika 5.51. Epruveta SEB za ispitivanje mehanike loma [26, 32]

Za određivanje K_{Ic} na radnoj temperaturi od 540°C korišćene su modifikovane CT epruvete za zatezanje čija geometrija je u saglasnosti sa standardom BS 7448 Part 1 [33], i data je na sl. 5.52. Ovaj tip epruvete se pokazao kao najpraktičniji za ispitivanje na povišenim temperaturama zbog ograničenosti prostora u komori u kojoj se istovremeno postiže radna temperatura i vrši ispitivanje (zatezanje).



Slika 5.52. Kompaktna CT epruveta za ispitivanje mehanike loma [33]

Kako je definisao standard ASTM E399, odnosno BS 7448 Part 1, prvo se pristupilo pripremanju epruvete, odnosno stvaranju zamorne prslina. Zamorna prslina je potrebna da bi se stvorili uslovi ravnog stanja deformacije. Određivanje nazivne granične sile, F_L , odnosno maksimalne sile početka zamaranja za SEB epruvetu je definisano izrazom:

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

a za CT epruvetu:

$$F_L = 0,4 \cdot \frac{B \cdot b^2 \cdot R_T}{(2W + a)} \quad (5.7)$$

gde je:

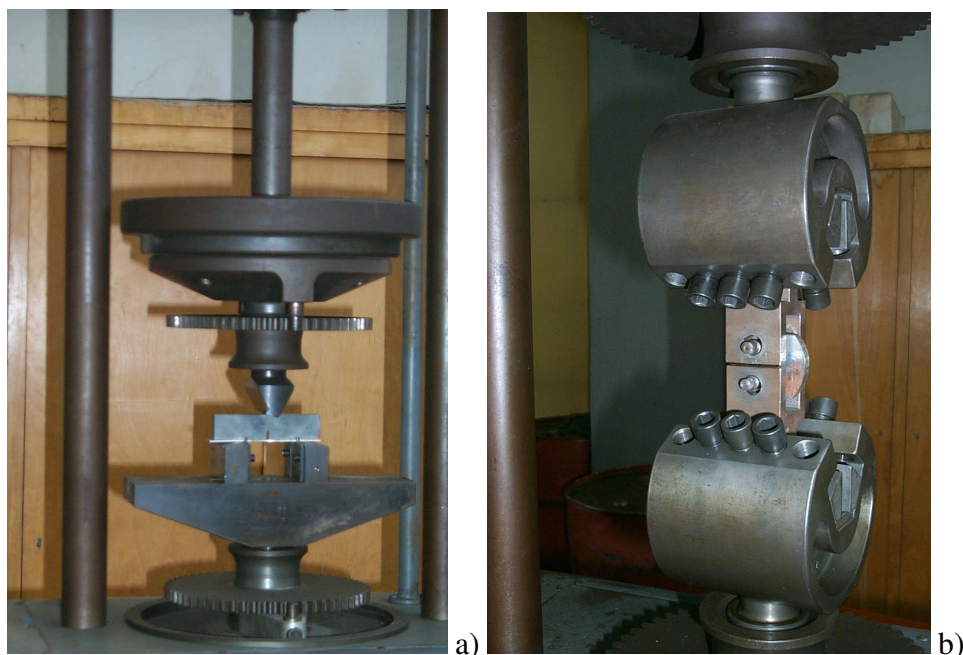
- B - debljina epruvete, mm;
- W - širina epruvete, mm;
- b - dužina ligamenta, mm;
- L - raspon između oslonaca, mm, i
- R_T - efektivni napon tečenja, MPa, koji se određuje po formuli:

$$R_T = \frac{R_{p0,2} + R_m}{2} \quad (5.8)$$

gde je:

- $R_{p0,2}$ - napon tečenja, MPa, i
- R_m - zatezna čvrstoća, MPa.

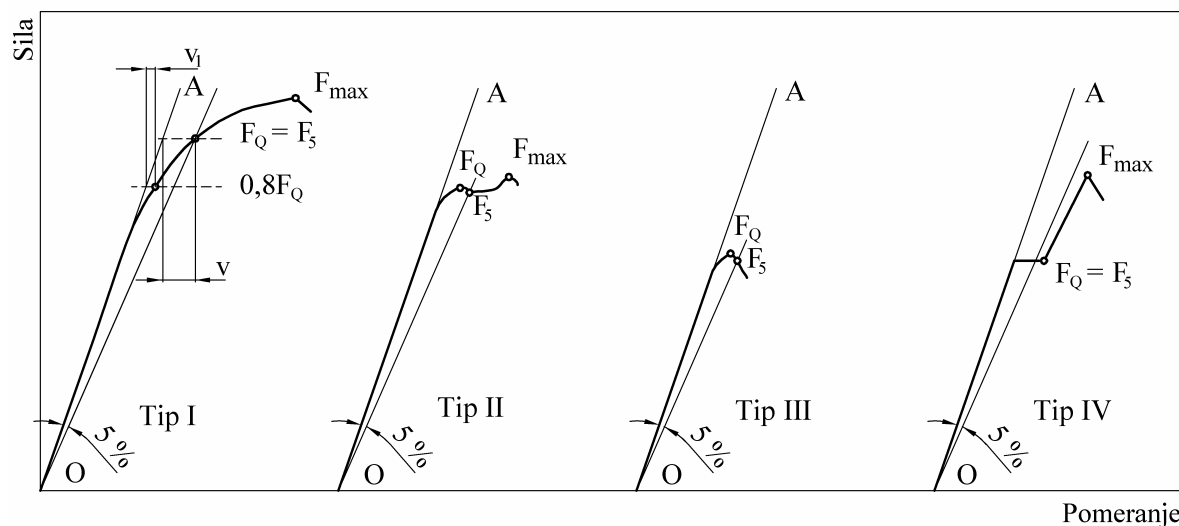
Približno 50% završne dužine zamorne prslina je izvedeno pri maksimalnoj sili zamaranja $F_{max} = 0,4 \cdot F_L$. U oba slučaja je minimalna sila bila $F_{min} = 0,1 \cdot F_{max}$. Stvaranje zamorne prslina i kod SEB i kod CT epruveta je rađeno na visokofrekventnom pulzatoru "AMSLER", sl. 5.53.



Slika 5.53. Stvaranje zamorne prsline na visokofrekventnom pulzatoru
a) kod SEB epruvete, b) kod CT epruvete

Ovaj uređaj može da ostvari sinusoidalno jednosmerno promenljivo opterećenje u opsegu od -100kN do $+100\text{kN}$. Srednje opterećenje i amplituda opterećenja su registrovani sa tačnošću $\pm 25\text{N}$. Ostvarena učestanost se kretala od 105 do 120Hz što je u direktnoj zavisnosti od tipa epruvete, nivoa srednjeg opterećenja i veličine amplitude opterećenja.

Posle formiranja zamorne prsline potrebne veličine na vrhu mašinski izrađenog zareza, merač pomeranja se postavi na ivice početka zareza. U toku monotonog rasta sile, na pisaču se dobija zapis sila-pomeranje, čiji su tipični oblici prikazani na sl. 5.54 [25].



Slika 5.54. Osnovni tipovi zapisa sila-pomeranje

Povuče se tangenta na linearni deo krive sila-pomeranje (linija OA na sl. 5.54), a zatim sečica OF_5 kroz koordinatni početak sa nagibom 5% manjim od nagiba tangente OA . F_5 je sila na preseku sečice OF_5 i krive sila-pomeranje. Sila F_Q je jednaka najvećoj sili na dijagramu sila-pomeranje između tačaka O i F_5 . Izračuna se odnos F_{max} / F_Q , gde je F_{max} određena

automatskim zapisom kao maksimalna sila koju je epruveta izdržala tokom ispitivanja. Ukoliko ovaj odnos nije veći od 1,1, tada se na osnovu sile F_Q može izračunati njoj odgovarajuća veličina faktora intenziteta napona K_Q prema jednačini (epruveta za ispitivanje savijanjem) [25]:

$$K_Q = \frac{F_Q \cdot L}{B \cdot \sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad (5.9)$$

gde je:

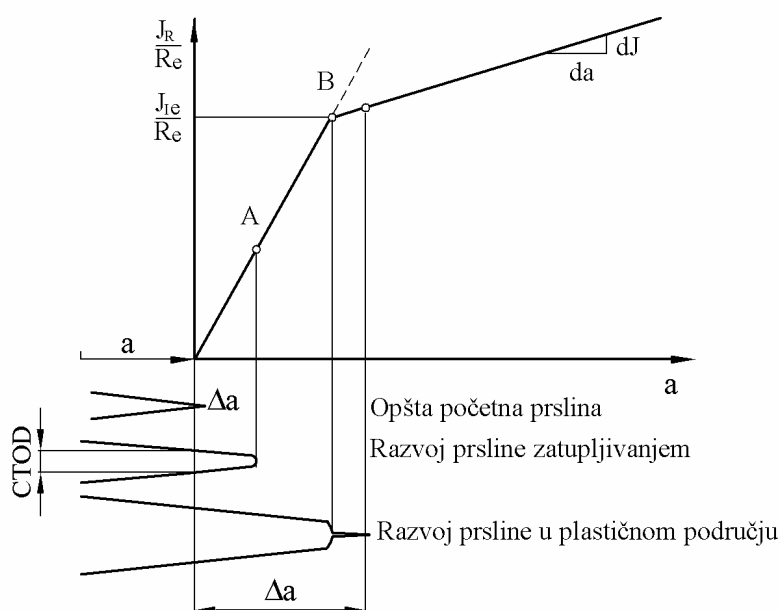
$$f(a/W) = \frac{3\sqrt{\frac{a}{W}}}{2\left(1+2\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right] \quad (5.10)$$

Ako su ispunjeni uslovi ravnog stanja deformacije, onda je K_Q jednako K_{Ic} .

Kako zahtevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (5.11)$$

nisu zadovoljeni, umesto primene linearno-elastične mehanike loma (LEML) definisane standardom ASTM E399 [53], pristupilo se korišćenju elasto-plastične mehanike loma (EPML) definisane standardima ASTM E813 [28, 31], ASTM E1820 [32] i BS 7448 Part 1 i 2 [33, 34]. 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. Ponašanje elasto-plastičnog materijala u koji spadaju i čelici za rad na povišenim temperaturama *A-387 Gr. B*, kao i komponente zavarenog spoja, pri stabilnom rastu prsline može da se opiše dijagramom J - Δa , gde je Δa priraštaj prsline, sl. 5.55.



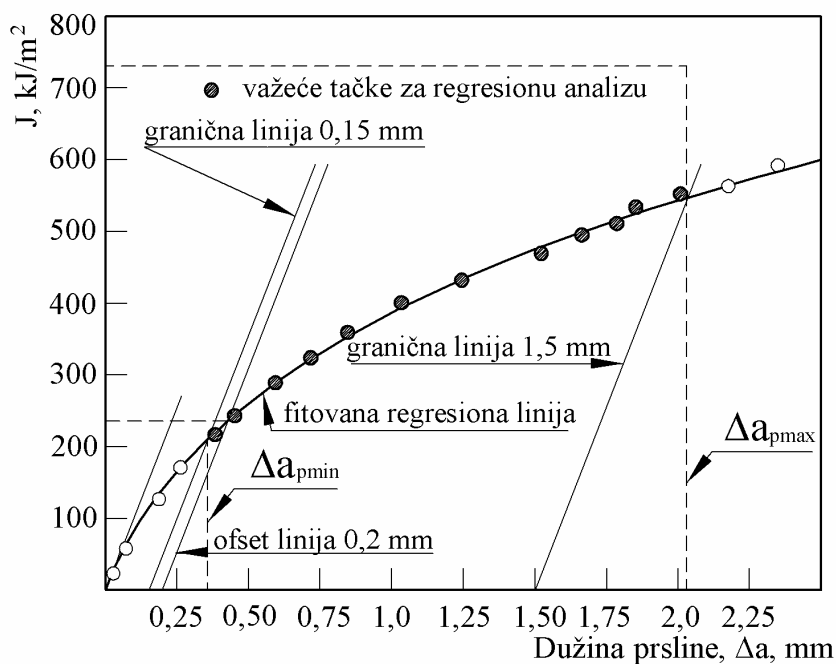
Slika 5.55. Shematski prikaz zavisnosti J - Δa pri stabilnom razvoju prsline [31]

Pri krutom ponašanju materijala lom se razvija bez dodatnog utroška energije i za taj slučaj dijagram $J-\Delta a$ predstavlja horizontalnu pravu liniju koja preseca ordinatu na visini J_{Ic} . Ta visina odgovara kritičnom utrošku energije koji je potreban za početak razvoja prsline. 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 $J-\Delta a$, 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} .

Američko društvo za ispitivanje materijala (ASTM) ustanovilo je standardni postupak dobijanja krivih otpornosti metalnih materijala prema razvoju prsline [31]. Na unapređenju ovoga standarda rađeno je u okviru Evropskog društva za integritet i vek konstrukcije ESIS [77]. Neka od rešenja ovog standarda su prihvaćena i u ovom radu a odnose se na određivanje fitovane regresione linije. ASTM standardi [26-32] se redovno dopunjavaju, i zato je važno voditi računa o tome da se primenjuju najnovije verzije standarda. Uslov za debljinu epruvete je:

$$B > 25 \frac{J_{Ic}}{R_T} \quad (5.12)$$

gde je: J_{Ic} -kritična vrednost J -integrala, sl. 5.56.



Slika 5.56. Prikaz postupka za izbor merodavnih tačaka za određivanje J_{Ic} prema preporukama ESIS [77]

Očigledno je da se debljina može proveriti tek posle ispitivanja. Isto ograničenje važi i za dužinu početnog ligamenta, b , odnosno:

$$b = W - a_0, \quad b > \frac{25J_{Ic}}{R_{p0,2}} \quad (5.13)$$

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

Sledeće 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:

$$J = 2R_T \Delta a \quad (5.14)$$

koja prolazi kroz koordinatni početak sistema J - Δa . Paralelno sa linijom zatupljivanja povlače se prave koje presecaju apscisu (Δa) u tačkama 0,15mm i 1,5mm, sl. 5.56. Ove dve prave ograničavaju područje važećih tačaka za veličine J -integrala. Zahteva se da se bar četiri tačke nađu u tom području, pri čemu postoje ograničenja i za njihov međusobni položaj (najmanje jedna od četiri tačke treba da bude na zadovoljavajućem rastojanju od linije zatupljivanja, $\Delta a / 3$).

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

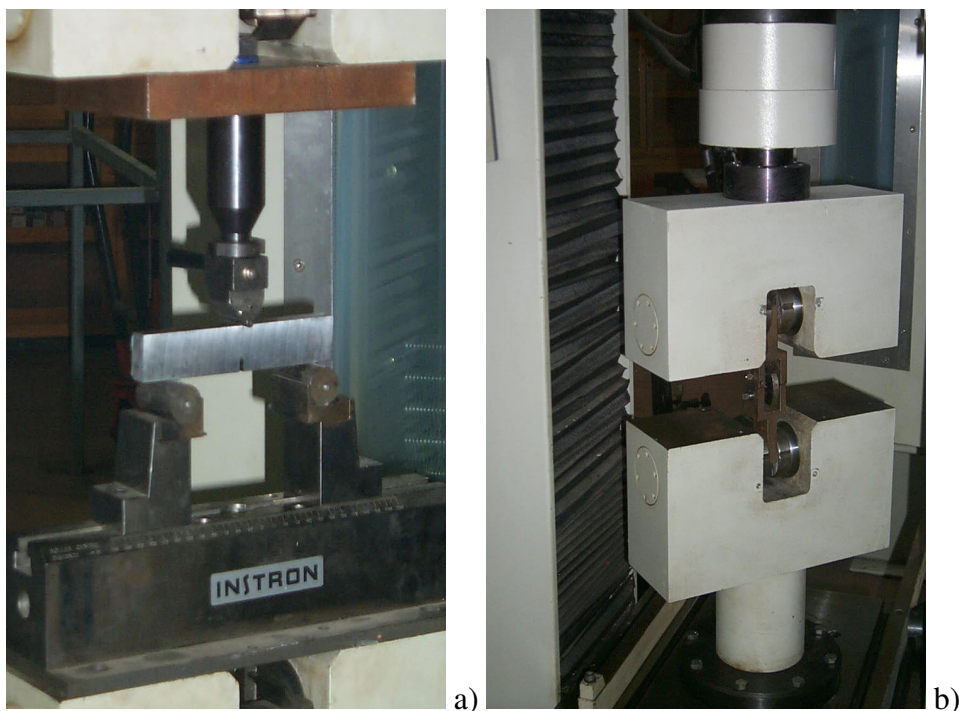
$$\frac{dJ}{da} < R_{p0,2} \quad (5.15)$$

Tada nova linija na preseku sa 0,2mm ofset linijom definiše J_{Ic} , sl. 5.55. Prema tome, cilj ovog eksperimenta je određivanje kritične vrednosti J -integrala, J_{Ic} , a postupak ispitivanja se ogleda u dobijanju R -krive, odnosno J - Δa krive, koja se sastoji od vrednosti J -integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa .

Naši eksperimenti su izvođeni metodom ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti jedne epruvete, kako je to definisano standardom ASTM E813 [28, 31]. Cilj metode popustljivosti sa rasterećenjem je da se registruje veličina razvoja prsline, Δa , koja nastaje tokom ispitivanja. Samo ispitivanje epruveta izvađenih iz uzorka sa vrhom zamorne prsline u eksploatisanom i novom u OM, MŠ i ZUT sa eksploatisane i nove strane, rađeno je na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C, na elektromehaničkoj kidalici, sl. 5.57.

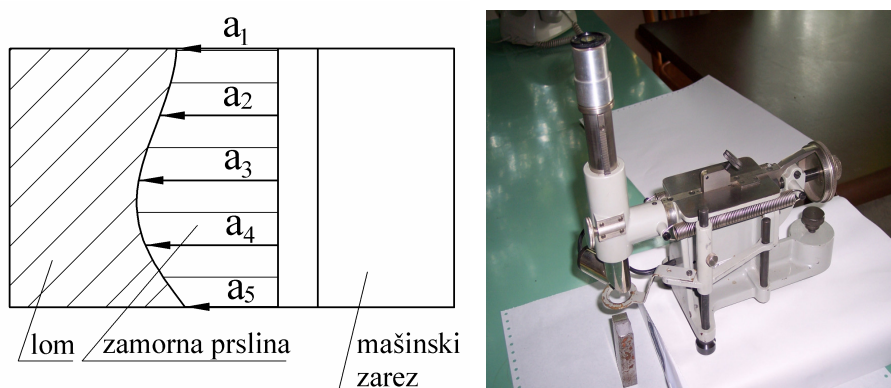
Kod ispitivanja na sobnoj temperaturi epruveta je bila opremljena *COD* ekstenzometrom radi registrovanja otvaranja vrha prsline. To nije bio slučaj kod ispitivanja na povišenim temperaturama. Naime, zbog nedostatka ekstenzometra za rad na povišenim temperaturama, otvaranje vrha prsline je registrovano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

Opterećenje na savijanje ili zatezanje u zavisnosti od toga koji smo tip epruvete ispitivali, se uvodilo malom brzinom, i u konkretnom slučaju brzina uvođenja opterećenja iznosila je 1 mm/min. Opterećenje se uvodilo sa povremenim rasterećivanjima do trenutka velikih plastičnih deformacija ili loma epruvete, odnosno izlaska iz opsega merenja ekstenzometra, odnosno induktivnog davača. Za to vreme su se A/D konvertorom prikupljali podaci o opterećenju, pomeranju i otvaranju vrha prsline.



Slika 5.57. Izgled postupka ispitivanja
a) SEB epruvete, b) CT epruvete

Po završetku ispitivanja obeležava se pozicija prsline nastale zatezanjem ispitivane epruvete. Markiranje položaja prsline se vrši na dva načina. Epruvete ispitane na sobnoj temperaturi se zagreju na 200 do 250°C, a epruvete ispitane na povišenim temperaturama se naknadno zamaraju. Ovo je potrebno uraditi radi preciznijeg određivanja ukupne dužine prsline. Potom se epruvete lome, da bi mogle da se izmere početne a_0 i krajnje dužine prsline a_f . S obzirom da front prsline nije paralelan sa ulaznom ivicom epruvete merenja se vrše duž 5 do 9 paralelnih mernih linija, u zavisnosti od debljine epruvete i pravilnosti fronta zamorne prsline. Shema postupka merenja dužine prsline, kao i sam uređaj za merenje su dati na sl. 5.58.

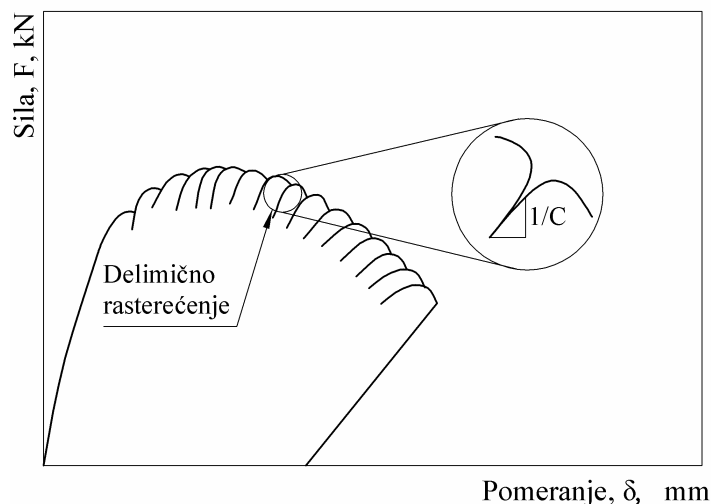


Slika 5.58. Shema postupka i uređaj za merenje dužine prsline

Dužina zamorne prsline biće: $a_{zsr} = \frac{a_{z1} + a_{z2} + \dots + a_{zn}}{n}$

Ukupna dužina prsline tada je: $a = a_0 + a_{zsr}$

Uočljiva rasterećenja na krivoj sila F -otvaranje vrha prsline δ , sl. 5.59, služe za određivanje popustljivosti ispitivane epruvete pri trenutnoj dužini prsline a ($a = a_0 + a_z$).



Slika 5.59. Kriva sila F -otvaranje vrha prsline δ

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

$$\Delta a_i = \Delta a_{i-1} + \left(\frac{b_{i-1}}{\eta_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{C_{i-1}} \right) \quad (5.16)$$

gde je:	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;
	$\eta_{i-1} = 2$	- koeficijent za SEB epruvete;
	$\eta_{i-1} = 2 + 0,522 b_i/W$	- koeficijent za CT epruvete, i
	b_{i-1}	- prethodna dužina ligamenta.

J -integral je jednak zbiru elastične komponente J -integrala i plastične komponente J -integrala [16]:

$$J_{(i)} = J_{el} + J_{pl} \quad (5.17)$$

Za SEB i CT epruvete elastična komponenta J -integrala, odnosno energije se računa na osnovu izraza [16]:

$$J_{el(i)} = \frac{K_i^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \quad (5.18)$$

gde je:	K_i	- faktor intenziteta napona, definisan standardom ASTM E 399;
	ν	- Poasonov koeficijent, i
	E	- modul elastičnosti.

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

$$K_i = \frac{F_i \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \cdot f(a_0/W) \quad (5.19)$$

a za CT epruvete:

$$K_i = \frac{F_i}{(B \cdot B_N \cdot W)^{1/2}} \cdot f(a_i/W) \quad (5.20)$$

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

$$f(a_0/W) = \frac{3(a_0/W)^{1/2} \left[1,99 - (a_0/W)(1 - a_0/W) \cdot (2,15 - 3,93(a_0/W) + 2,7(a_0/W)^2) \right]}{2(1 + 2a_0/W)(1 - a_0/W)^{3/2}} \quad (5.21)$$

a za CT epruvete:

$$f(a_i/W) = \frac{(2 + a_i/W) \left[0,866 + 4,64(a_i/W) - 13,32(a_i/W)^2 + 14,72(a_i/W)^3 - 5,6(a_i/W)^4 \right]}{(1 - a_i/W)^{3/2}} \quad (5.22)$$

Plastična komponenta J -integrala, odnosno energije se računa na osnovu izraza [16]:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_i}{b_i} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_i \frac{(a_i - a_{i-1})}{b_i} \right] \quad (5.23)$$

gde je:	A_{pl}	- plastična komponenta energije, sl. 5.60;
	S	- raspon između oslonaca;
	B_N	- neto širina epruvete;
	$\eta_i = 2$	- koeficijent za SEB epruvete;
	$\eta_i = 2 + 0,522 b_i/W$	- koeficijent za CT epruvete;
	$\gamma_i = 1$	- za SEB epruvete, i
	$\gamma_i = 1 + 0,76 b_i/W$	- za CT epruvete.

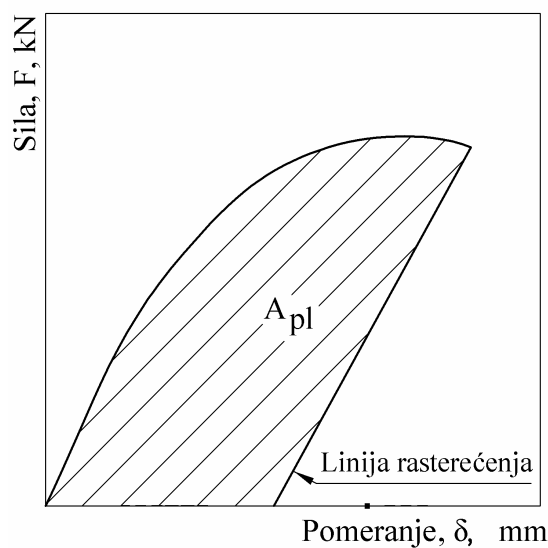
Plastična komponenta energije $A_{pl(i)}$ izračunava se na osnovu podataka dobijenih sa dijagrama $F-\delta$, sl. 5.60 i zavisnosti:

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[F_i + F_{i-1}] \cdot [\delta_{pl(i)} - \delta_{pl(i-1)}]}{2} \quad (5.24)$$

Na osnovu dobijenih podataka konstruiše se $J-\Delta a$ kriva na kojoj se konstruiše regresiona linija prema ASTM E1152. Iz dobijene regresione linije dobija se kritični J -integral, J_{Ic} . Poznavajući vrednosti kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (5.25)$$

Uticaj eksploatacionih uslova, odnosno vremena eksploatacije i temperature na sklonost ka krtom lomu novog i eksploatisanog OM, kao i komponenti zavarenog spoja (MŠ i ZUT) je ocenjivan određivanjem žilavosti loma u uslovima ravne deformacije, odnosno kritične vrednosti faktora intenziteta napona K_{Ic} . Kritična vrednost faktora intenziteta napona K_{Ic} je određena primenom metode jedne epruvete sukcesivnim opterećenjem i rasterećenjem. Rađeno je pet grupa epruveta: epruvete sa zarezom u novom OM, epruvete sa zarezom u eksploatisanog OM, epruvete sa zarezom u MŠ, epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, i epruvete sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM.



Slika 5.60. Plastična komponenta energije

Na osnovu 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 usta prsline. Ovi dijagrami su podloga za određivanje kritične vrednosti J -integrala, J_{Ic} , a sam postupak se ogleda u dobijanju R -krive, odnosno $J-\Delta a$ krive, koja se sastoji od vrednosti J -integrala za ravnomerne priraštaje prsline Δa . Međutim, da bi mogli da odredimo dužinu prsline Δa , koristeći jednačinu 5.17, neophodno je bilo izmeriti dužinu prvobitne zamorne prsline a_z .

5.9.1. Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u OM

Izračunate vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , su date u tab. 5.15 za epruvete sa zarezom u novom OM, a u tab. 5.16 za epruvete sa zarezom u eksploatisanom OM, ispitane na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C.

Važno je napomenuti da je u proračunu za žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} korišćena jedna vrednost za modul elastičnosti na sobnoj temperaturi (210GPa), a druga vrednost za povišene temperature (približno 160GPa za 540°C). Primenom osnovne formule mehanike loma:

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad (5.26)$$

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

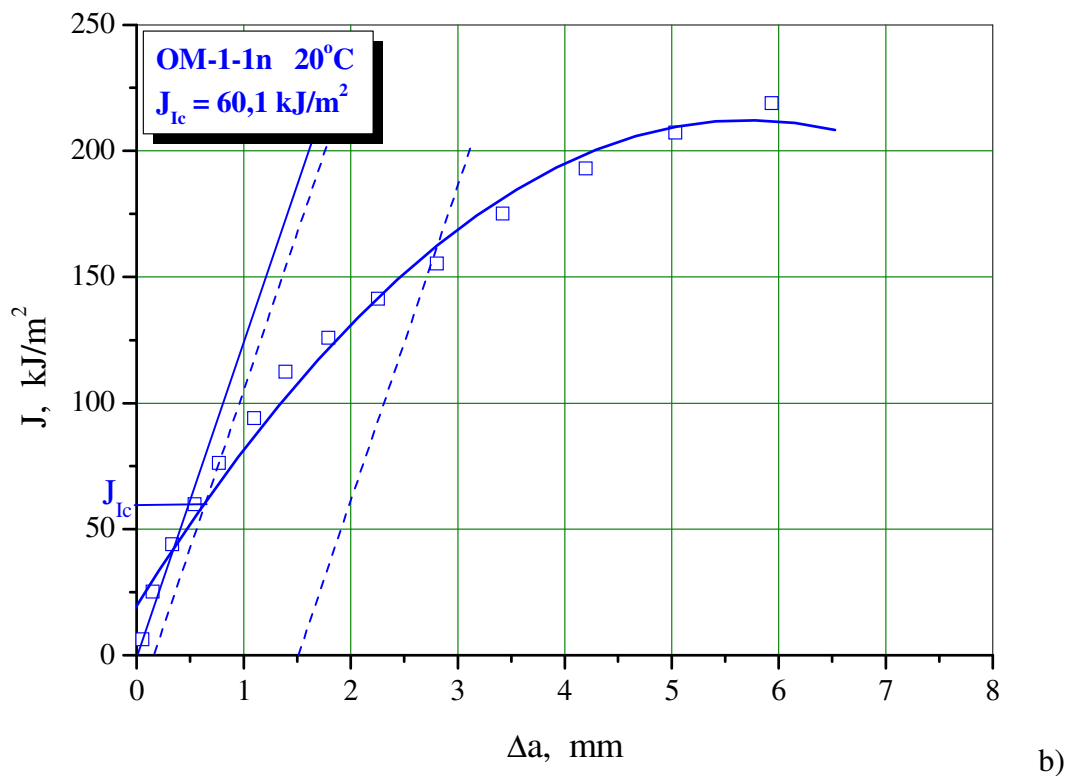
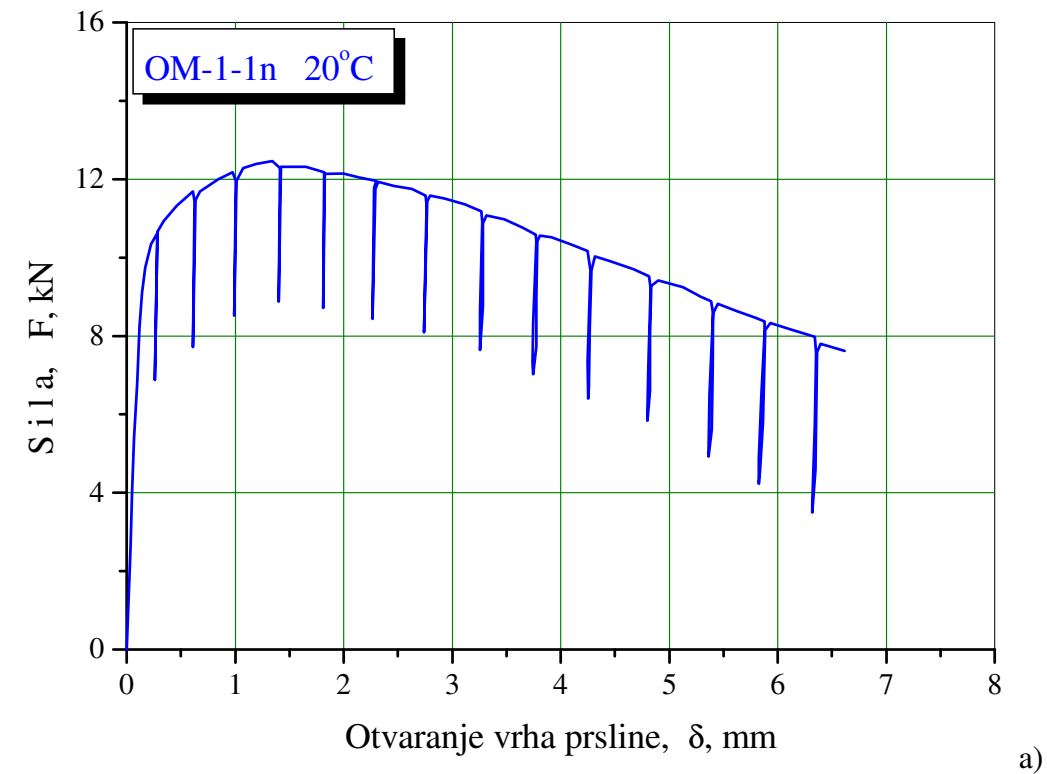
Tabela 5.15. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u novom OM

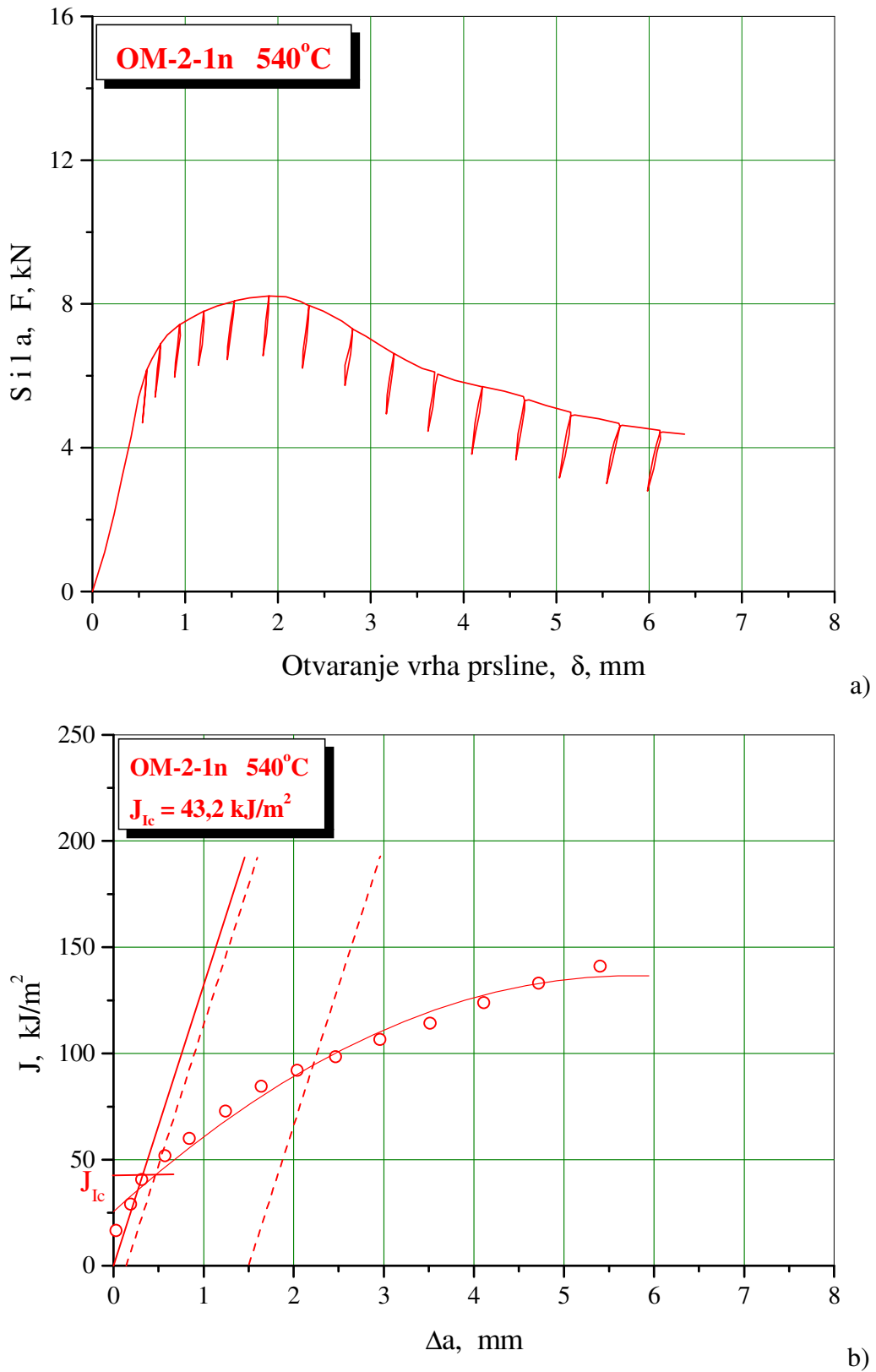
Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline, a_c , mm
OM-1-1n	20	60,1	117,8	38,5
OM-1-2n		63,9	121,4	40,8
OM-1-3n		58,6	116,3	37,5
OM-2-1n	540	43,2	87,2	40,0
OM-2-2n		44,7	88,7	41,4
OM-2-3n		45,3	89,2	41,9

Tabela 5.16. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u eksploatisanom OM

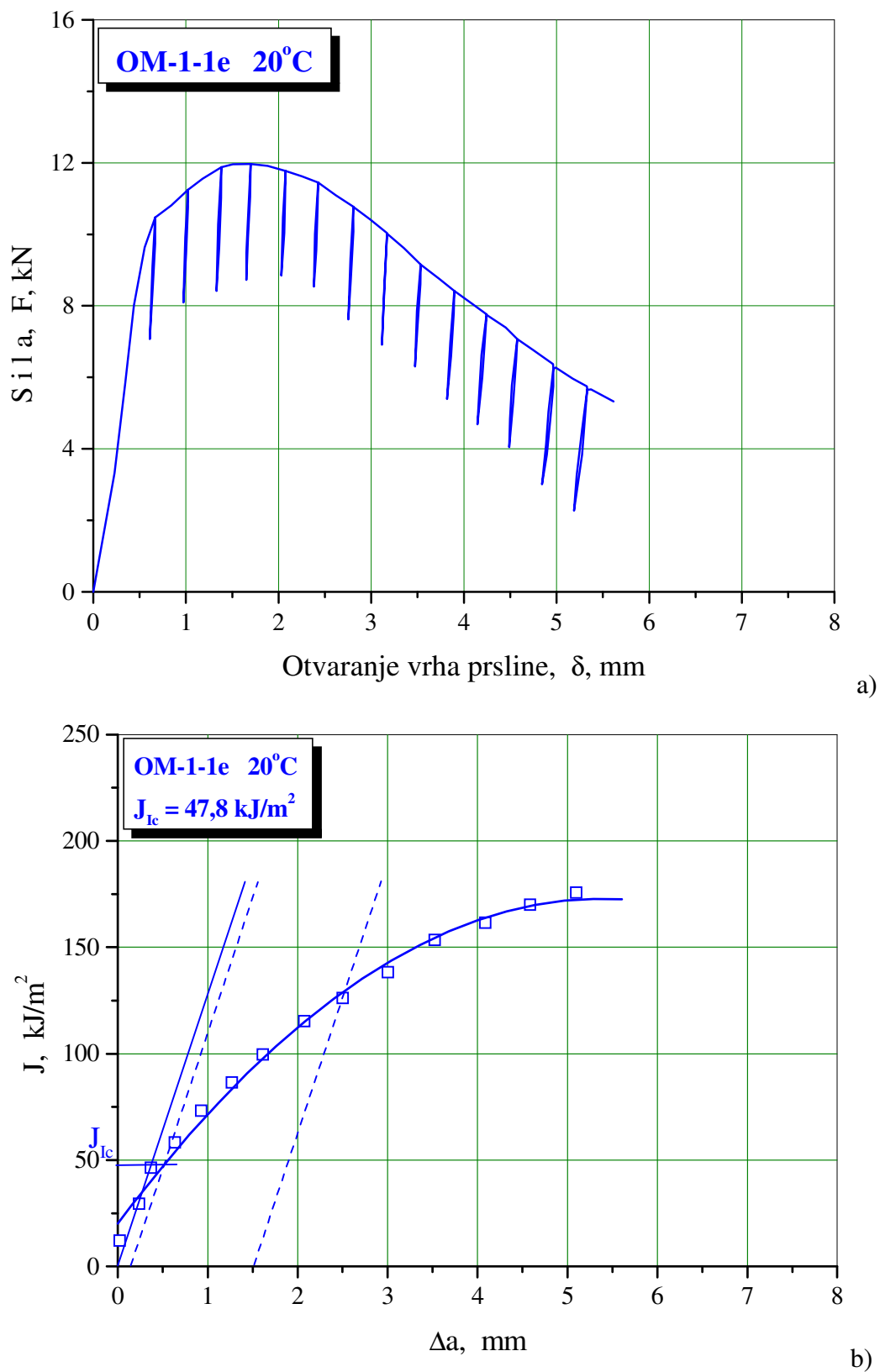
Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline, a_c , mm
OM-1-1e	20	47,8	105,0	41,7
OM-1-2e		42,1	98,6	36,8
OM-1-3e		40,7	96,9	35,6
OM-2-1e	540	24,5	65,6	30,8
OM-2-2e		22,7	63,2	28,6
OM-2-3e		21,8	61,9	27,4

Karakteristični dijagrami $F-\delta$ i $J-\Delta a$ za epruvetu izvađenu iz uzorka novog OM su dati na sl. 5.61 za epruvetu oznake OM-1-1n ispitano na sobnoj temperaturi, i na sl. 5.62 za epruvetu oznake OM-2-1n ispitano na temperaturi od 540°C.

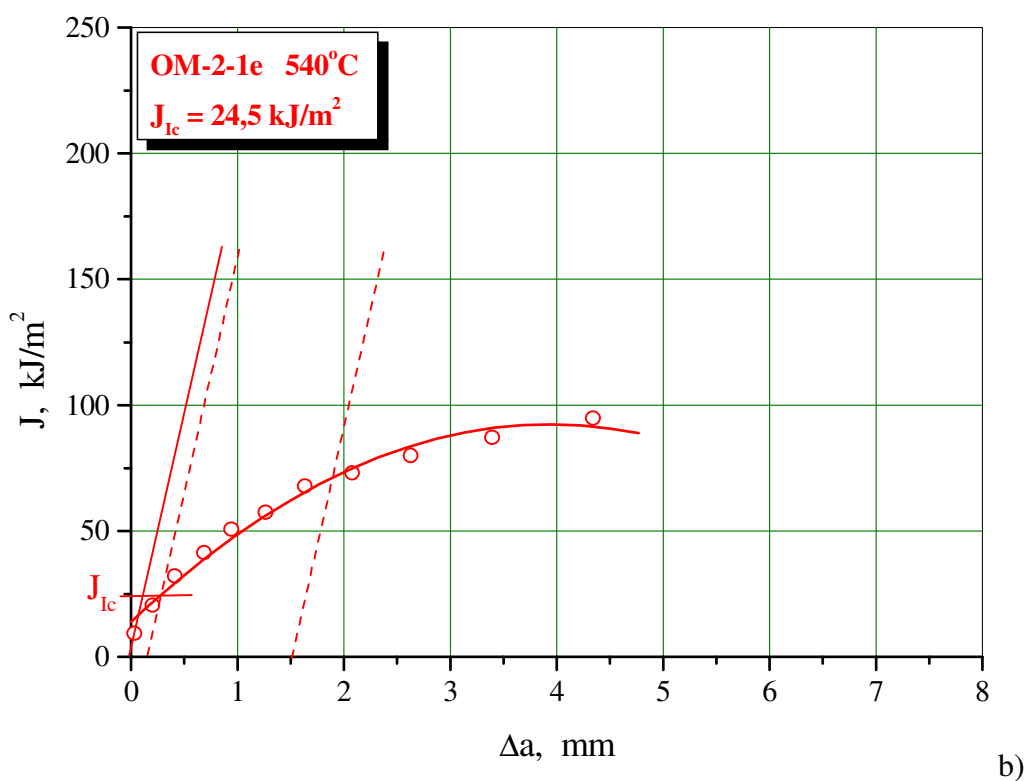
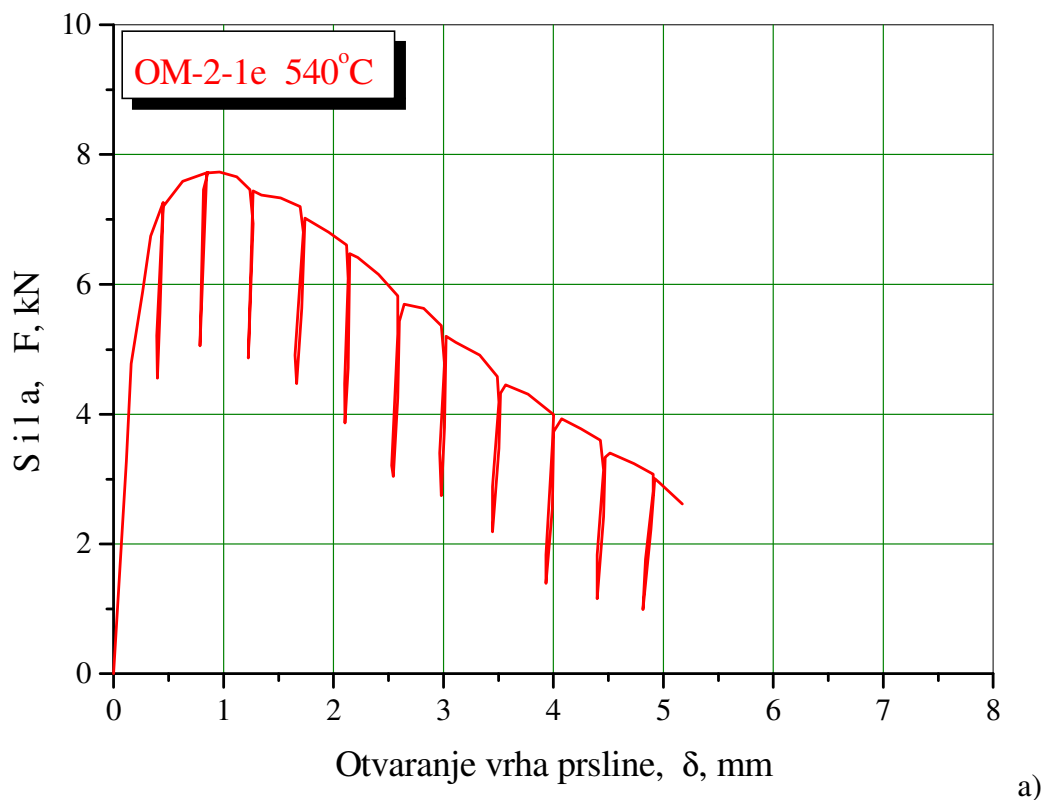
Slika 5.61. Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete OM-1-1n

Slika 5.62. Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-2-1n

Dijagrami $F-\delta$ i $J-\Delta a$ za epruvetu izvađenu iz uzorka eksploatisanog OM su dati na sl. 5.63 za epruvetu oznake OM-1-1e ispitanu na sobnoj temperaturi, i na sl. 5.64 za epruvetu oznake OM-2-1e ispitanu na temperaturi od 540 °C.

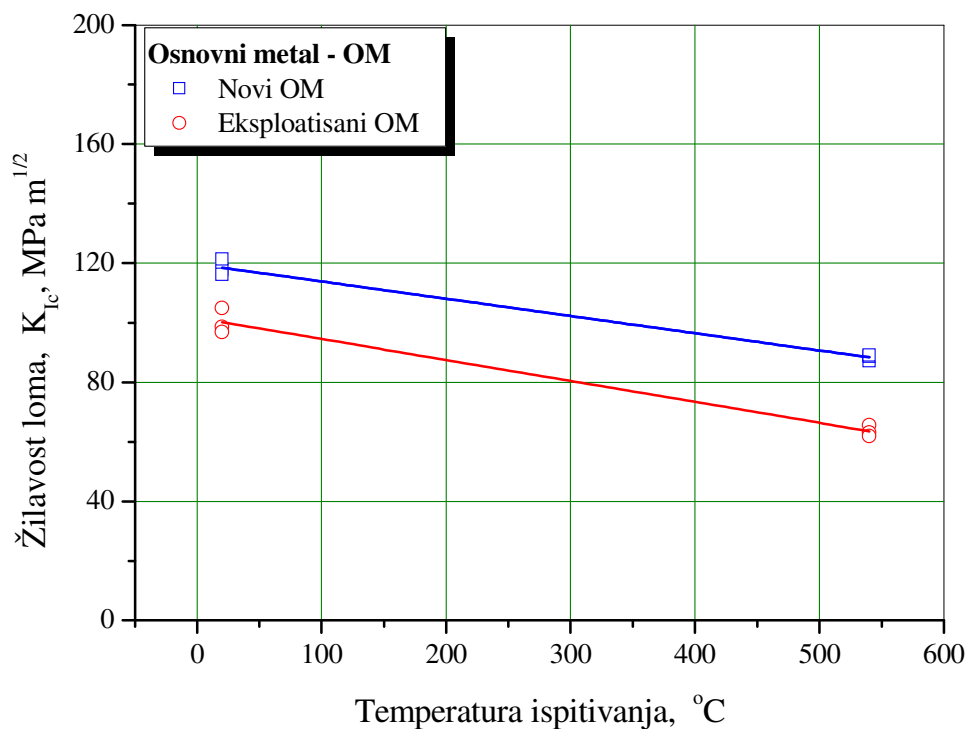


Slika 5.63. Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete OM-1-1e

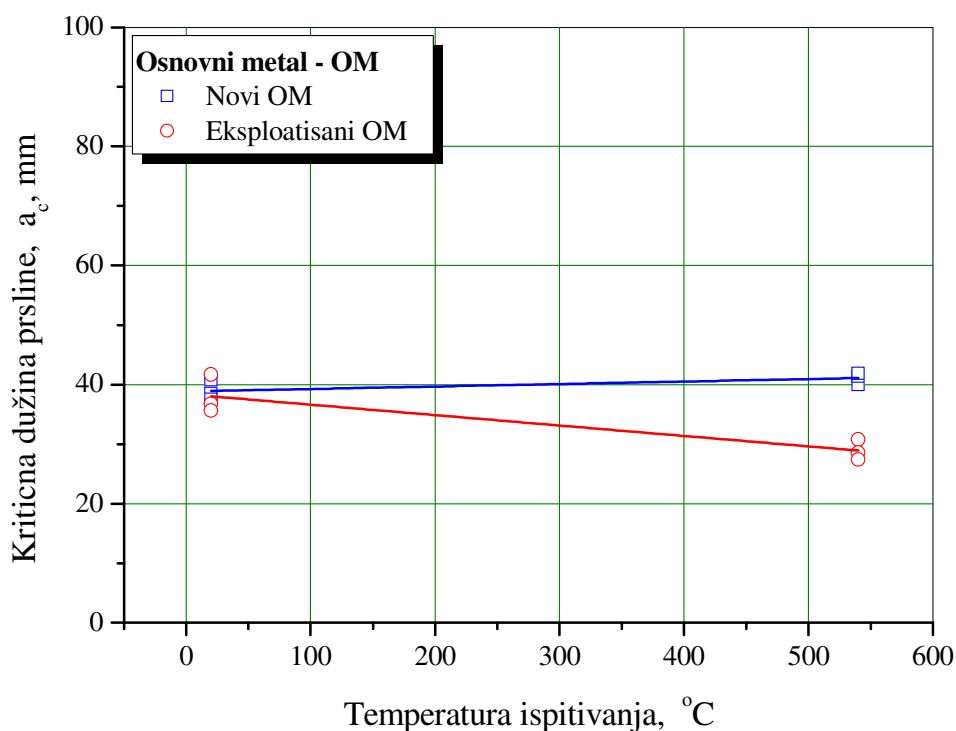


Slika 5.64. Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete OM-2-1e

Uticaj temperature ispitivanja i vremena eksploatacije na vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} za epruvete izvađene iz novog i eksploatisanog OM je grafički prikazan na sl. 5.65, a uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritične dužine prsline a_c , je grafički prikazan na sl. 5.66.



Slika 5.65. Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod OM



Slika 5.66. Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod OM

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja epruveta izvađenih iz novog i eksploatisanog OM, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti, kritičnog J_{Ic} integrala, odnosno žilavosti loma K_{Ic} .

Vrednosti žilavosti loma K_{Ic} epruveta, izvađenih iz novog OM, tab. 5.15, se kreću od 118MPa m^{1/2} dobijene ispitivanjem na 20°C i opadaju do 88MPa m^{1/2} na 540°C. Isto tako, vrednosti žilavosti loma K_{Ic} epruveta izvađenih iz eksploatacionog OM, tab. 5.16, se kreću od 100MPa m^{1/2} dobijene ispitivanjem na 20°C i takođe opadaju do 64MPa m^{1/2} na 540°C.

Dobijene vrednosti kritične dužine prsline, a_c , sl. 5.66, kod novog OM se gotovo ne menjaju kada je u pitanju sobna ili radna temperatura. To je bilo i za očekivati jer su za izračunavanje kritične dužine prsline, a_c , korišćene stvarne vrednosti napona tečenja, dobijene ispitivanjem zatezanjem. Međutim, eksploataciono slabljenje OM je dovelo do toga da vrednost a_c kod epruveta izvađenih iz eksploatacionog OM, opadne za oko 24% i iznosi oko 29mm.

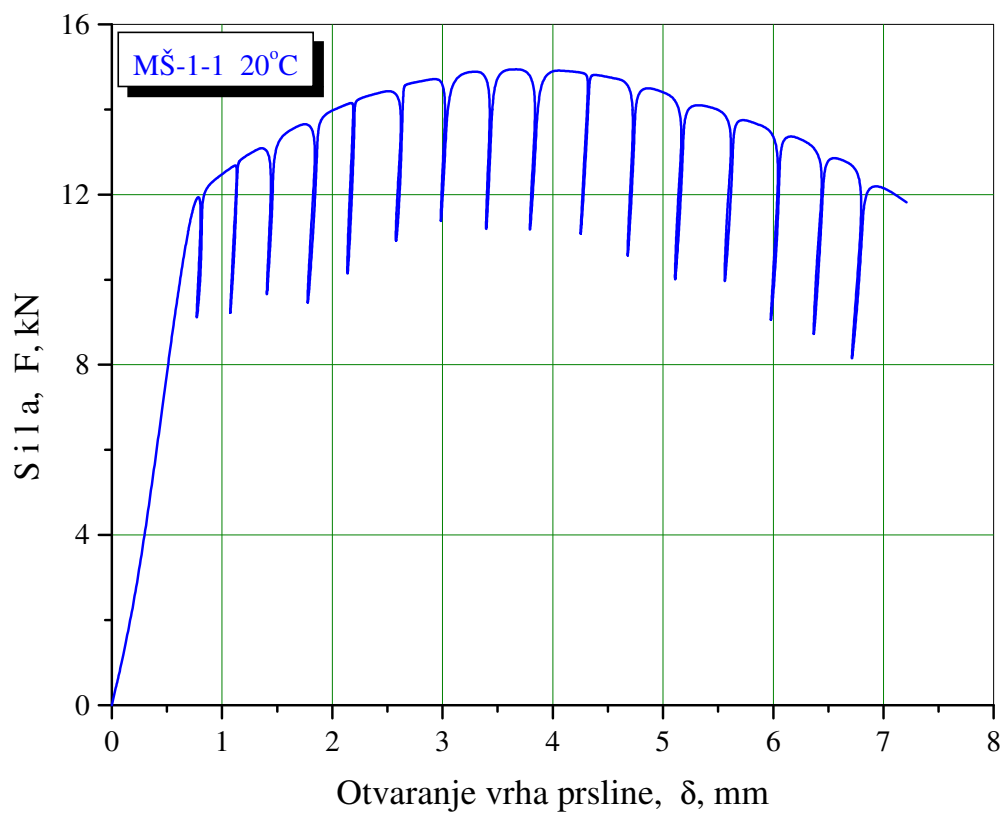
5.9.2. Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u MŠ

Izračunate vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , su date u tab. 5.17.

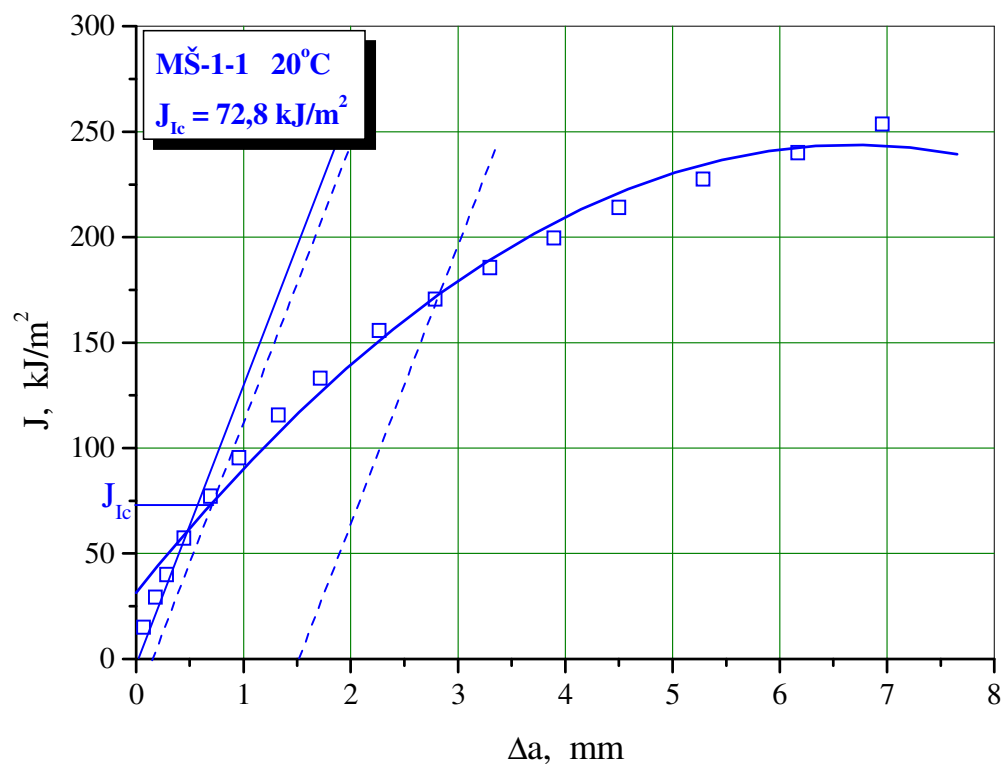
Tabela 5.17. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u MŠ

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline, a_c , mm
MŠ-1-1	20	72,8	129,6	20,2
MŠ-1-2		74,3	130,9	20,7
MŠ-1-3		71,1	128,1	19,8
MŠ-2-1	540	50,2	93,9	17,4
MŠ-2-2		52,6	96,2	18,2
MŠ-2-3		48,4	92,2	16,8

Dijagrami $F-\delta$ i $J-\Delta a$ za epruvetu sa zarezom u MŠ su dati na sl. 5.67 za epruvetu oznake MŠ-1-1 ispitivanu na sobnoj temperaturi, i na sl. 5.68 za epruvetu oznake MŠ-2-1 i ispitivanu na 540 °C.

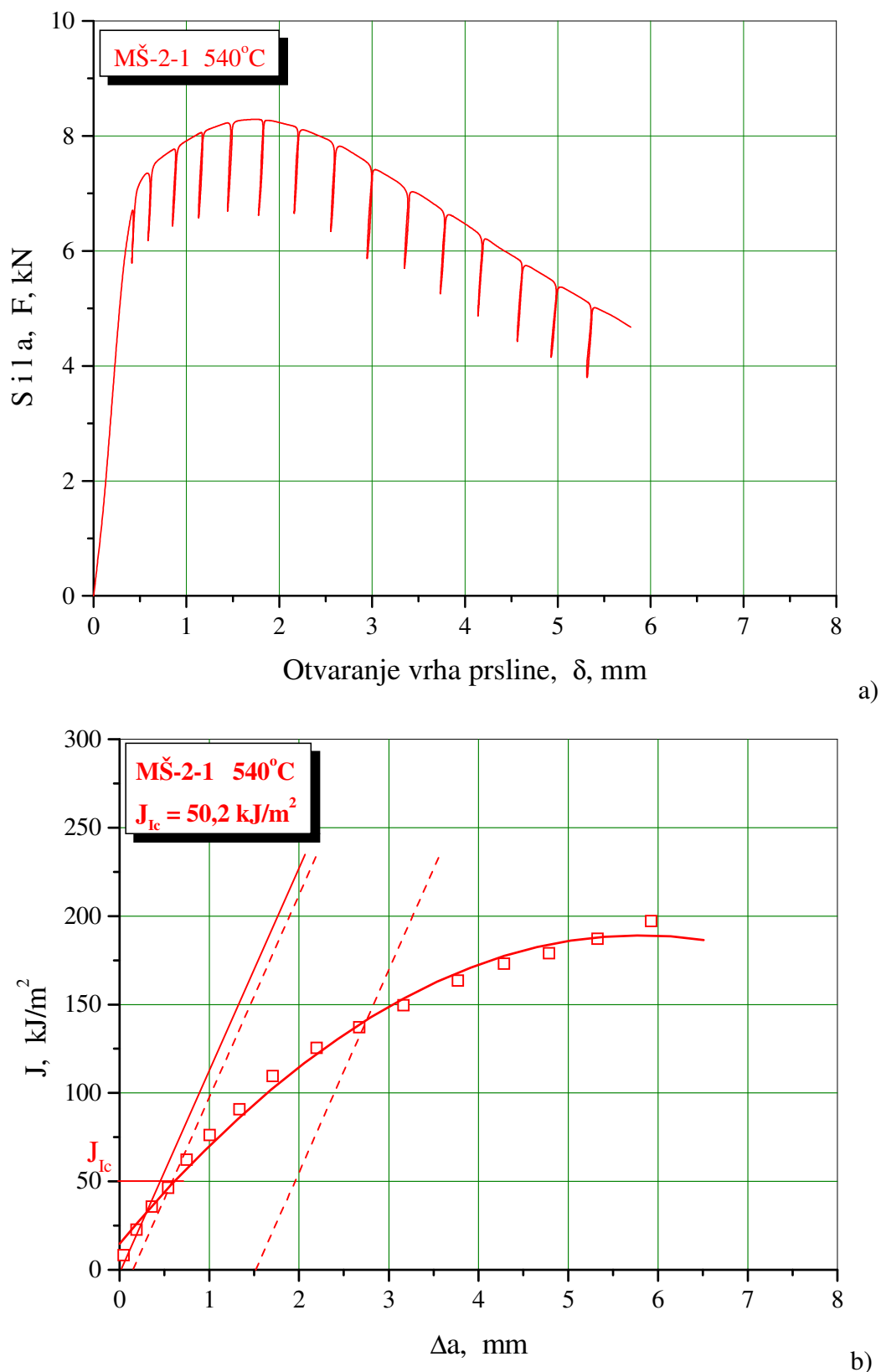


a)



b)

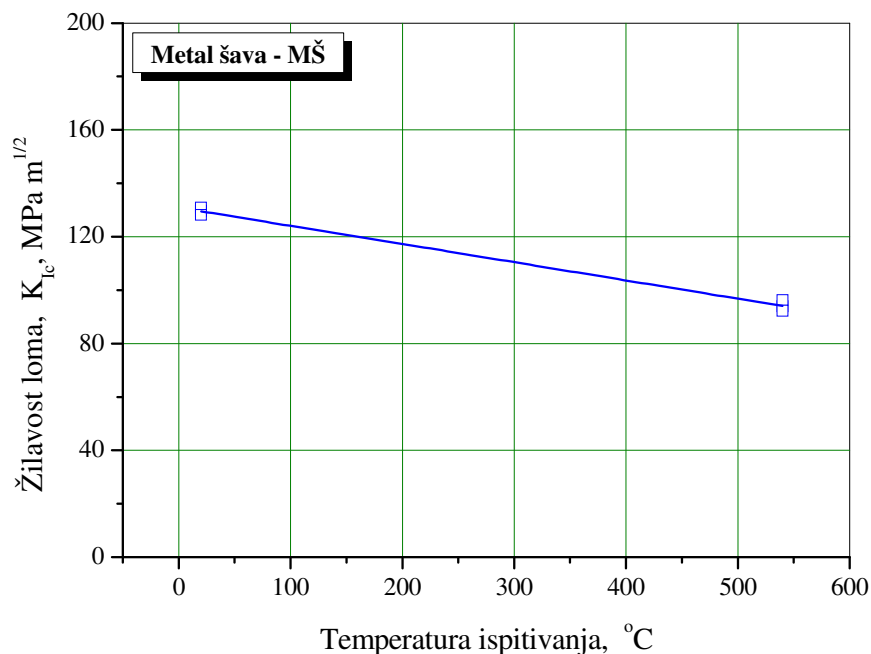
Slika 5.67. Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete MŠ-1-1



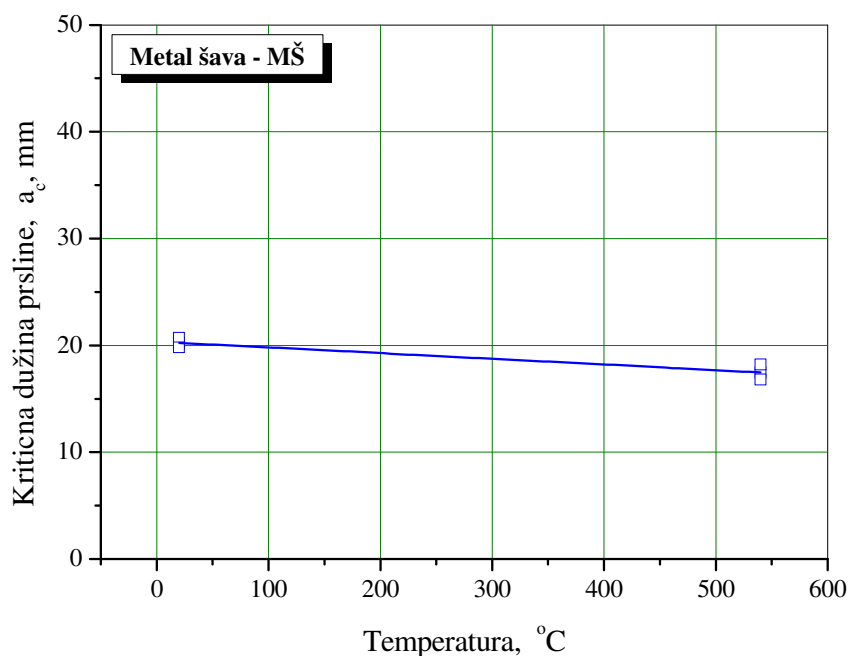
Slika 5.68. Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete MŠ-2-1

Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritičnog J_{Ic} , odnosno kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} za epruvete sa zarezom u MŠ je grafički prikazan na sl. 5.69, a uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritične dužine prsline a_c , je grafički prikazan na sl. 5.70.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja epruveta sa zarezom u MŠ, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti, kritičnog J_{Ic} integrala, odnosno žilavosti loma K_{Ic} . Vrednosti žilavosti loma K_{Ic} epruveta sa zarezom u MŠ, tab. 5.17, se kreću od $130 \text{ MPa m}^{1/2}$ dobijene ispitivanjem na 20°C do $94 \text{ MPa m}^{1/2}$ dobijene ispitivanjem na 540°C .



Slika 5.69. Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ



Slika 5.70. Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod MŠ

Dobijene vrednosti kritične dužine prslina a_c u odnosu na nivo napona tečenja su dosta niske, i kreću se od $20,2 \text{ mm}$ za sobnu temperaturu i padaju na $17,5 \text{ mm}$ koliko je dobijena vrednost a_c na ispitnoj temperaturi od 540°C . Međutim, ako se izračunaju vrednosti kritične

dužine prsline a_c u odnosu na nivo napona tečenja novog i eksploatisanog OM, one su značajno više, i govore o dobroj otpornosti na krti lom MŠ.

5.9.3. Određivanje K_{Ic} epruveta sa zarezom u ZUT

Izračunate vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , su date u tab. 5.18 za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog OM i u tab. 5.19 za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM, i ispitane na sobnoj temperaturi od 20°C i radnoj temperaturi od 540°C.

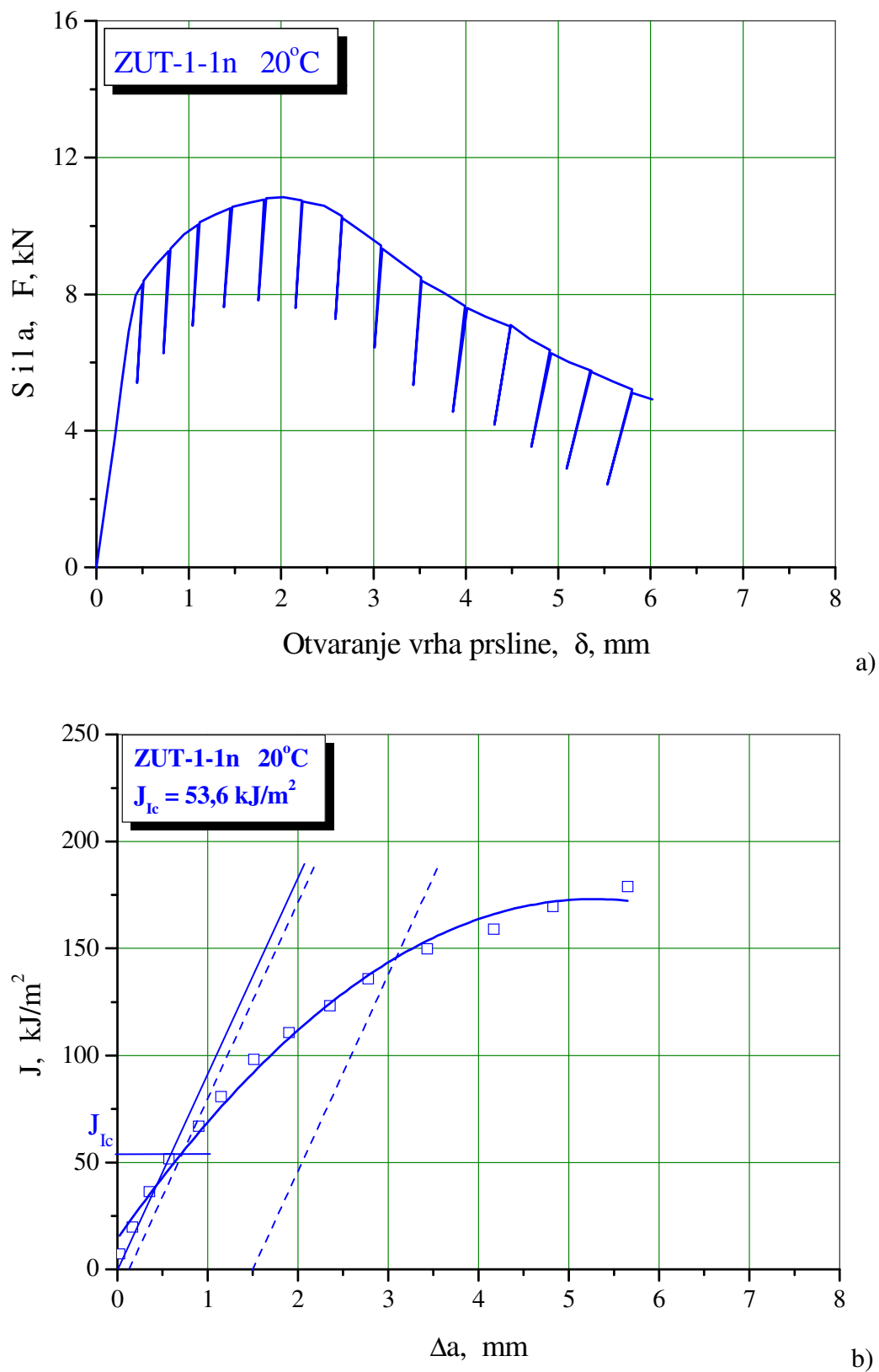
Tabela 5.18. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u novom ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline a_c , mm
ZUT-1-1n	20	53,6	111,2	34,3
ZUT-1-2n		51,7	109,2	33,0
ZUT-1-3n		49,8	107,2	31,8
ZUT-2-1n	540	33,6	76,9	31,1
ZUT-2-2n		34,2	77,5	31,6
ZUT-2-3n		36,1	79,7	33,4

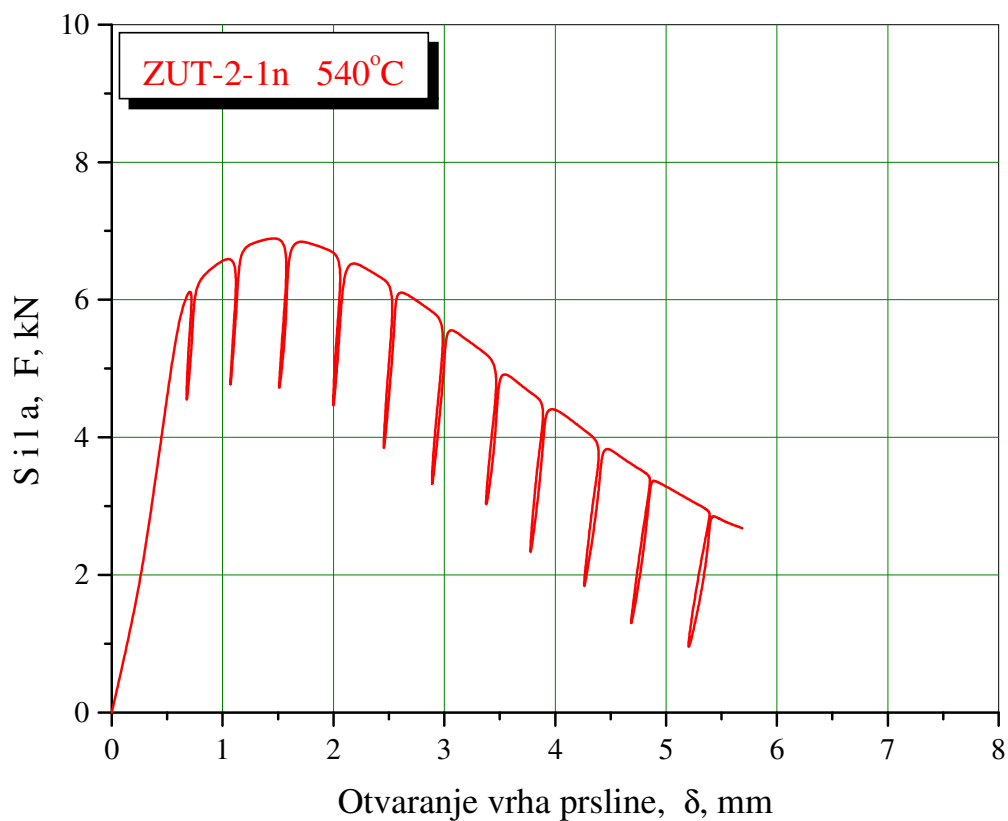
Tabela 5.19. Vrednosti K_{Ic} epruveta sa zarezom u eksploatisanom ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Kritični J-integral, J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}	Kritična dužina prsline a_c , mm
ZUT-1-1e	20	42,4	96,3	32,0
ZUT-1-2e		36,1	91,3	31,5
ZUT-1-3e		35,6	90,6	31,1
ZUT-2-1e	540	20,2	59,6	25,4
ZUT-2-2e		22,5	62,9	28,3
ZUT-2-3e		21,7	61,8	27,3

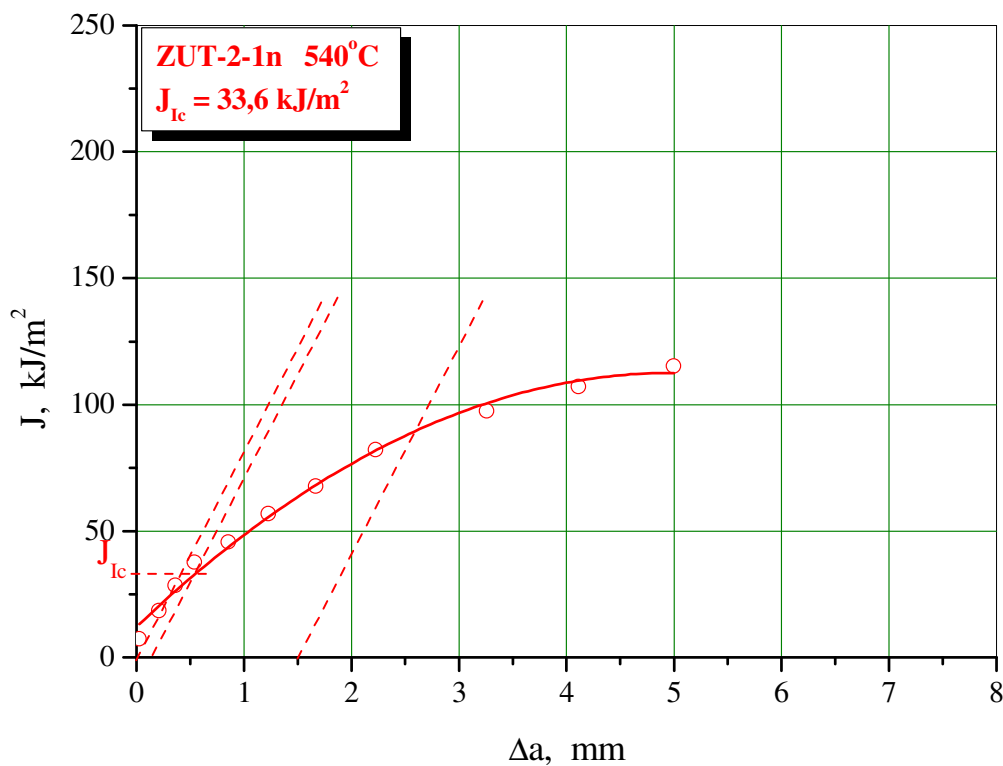
Karakteristični dijagrami $F-\delta$ i $J-\Delta a$ za ZUT sa strane novog OM dati su na sl. 5.71 za epruvetu oznake ZUT-1-1n ispitano na sobnoj temperaturi i na sl. 5.72 za epruvetu oznake ZUT-2-1n ispitano na 540°C. Takođe, dijagrami $F-\delta$ i $J-\Delta a$ za ZUT sa strane eksploatisanog OM su dati na sl. 5.73 za epruvetu oznake ZUT-1-1e ispitano na sobnoj temperaturi, i na sl. 5.74 za epruvetu oznake ZUT-2-1e ispitano na 540°C.



Slika 5.71. Dijagrami $F-\delta$ (a) i $J-\Delta a$ (b) epruvete ZUT-1-1n

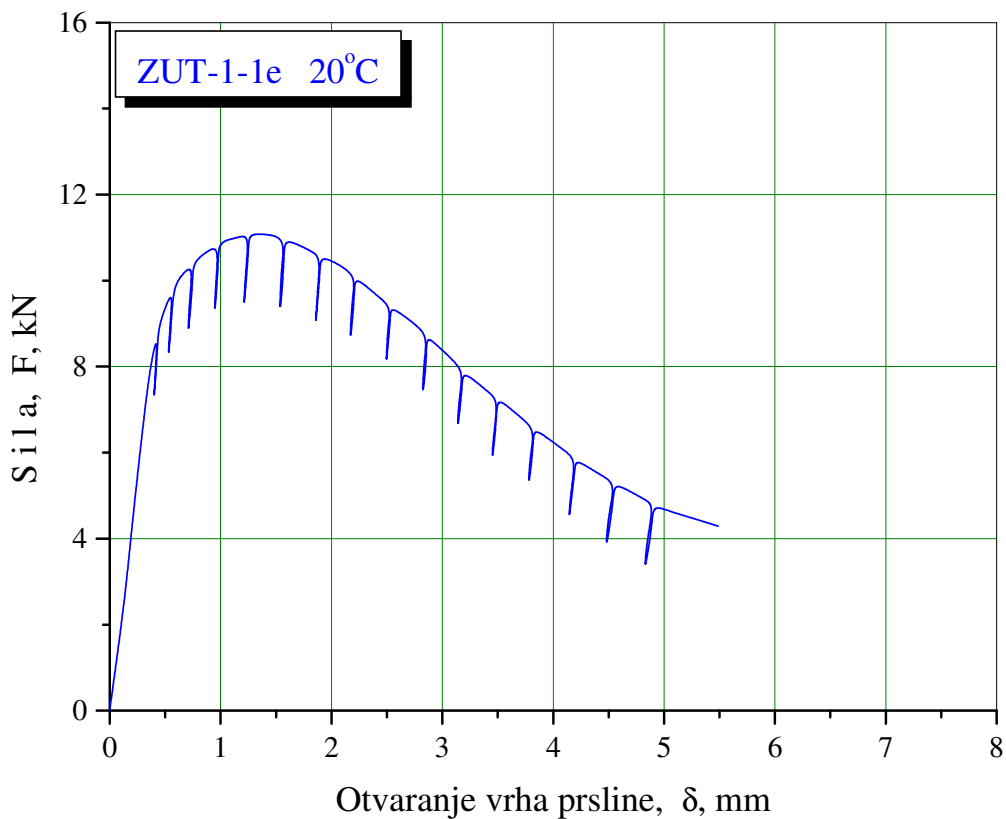


a)

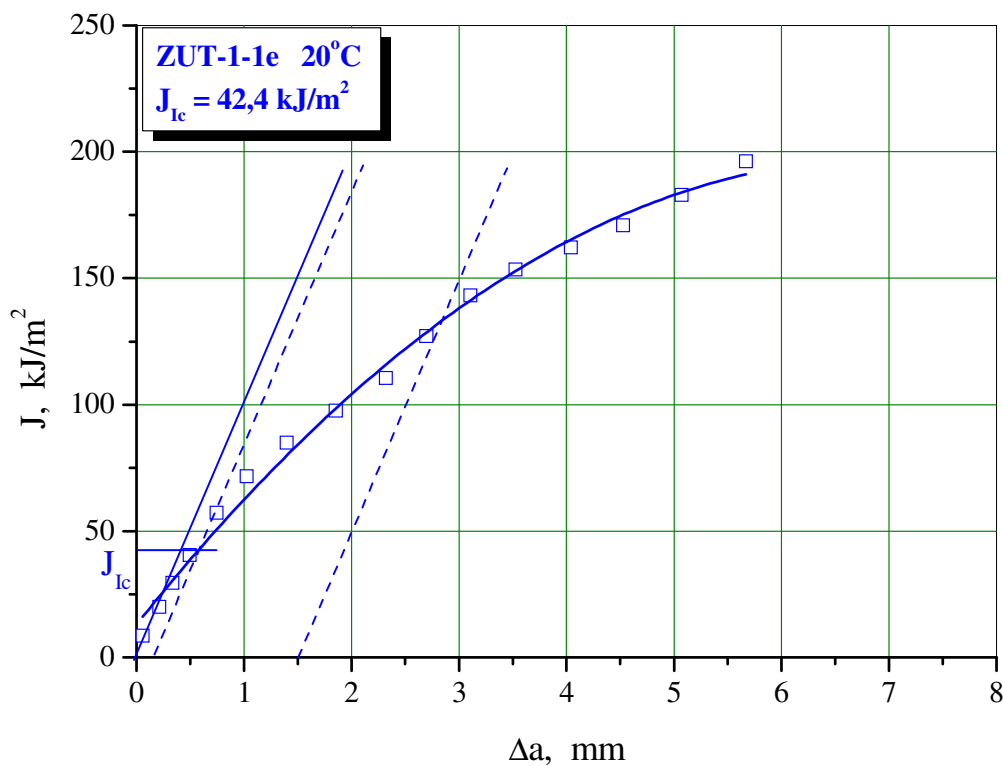


b)

Slika 5.72. Dijagrami F - δ (a) i J - Δa (b) epruvete ZUT-2-1n

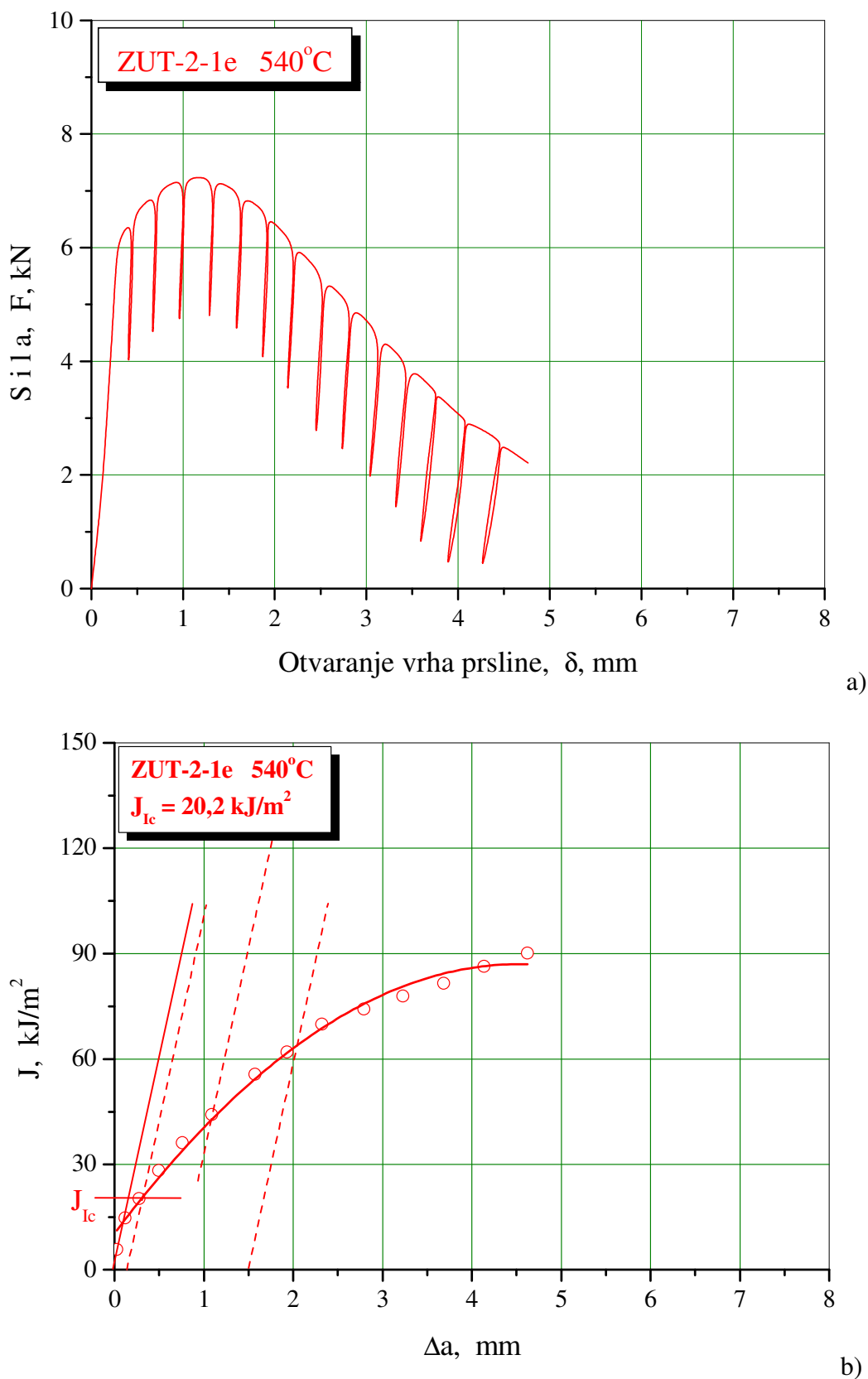


a)



b)

Slika 5.73. Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-1-1e



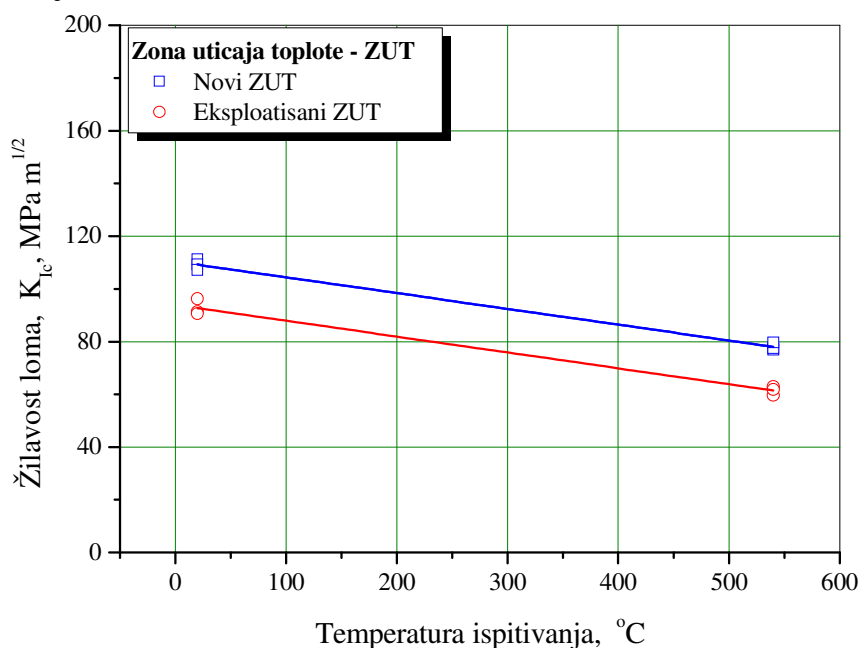
Slika 5.74. Dijagrami F- δ (a) i J- Δa (b) epruvete ZUT-2-1e

Uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritičnog J_{Ic} , odnosno kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM je grafički prikazan na sl. 5.75, a uticaj temperature ispitivanja na vrednosti kritične dužine

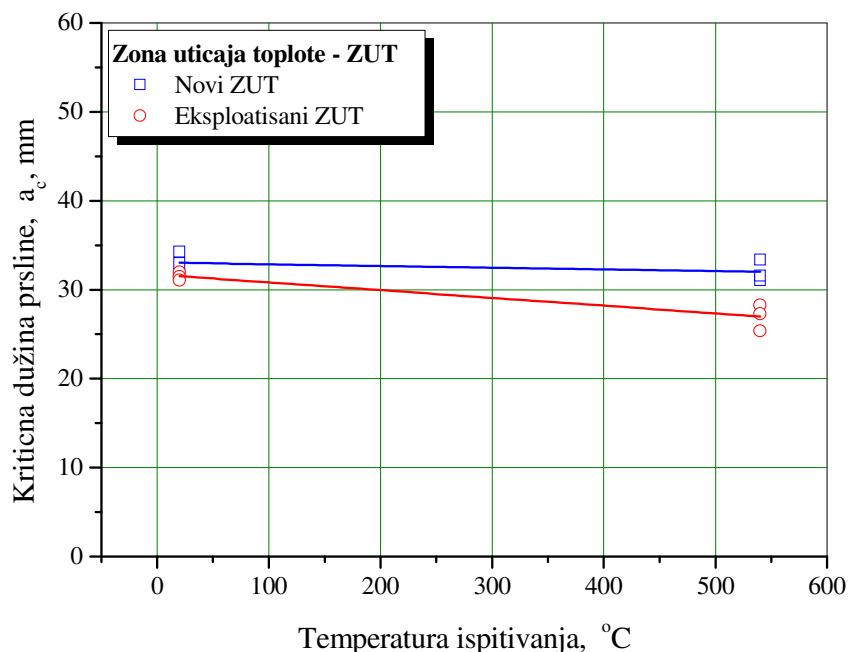
prsline a_c , takođe za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM je grafički prikazan na sl. 5.76.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja epruveta izvađenih iz ZUT vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do pada vrednosti kritičnog J_{Ic} , odnosno žilavosti loma K_{Ic} . Isto tako opada i vrednost kritične dužine prsline a_c .

Vrednosti žilavosti loma K_{Ic} epruveta sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, tab. 5.18, se kreću od $109 \text{MPa m}^{1/2}$ dobijene ispitivanjem na 20°C , i opadaju do $78 \text{MPa m}^{1/2}$ dobijene ispitivanjem na 540°C . Ispitivanjem epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM dobijeni su lošije vrednosti žilavosti loma K_{Ic} . Naime, vrednost žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , se kreće od $93 \text{MPa m}^{1/2}$ dobijena ispitivanjem na 20°C , i opada do $61 \text{MPa m}^{1/2}$ dobijena ispitivanjem na 540°C .



Slika 5.75. Promena vrednosti K_{Ic} u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT



Slika 5.76. Promena vrednosti a_c u zavisnosti od temperature ispitivanja kod ZUT

Dobijene vrednosti kritične dužine prsline, a_c , sl. 5.76, kod ZUT sa strane novog OM se neznatno menjaju kada je u pitanju sobna ili radna temperatura. Međutim, eksploataciono slabljenje OM je dovelo do toga da vrednost a_c kod epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM opadne i na ispitnoj temperaturi od 540°C iznosi oko 27mm.

5.9.4. Diskusija ispitivanja žilavosti loma

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} , koji je zbog nemogućnosti zadovoljenja uslova ravne deformacije određen posredno preko kritičnog J_{Ic} integrala, vidimo da vrednosti K_{Ic} takođe zavise od temperature ispitivanja, mesta postavljanja zareza, i vremena eksploatacije. Heterogenost mehaničkih osobina zavarenog spoja, odnosno komponenti zavarenog spoja značajno utiče na dobijene vrednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} .

Najslabija otpornost prema razvoju prsline pri statičkom delovanju sile, odnosno, najmanja vrednost K_{Ic} , je kod epruveta sa zarezom u ZUT, a najbolja otpornost prema razvoju prsline je kod epruveta sa zarezom u MŠ. Karakter krivih, se isključivo menja u zavisnosti od temperature ispitivanja, mesta postavljanja zareza, i vremena eksploatacije. Analizirajući dobijene krive, vidimo gotovo identičnu zavisnost karaktera pojedinačnih krivih u svakoj grupi, s tim što je razlika između epruveta u vrednostima maksimalne sile, F_{max} , što je u direktnoj zavisnosti od dužine zamorne prsline, a .

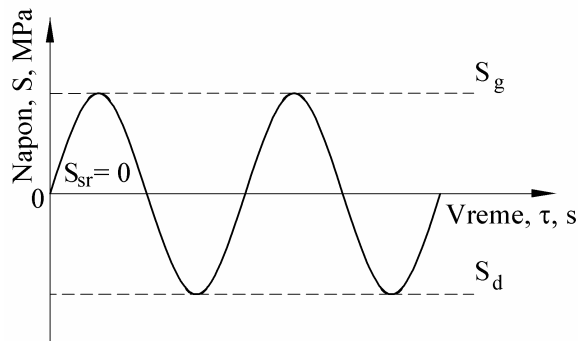
Vreme eksploatacije je značajno uticalo na otpornost prema razvoju prsline, što generalno treba dovesti u vezu sa slabljenjem mehaničko eksploatacijskih osobina korišćenog materijala u odnosu na novi materijal. Vidimo da period eksploatacije od 40 godina ima uticaja na vrednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} , i ona kod eksploatisanog OM, i kod ZUT sa strane eksploatisanog OM opada, tab. 5.16 i 5.19. Otpornost prema razvoju prsline, kod epruveta izvađenih iz eksploatisanog OM, kao i iz ZUT sa strane eksploatisanog OM je za približno 20% niža nego kod epruveta izvađenih iz uzoraka novog OM, i ZUT sa strane novog OM.

Dobijeni rezultati ispitivanja parametara mehanike loma (K_{Ic} , J_{Ic} i a_c) ukazuju na dve stvari. Prvo, da je sklonost ka krtom lomu u uslovima delovanja statičkog opterećenja, najmanja kod epruveta sa prslinom u MŠ i OM, a najveća kod epruveta sa prslinom u ZUT, odnosno ZUT u konkretnom slučaju ima najlošiju otpornost prema krtom lomu. Drugo, dobijeni rezultati ispitivanja eksploatisanog materijala ukazuju na značajnu razliku u rezultatima u odnosu na novi materijal.

5.10. ISPITIVANJA PROMENLJIVIM OPTEREĆENJEM

Zamor metala je definisan kao proces zbirnog oštećenja pod dejstvom promenljivog opterećenja, a koji se iskazuje pojavom zamorne prsline i loma. Zamorna čvrstoća zavarenih spojeva određuje se ispitivanjem epruveta pri promenljivom opterećenju do pojave prsline ili loma. U slučaju reaktora, odnosno posuda pod pritiskom koje rade u uslovima povišenog pritiska i temperature, od posebnog su značaja ispitivanja visokocikličnog zamora. Čvrstoća zavarenog spoja pri promenljivim opterećenjima, kakva se javljaju u nestacioniranim režimima rada reaktora u periodu startovanja i zaustavljanja je važna karakteristika pri oceni integriteta i preostalog veka. Pri tom treba imati u vidu da do oštećenja u vidu prsline dolazi posle velikog broja promena opterećenja pri naponima nižim od napona tečenja (visokociklični zamor). Zbog obimnosti eksperimenta, posebno je interesantan visokociklični zamor, koji je i bio predmet eksperimentalnih istraživanja.

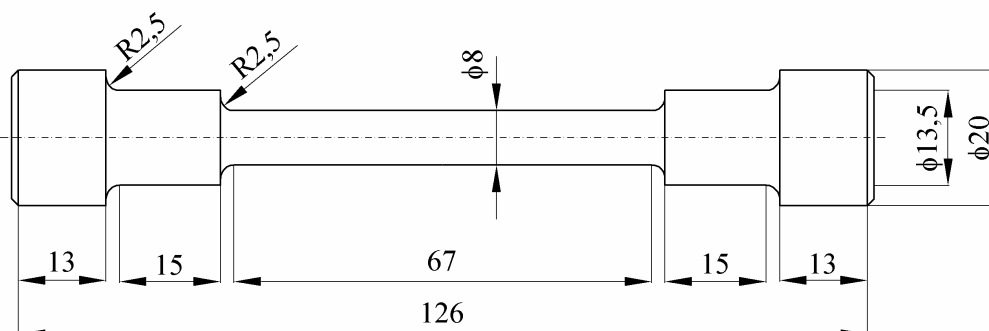
Pri nivou opterećenja nižim od napona tečenja, karakterističnom za visokociklični zamor, najčešće se ispitivanje izvodi u krutom režimu, odnosno pri zadatoj amplitudi napona S_a , MPa. Najbolje je da ciklus opterećenja simulira uslove rada konstrukcije, ali se praktično koriste uprošćeni oblici ciklusa opterećenja. Najčešće se koristi najkritičniji slučaj, slučaj naizmenično promenljivog opterećenja, čija shema je prikazana na sl. 5.77.



Slika 5.77. Shema naizmenično promenljivog opterećenja $R = -1$

Jasno je da čvrstoća pri visokocikličnom zamoru zavisi od osobina konstituenata zavarenog spoja. Pri tom treba imati u vidu da se karakteristike visokocikličnog zamora znatno menjaju tek na temperaturama preko 400°C za čelik za posude pod pritiskom i za njihove zavarene spojeve, te ova ispitivanja čini opravdanim tek za radne temperature, koje za ovu grupu materijala iznose max. 550°C .

Ispitivanje uticaja temperature i vremena eksploatacije na ponašanje novog OM i eksploatisanog OM čelika kvaliteta *A-387 Gr. B*, kao i sučeono zavarenog spoja ova dva čelika u uslovima delovanja promenljivog opterećenja je rađeno sa ciljem da se odrede tačke u $S-N$ dijagramu (konstruisanja Velerove krive) i da se odredi trajna dinamička čvrstoća S_f . Postupak ispitivanja, kao i epruvete za ispitivanje definisane su standardima ASTM E466 [66], ASTM E467 [67], i ASTM E468 [68]. Izgled epruvete za ispitivanje promenljivim opterećenjem je prikazan na sl. 5.78.



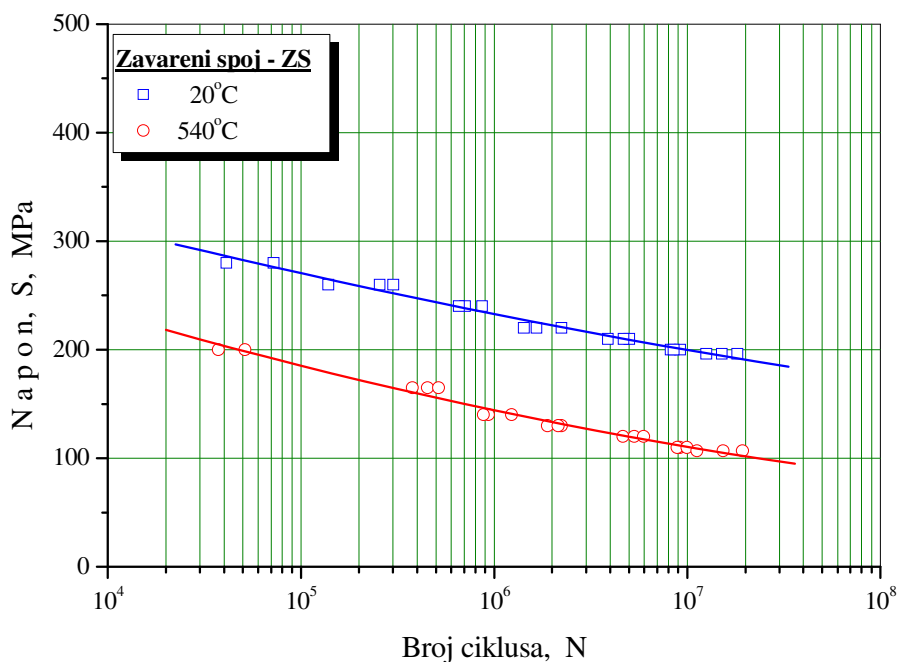
Slika 5.78. Epruveta za dinamička ispitivanja prema ASTM E466 [66]

Samo ispitivanje je rađeno na visokofrekventnom pulzatoru na kome su inicirane prsline za epruvete mehanike loma. Ostvarena učestanost se kretala od 115-165Hz, u zavisnosti od veličine opterećenja i ispitivane temperature. U cilju potpunije ocene ponašanja materijala pri delovanju promenljivog opterećenja, a imajući u vidu dimenzije epruvete, rađen je najkritičniji slučaj delovanja promenljivog opterećenja, i to naizmenično promenljivo opterećenje zatezanje-pritiskak ($R = -1$).

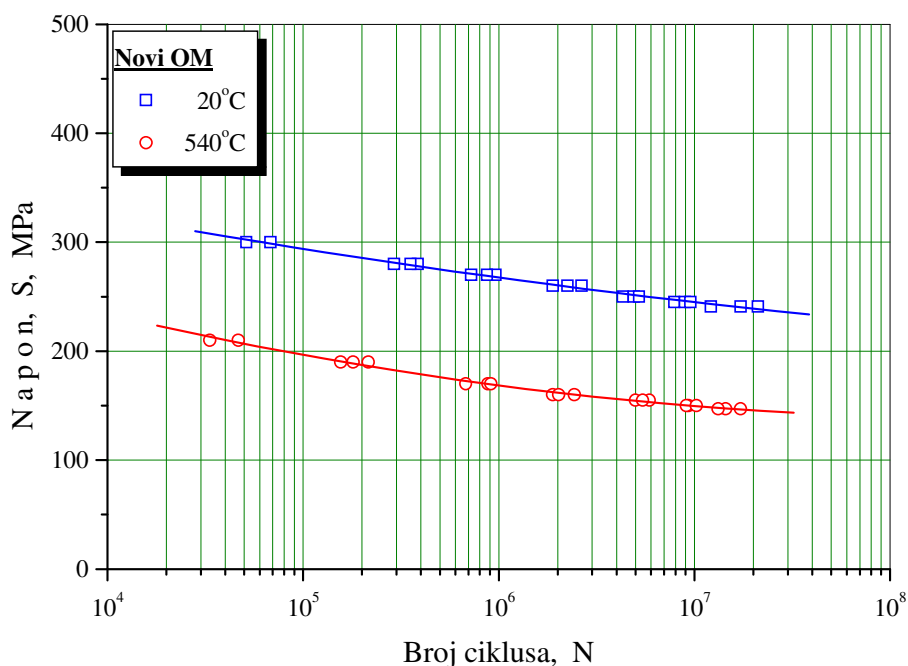
Pri ovom ispitivanju se po pravilu samo utvrđuje broj promena opterećenja do loma pri delovanju opterećenja konstantnog raspona, i standardom se zahteva samo podatak o

veličini napona pri kojoj ne dolazi do inicijacije prsline i loma posle određenog broja ciklusa (obično između 10^6 i 10^8 ciklusa). Za čelične materijale standard ASTM E466 definiše trajnu dinamičku čvrstoću, S_f , posle 10^7 ciklusa.

Uticaj vremena eksploatacije i temperature na vrednosti trajne dinamičke čvrstoće S_f , odnosno maksimalnog dinamičkog napona pri kojem ne dolazi do inicijacije greške tipa prsline kod glatkih konstrukcijskih oblika, je prikazan grafički u obliku Velerovih krivih ($S-N$ dijagrami) na sl. 5.79 za epruvete sučeono zavarenog spoja i na sl. 5.80 za epruvete izvađene iz novog OM.



Slika 5.79. S-N dijagram epruveta izvađenih iz sučeono zavarenog spoja i ispitanih na sobnoj i radnoj temperaturi

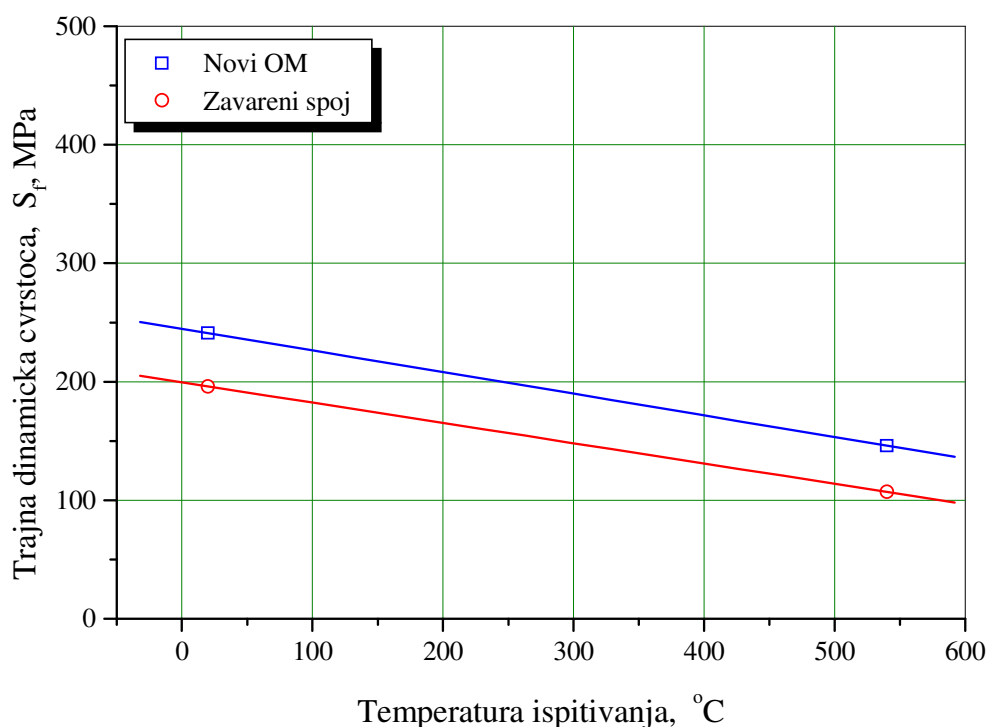


Slika 5.80. S-N dijagram epruveta izvađenih iz novog OM i ispitanih na sobnoj i radnoj temperaturi

Ispitivanje epruveta izvađenih iz eksploatisanog OM nije rađeno, zbog toga što su sve epruvete zavarenog spoja pukle u zoni eksploatisanog OM, pa smo ovim ispitivanjem dobili i karakteristiku zavarenog spoja i eksploatisanog OM.

Za konstruisanje jedne Velerove krive i određivanje trajne dinamičke čvrstoće potrebno je ispitati epruvete na 6 do 7 različitih nivoa opterećenje. Prema standardu ASTM E 466 za svaki nivo opterećenja su ispitane po tri epruvete, što je ukupno 21 epruveta. Zbog toga 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 projektnom veku konstrukcije.

Analizirajući Velerove ($S-N$) krive, dobijene ispitivanjem epruveta izvađenih iz sučeono zavarenog spoja i novog OM, vidi se da sa povećanjem temperature ispitivanja i vremena eksploatacije dolazi do pada vrednosti trajne dinamičke čvrstoće, S_f što je i prikazano na sl. 5.81.



Slika 5.81. Promena vrednosti trajne dinamičke čvrstoće S_f u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije

Otpornost materijala na inicijaciju prslina se određuje ispitivanjem trajne dinamičke čvrstoće materijala. To je maksimalna veličina napona pri kojoj ne dolazi do inicijacije prslina na glatkim epruvetama. Što je odnos vrednosti trajne dinamičke čvrstoće i vrednosti napona tečenja procentualno veći, bolja je otpornost na inicijaciju prslina.

Trajna dinamička čvrstoća S_f , novog OM na sobnoj temperaturi je 241MPa, a na 540°C je 147MPa. Vreme eksploatacije utiče značajno na smanjenje karakteristika na zamor, tako da je kod zavarenog spoja, odnosno eksploatisanog OM trajna dinamička čvrstoća na sobnoj temperaturi 196MPa, a na 540°C je 107MPa.

5.10.1. Diskusija ispitivanja promenljivim opterećenjem

Analizirajući dobijene rezultate ispitivanja visokocikličnog zamora glatkih epruveta sa ciljem konstruisanja Velerove krive i određivanja trajne dinamičke čvrstoće, vidimo da

vreme eksploatacije i temperatura ispitivanja dominantno utiču na dobijene vrednosti trajne dinamičke čvrstoće. Kod ispitivanja epruveta zavarenog spoja odnosno eksploatisanog OM na sobnoj temperaturi, imamo da je odnos vrednosti trajne dinamičke čvrstoće i vrednosti napona tečenja, 0,68, odnosno dobijena vrednost trajne dinamičke čvrstoće predstavlja 68% vrednosti napona tečenja. Sve polomljene epruvete, ispitane na opterećenjima većim od opterećenja trajne dinamičke čvrstoće (dijagram levo) zavarenog spoja su pukle ili u eksploatisanom OM, ili u ZUT sa strane eksploatisanog OM. Otpornost prema inicijaciji prsline kod novog OM na sobnoj temperaturi je bolja, i imamo da nam je odnos vrednosti trajne dinamičke čvrstoće i vrednosti napona tečenja, 0,71.

Uticaj temperature ispitivanja je takav da samo povećanje temperature dovodi do smanjenja vrednosti trajne dinamičke čvrstoće. I u ovom slučaju epruvete zavarenog spoja su pucale ili u eksploatisanom OM ili u ZUT sa strane eksploatisanog OM. Vrednost trajne dinamičke čvrstoće dobijena ispitivanjem novog OM na 540°C je za oko 37% veća u odnosu na dobijene vrednosti trajne dinamičke čvrstoće epruveta zavarenog spoja.

Otpornost na inicijaciju prsline kod ispitivanja na 540°C opada, odnosno sklonost ka krtom lomu se povećava. Odnos vrednosti trajne dinamičke čvrstoće i vrednosti napona tečenja kod epruveta zavarenog spoja je 0,51, a kod epruveta novog OM je 0,60.

Ovi rezultati, kao i rezultati zateznih ispitivanja upućuju na zaključak da je uticaj vremena eksploatacije i temperature ispitivanja mnogo veći kod dinamičkih ispitivanja, nego kod statičkih ispitivanja [78]. Eksploatacioni period od približno 40 godina doveo je do smanjenja vrednosti trajne dinamičke čvrstoće kod epruveta zavarenog spoja, odnosno eksploatisanog OM za oko 19%, što može da bude veoma značajan podatak ako se znaju uslovi rada reaktora.

5.11. ODREĐIVANJE PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE

Osnovni napredak koji je mehanika loma napravila u sferi zamora materijala je u analitičkom rasčlanjivanju fenomena loma usled zamora na period stvaranja, u kome zamorna prslina nastaje, i na period rasta ili širenja koji mu sledi i u kome se nastala prslina povećava do kritične veličine pri kojoj dolazi do naglog loma. Time se ukupan broj ciklusa, N_u , posle koga dolazi do loma, deli na broj ciklusa potrebnih da zamorna prslina nastane, N_i , i broj ciklusa da ona poraste do kritične veličine za lom, N_p , odnosno $N_u = N_i + N_p$.

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 [45, 46]. Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora (ΔK_{th} na sl. 3.30), i visokih brzina (K_{Ic}) veliki linearni srednji deo krive 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 koncentrata 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 [69] 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/ciklusu da bi se izbeglo područje praga zamora, ΔK_{th} , a opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

Važni podaci u oceni ponašanja materijala sa greškom tipa prsline u uslovima delovanja promenljivog opterećenja se dobijaju određivanjem parametara rasta zamorne prsline. Uticaj eksploatacionih uslova (vremena eksploatacije i temperature) na parametre rasta zamorne prsline je analiziran ispitivanjem epruveta sa V-zarezom u novom i eksploatisanom OM, ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM, kao i MŠ.

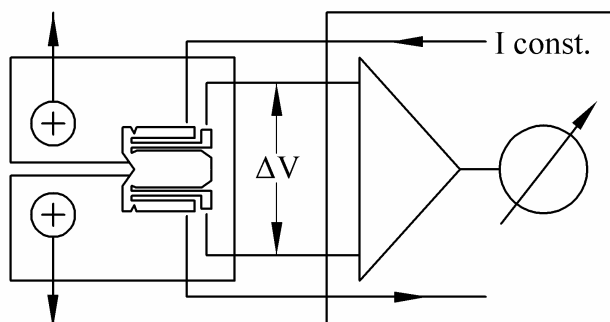
Ispitivanje na sobnoj temperaturi u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na epruветama mehanike loma (sl. 5.51) definisanih standardom ASTM E399, metodom savijanja epruvete u tri tačke na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru, sl. 5.82. Samo ispitivanje je rađeno u kontroli sile. Ovaj pulzator ostvaruje promenljivo momentno opterećenje u opsegu od -160Nm do +160Nm, uz maksimalno statičko opterećenje od 100Nm. Uređaj je povezan sa računarom, štampačem i pisačem, čime se omogućava automatizacija merenja i direktno prikupljanje i obrada dobijenih podataka.



Slika 5.82. Savremeni sistem za dinamička ispitivanja

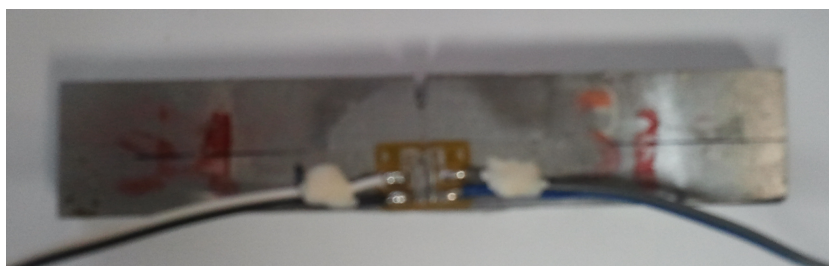
Ispitivanje je obavljeno pri odnosu minimalnog i maksimalnog opterećenja $R = 0,1$. Ostvarena učestalost se kretala u opsegu od 195 do 215Hz u zavisnosti od toga da li je prsline prolazila kroz osnovni metal, metal šava ili zonu uticaja toplote i od veličine opterećenja. Srednje opterećenje i njegova amplituda je registrovana sa tačnošću $\pm 3\text{Ncm}$.

Epruvete su pre ispitivanja mehanički pripremljene i na tako pripremljene epruvete su zalepljene merne trake-folije. Da bi se mogao pratiti rast prsline pomoću merne folije, korišćen je savremeni uređaj za registrovanje priraštaja prsline. Kako zamorna prsline raste ispod merne folije, merna folija puca prateći vrh zamorne prsline i obezbeđuje promenu otpora folije koja varira linearno sa promenom dužine prsline. Shema rada sistema za merenje priraštaja prsline-merna folija je prikazana na sl.5.83 [70].



Slika 5.83. Shema merne folije i načina registrovanja rasta prsline

Izgled pripremljene epruvete za određivanje parametara rasta zamorne prsline je dat na sl. 5.84.



Slika 5.84. Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline [79]

Ispitivanje na radnoj temperaturi od 540°C, a u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na modifikovanim CT epruvetama (sl. 5.52) na visokofrekventnom pulzatoru AMSLER. Samo ispitivanje je rađeno u kontroli sile.

Krive zavisnosti $a-N$ se koriste za određivanje brzine rasta prsline. Računarski postupak se satoji u aproksimaciji sedam uzastopnih tačaka parabolom drugog reda, počev od prve tačke zavisnosti $a-N$, metodom odstupanja najmanjih kvadrata [47]:

$$a_I = b_0 + b_1 N + b_2 N^2 \quad (5.27)$$

a zatim određivanjem prvog izvoda u srednjoj tački segmenta. To znači da se stvarna kriva aproksimira nizom parabola, od kojih prva prolazi kroz tačke 1-7, druga kroz tačke 2-8, treća kroz tačke 3-9 i dalje redom. Brzina rasta prsline se određuje kao izvod u srednjoj tački (tačka 4 za prvu parabolu, 5 za drugu, 6 za treću i tako dalje) [47]:

$$\frac{da}{dN} = b_1 + 2b_2 N \quad (5.28)$$

Na taj način se dobijaju brzine rasta za prvu parabolu [47]:

$$a_I = b_{0I} + b_{1I} N_I + b_{2I} N_I^2, \left. \frac{da_I}{dN_I} \right|_4 = b_{1I} + b_{2I} N_{I4} \quad (5.29)$$

Na isti način se određuju brzine rasta za ostale parabole.

Ovakva aproksimacija se može smatrati dovoljnom za izvedena ispitivanja. Da bi se sagledao uticaj odstupanja u pogledu dužine prsline i brzine njenog rasta, procenjene su ove veličine i drugim približnim postupkom, koristeći formulu [47]:

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_i = \frac{a_{i+1}h_1^2 + a_i(h_2^2 - h_1^2) - a_{i-1}h_2^2}{h_1h_2(h_1 + h_2)} \quad (5.30)$$

gde je:

$$h_1 = N_i - N_{i-1} \text{ i } h_2 = N_{i+1} - N_i$$

Uz pretpostavku da je $h_1 \approx h_2$, prethodna formula se svodi na:

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_i = \frac{a_{i+1} - a_{i-1}}{N_{i+1} - N_{i-1}} \quad (5.31)$$

što znači da se za tangentu krive u tački uzima pravac sečice između dve tačke.

Konačno, najjednostavnija aproksimacija je ako se za brzinu rasta u tački uzme nagib prave između te tačke i susedne tačke [47]:

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (5.32)$$

Određivanje 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 treba za trenutnu dužinu prsline, a , pripisati opseg faktora intenziteta napona, ΔK , koji zavisi od geometrije epruvete i dužine prsline, i od opsega promenljive sile, $\Delta F = F_g - F_d$.

Za određivanje opsega faktora intenziteta napona koristi se formula:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \cdot \sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad (5.33)$$

gde je:

- L - raspon između oslonaca;
- B - debljina epruvete;
- W - širina (visina) epruvete, i
- a - dužina prsline.

Geometrijski član $f(a/W)$ dat je jedn. 5.10.

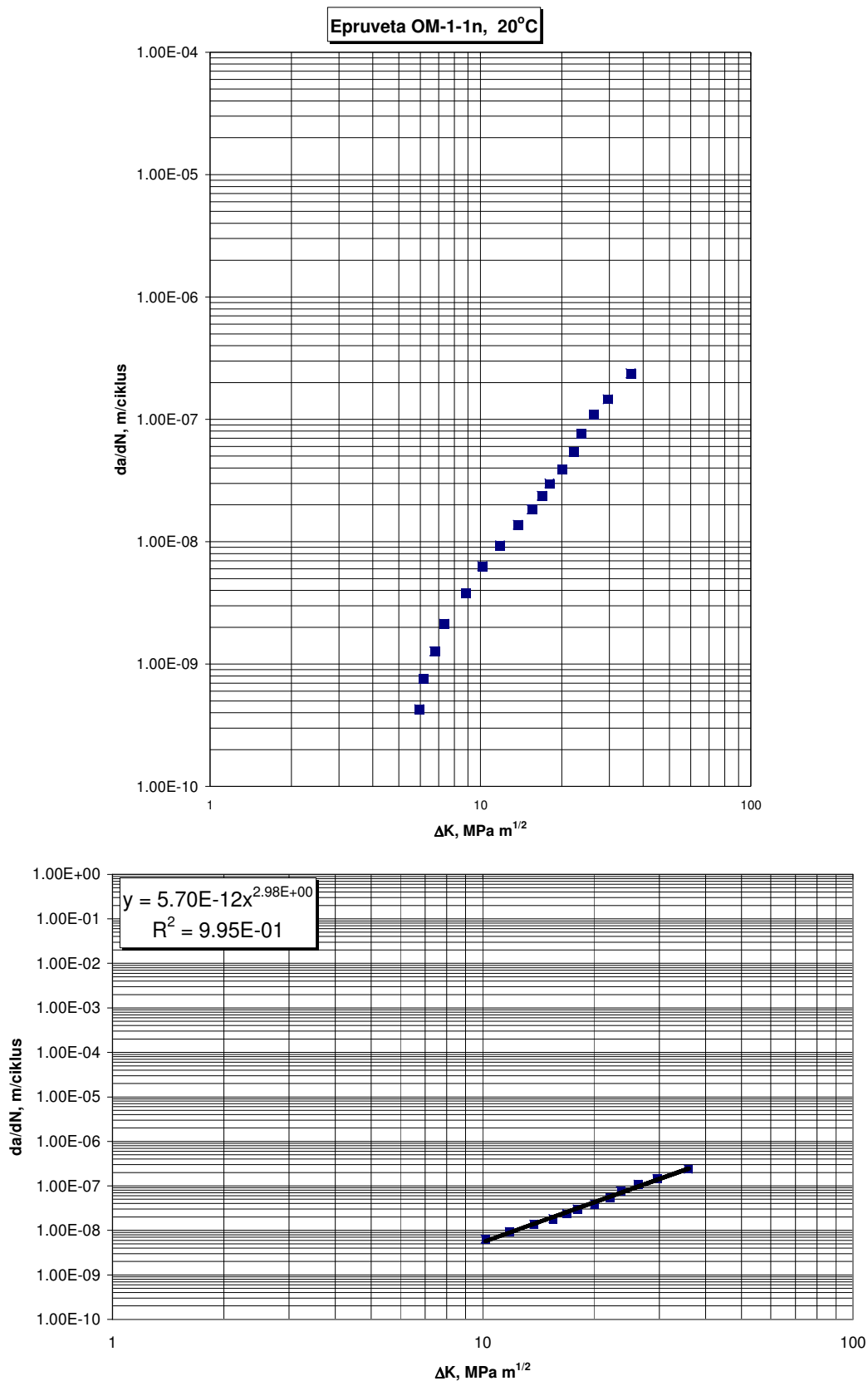
Granična vrednost ΔK_{th} može da se odredi: postupnim smanjivanjem opterećenja do prestanka rasta prsline, žarenjem zarezane epruvete radi otklanjanja zaostalih napona oko vrha prsline i postupnim povećavanjem opterećenja do početka rasta prsline i korišćenjem epruvete oblika, kod koga intenzitet napona opada sa dužinom prsline.

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 $\log da/dN - \log(\Delta K)$.

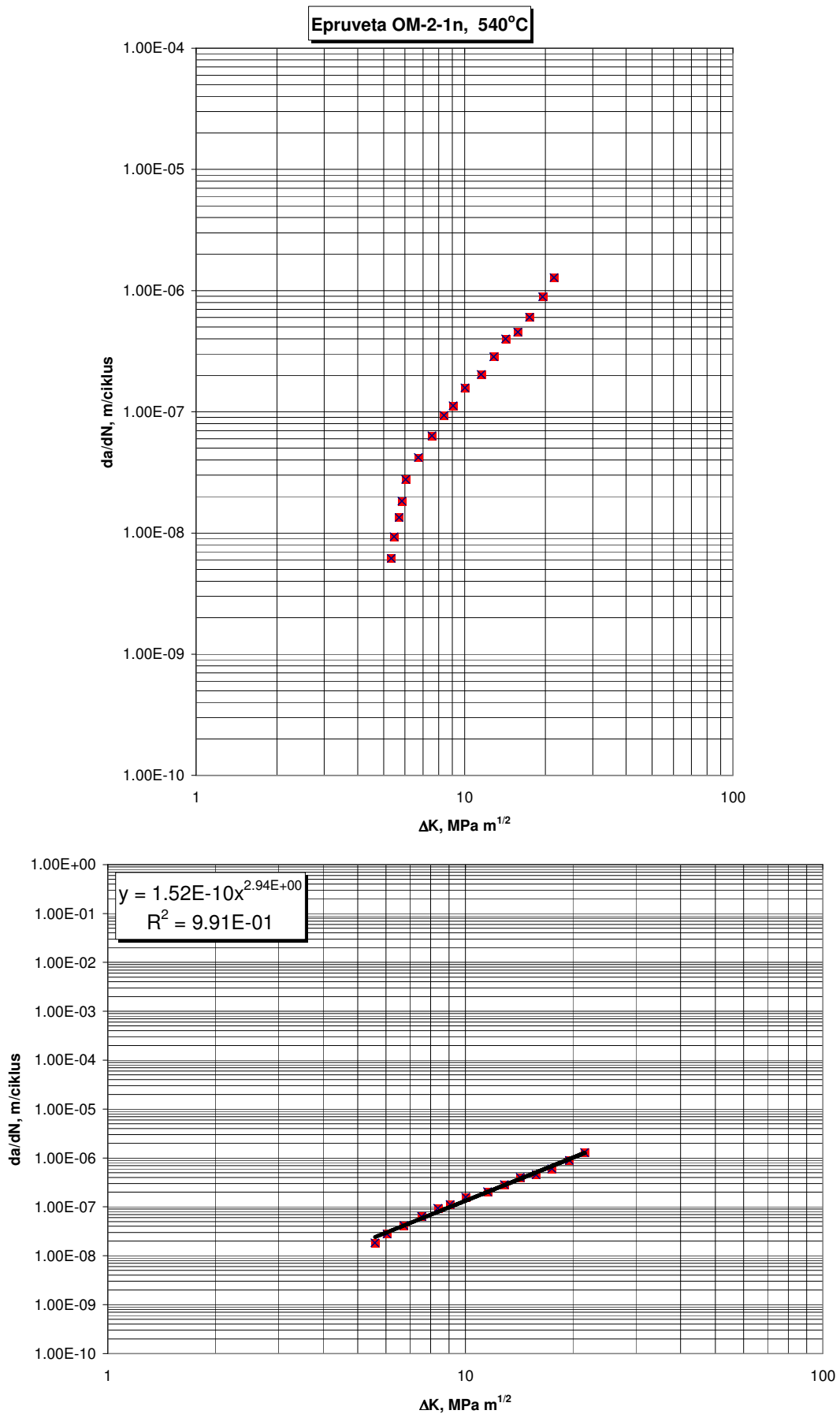
Karakteristični dijagrami brzina rasta zamorne prsline, da/dN -promena opsega faktora intenziteta napona, ΔK , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u novom i eksploatisanom OM i ispitane na sobnoj i radnoj temperaturi prikazani su na sl. 5.85 do 5.88.

Dijagrami $da/dN - \Delta K$, za epruvete sa vrhom zamorne prsline u MŠ i ispitane na sobnoj i radnoj temperaturi prikazani su na sl. 5.89 i 5.90. Respektivno, dijagrami $da/dN - \Delta K$, za

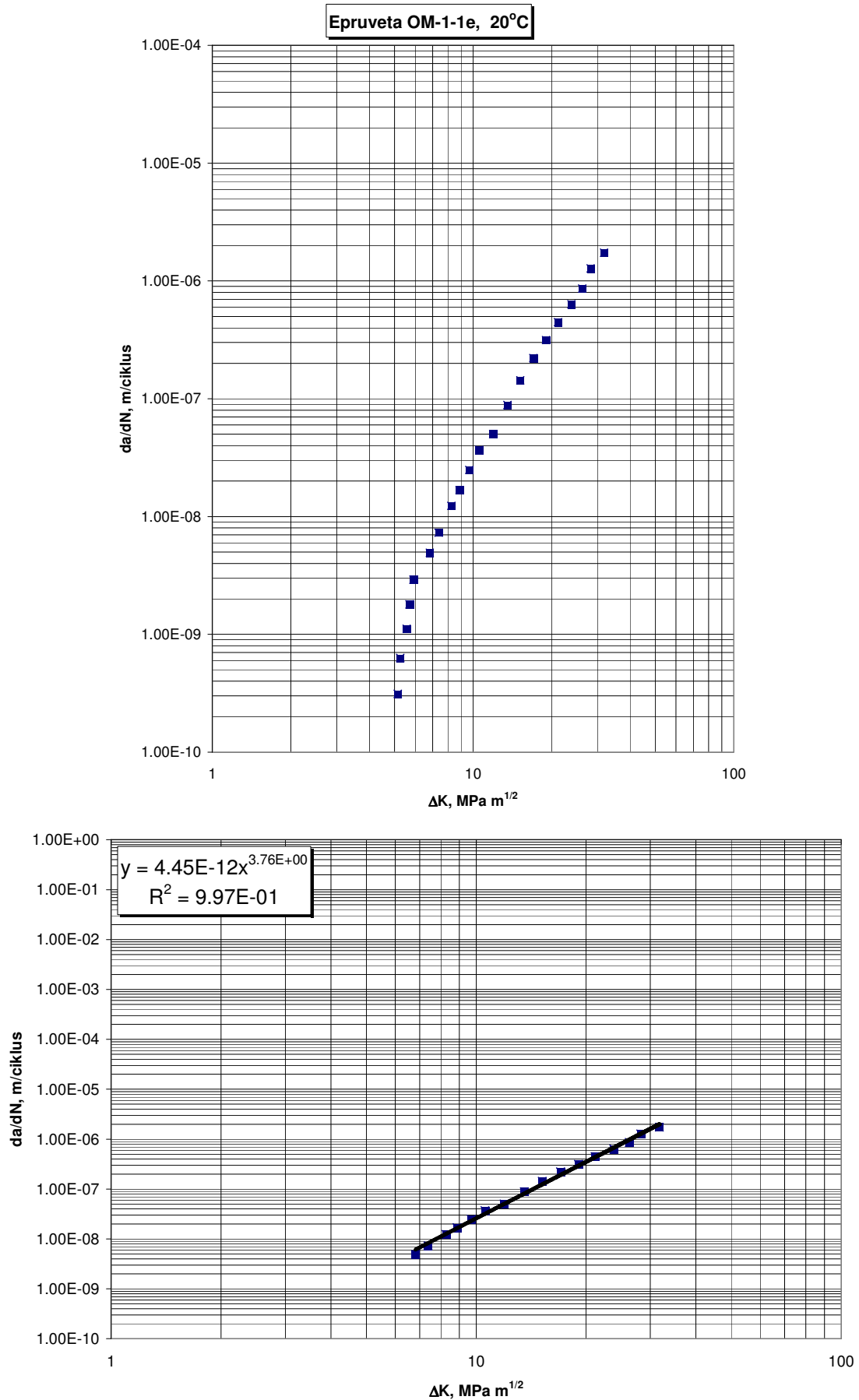
epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM i ispitane na sobnoj i radnoj temperaturi prikazani su na sl. 5.91 do 5.94.



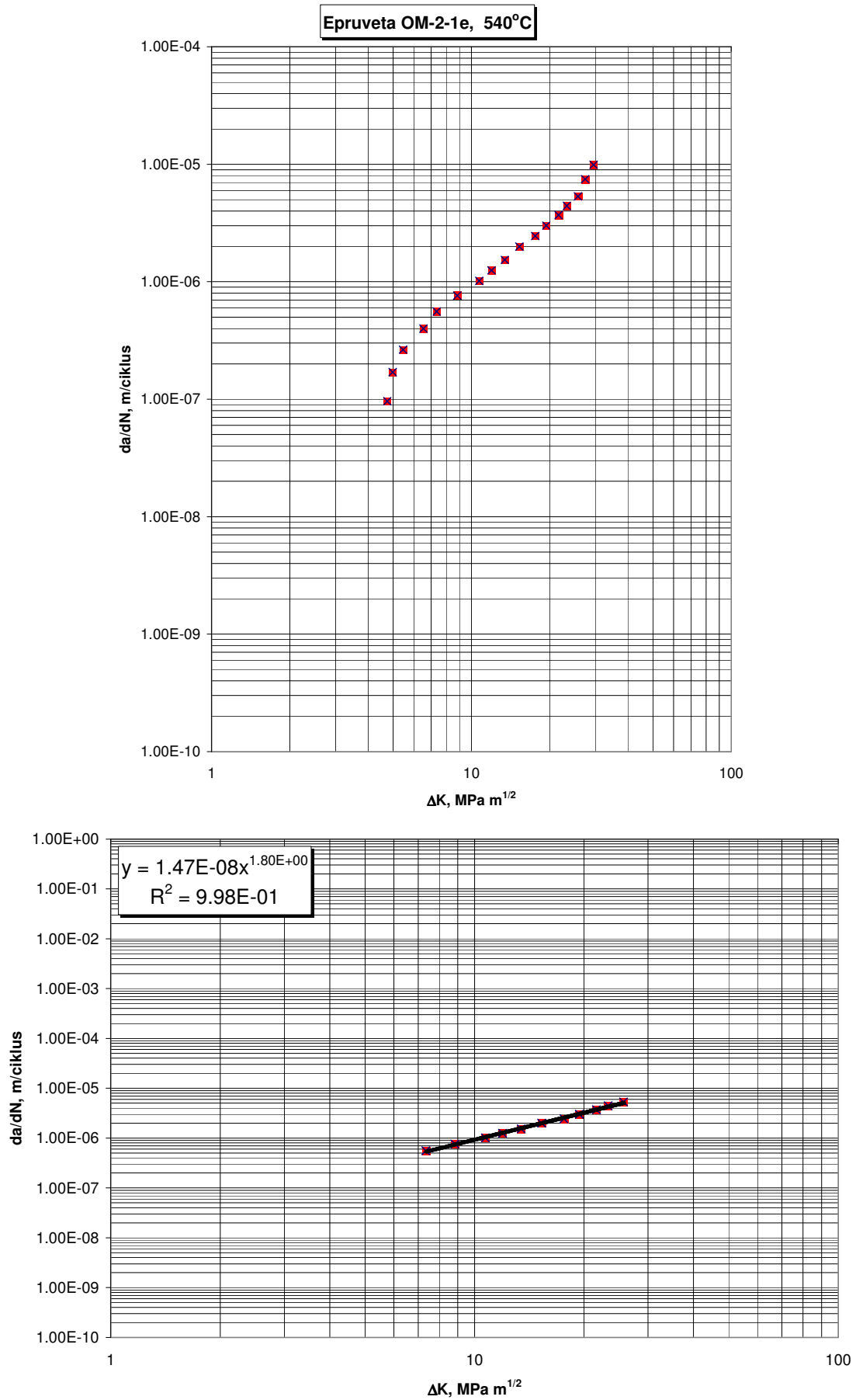
Slika 5.85. Dijagram zavisnosti da/dN-ΔK za epruvetu OM-1-1n



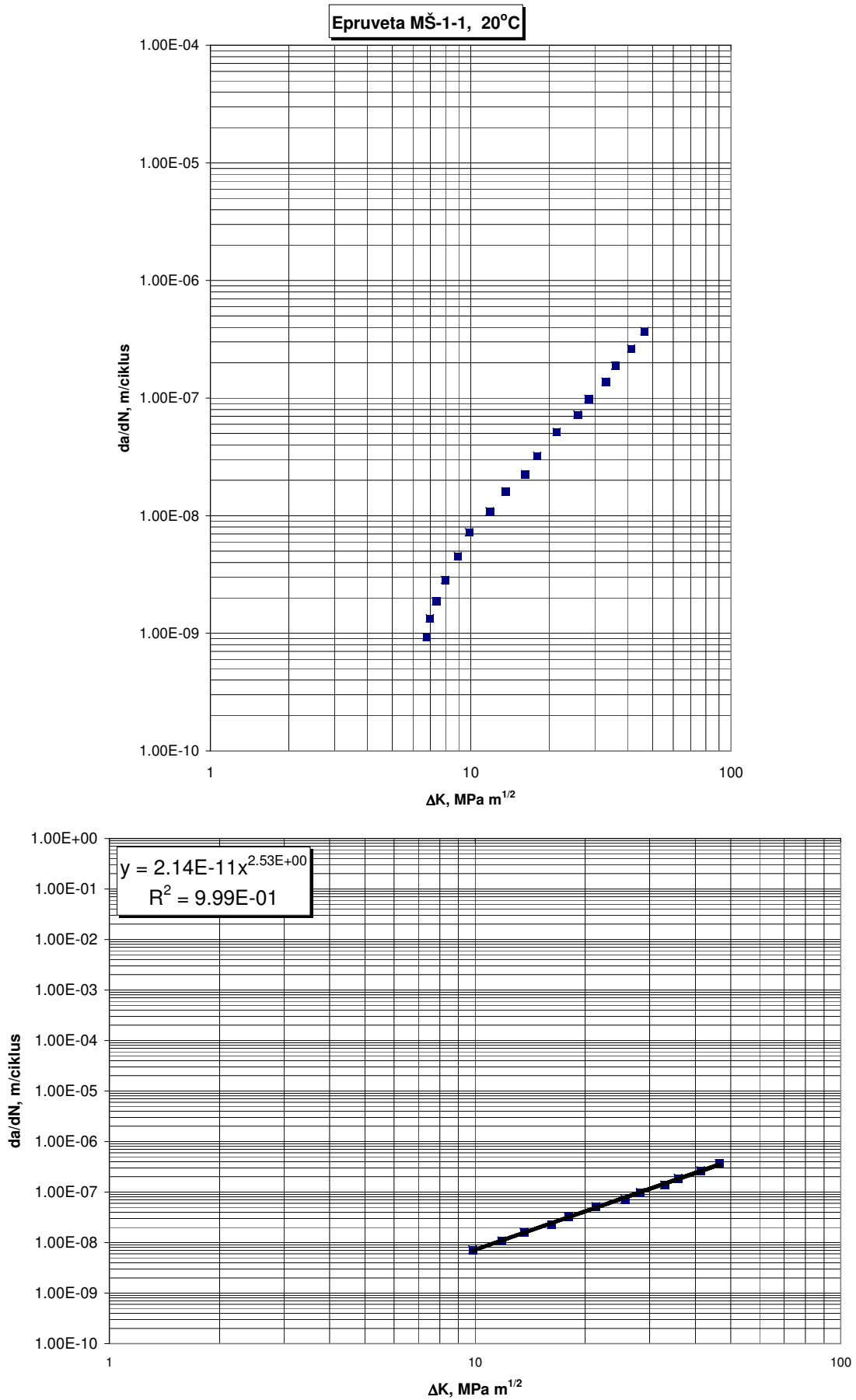
Slika 5.86. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK za epruvetu OM-2-1n



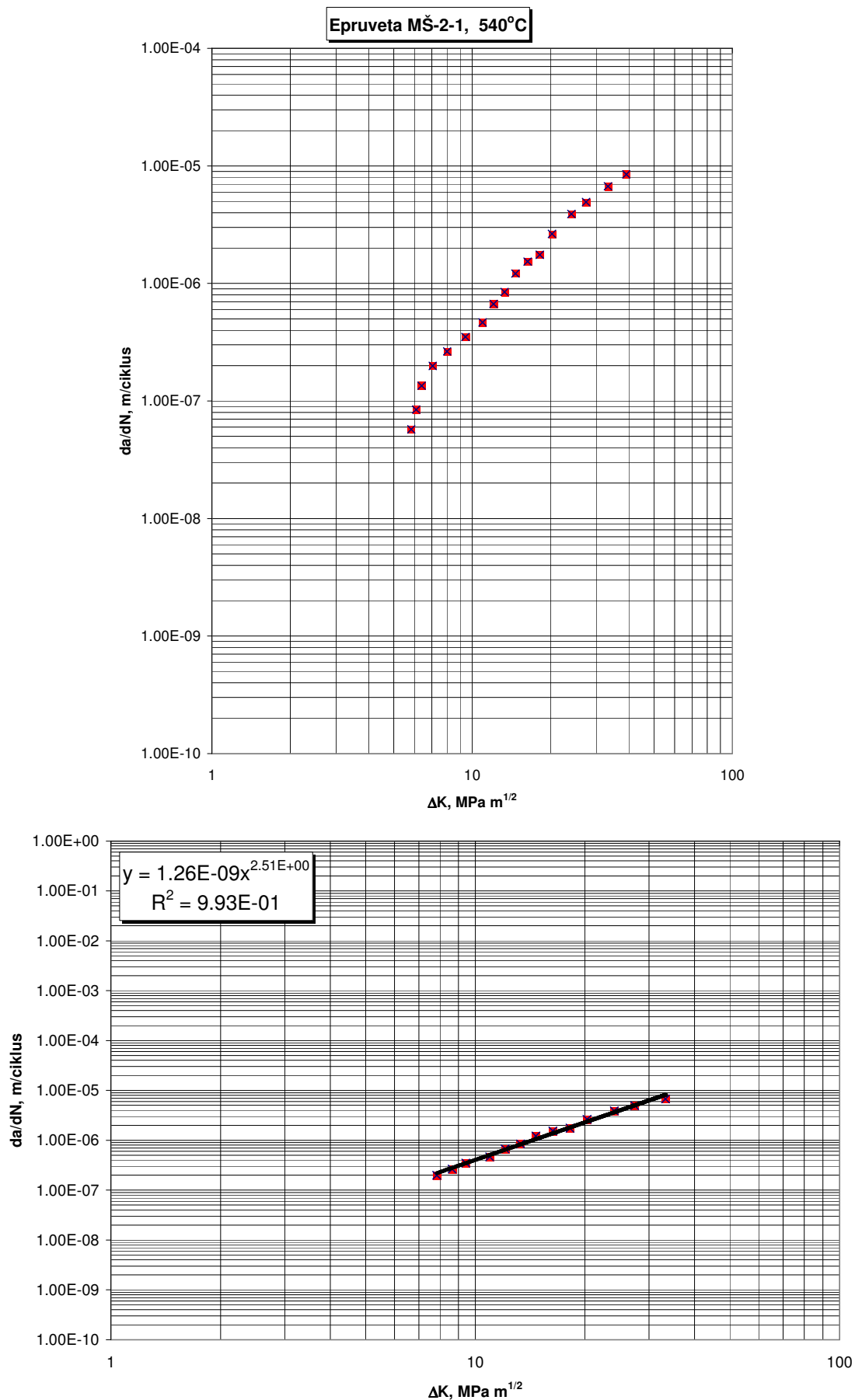
Slika 5.87. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-1-1e



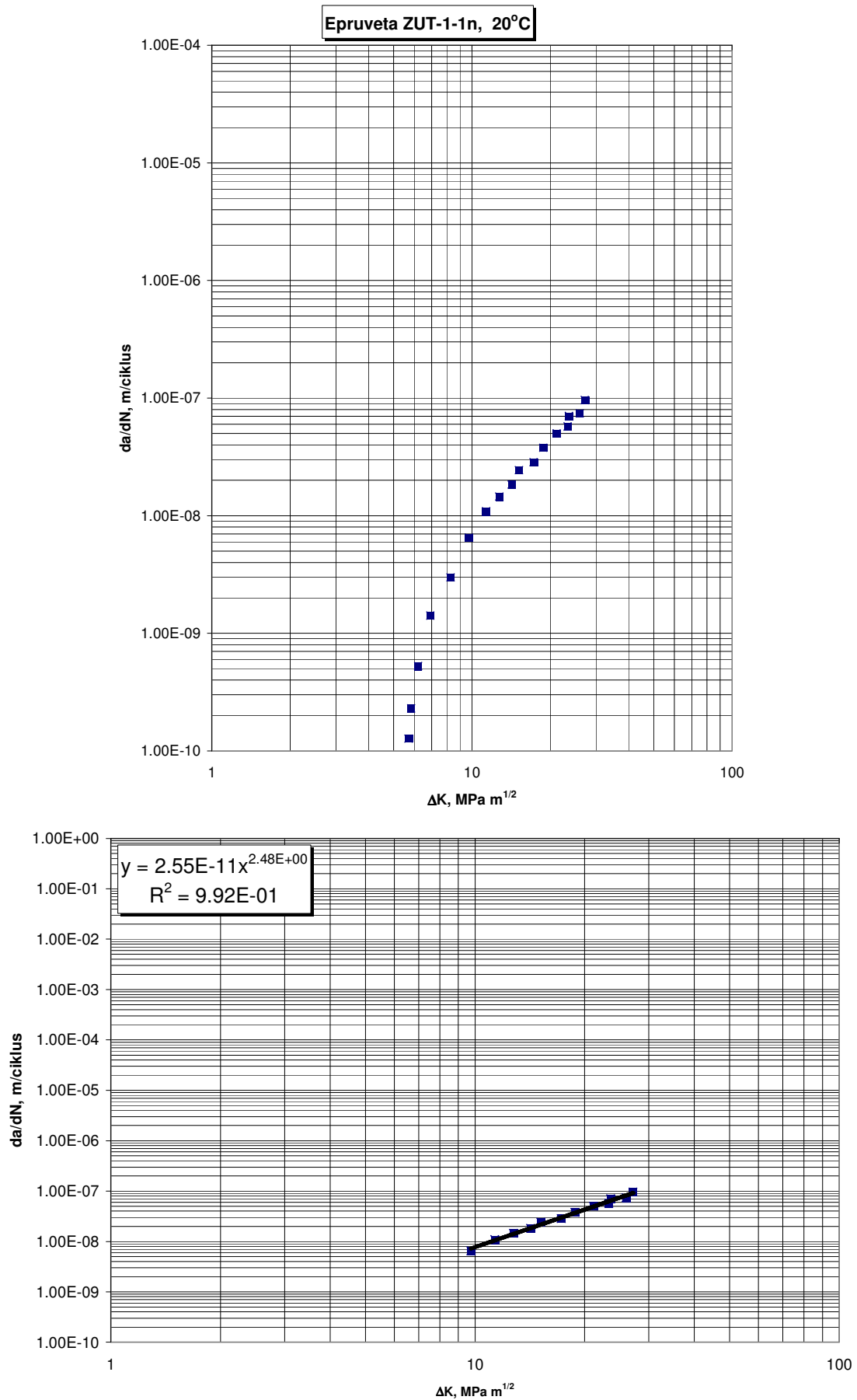
Slika 5.88. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu OM-2-1e



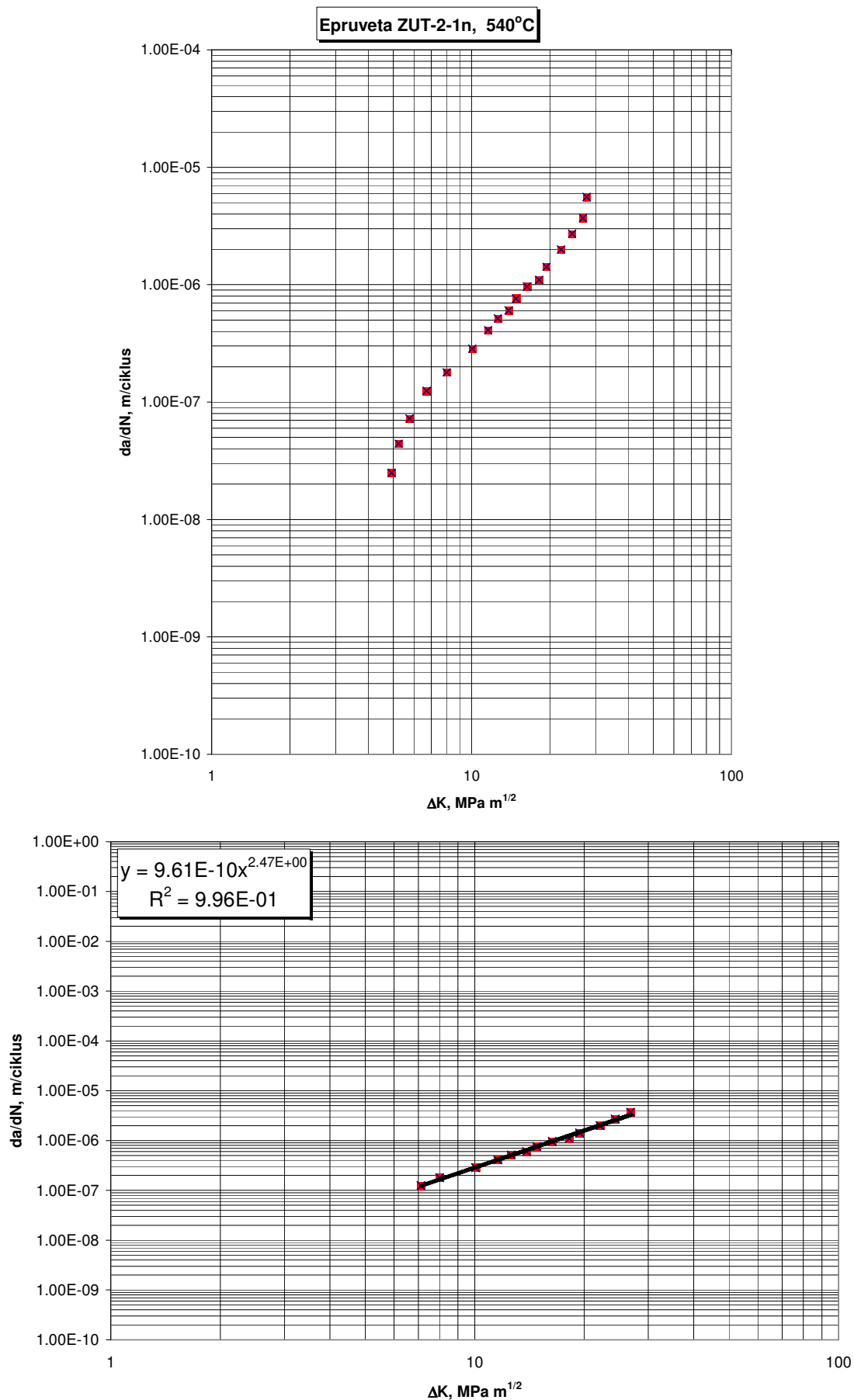
Slika 5.89. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK za epruvetu MŠ-1-1



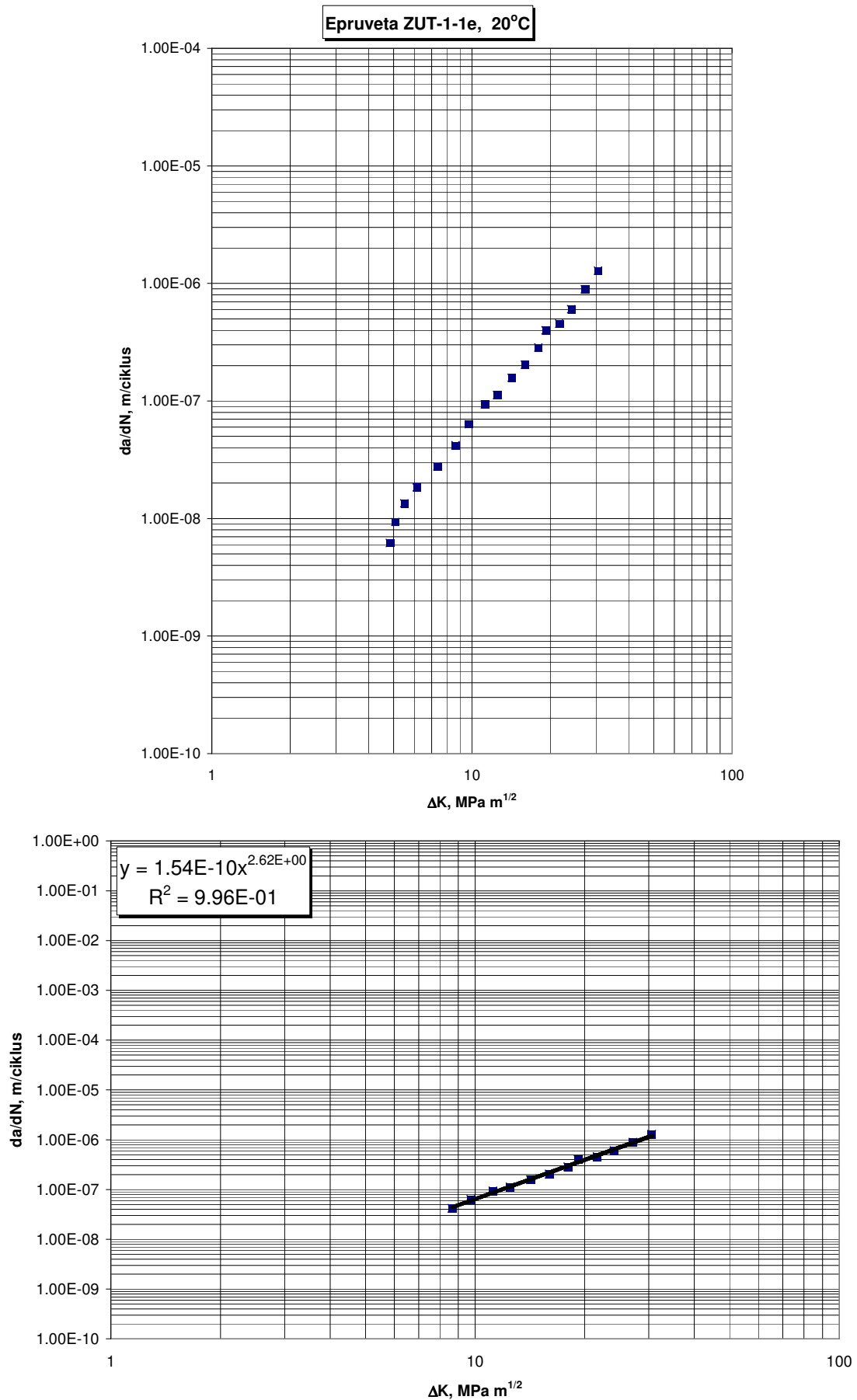
Slika 5.90. Dijagram zavisnosti da/dN - ΔK za epruvetu MŠ-2-1



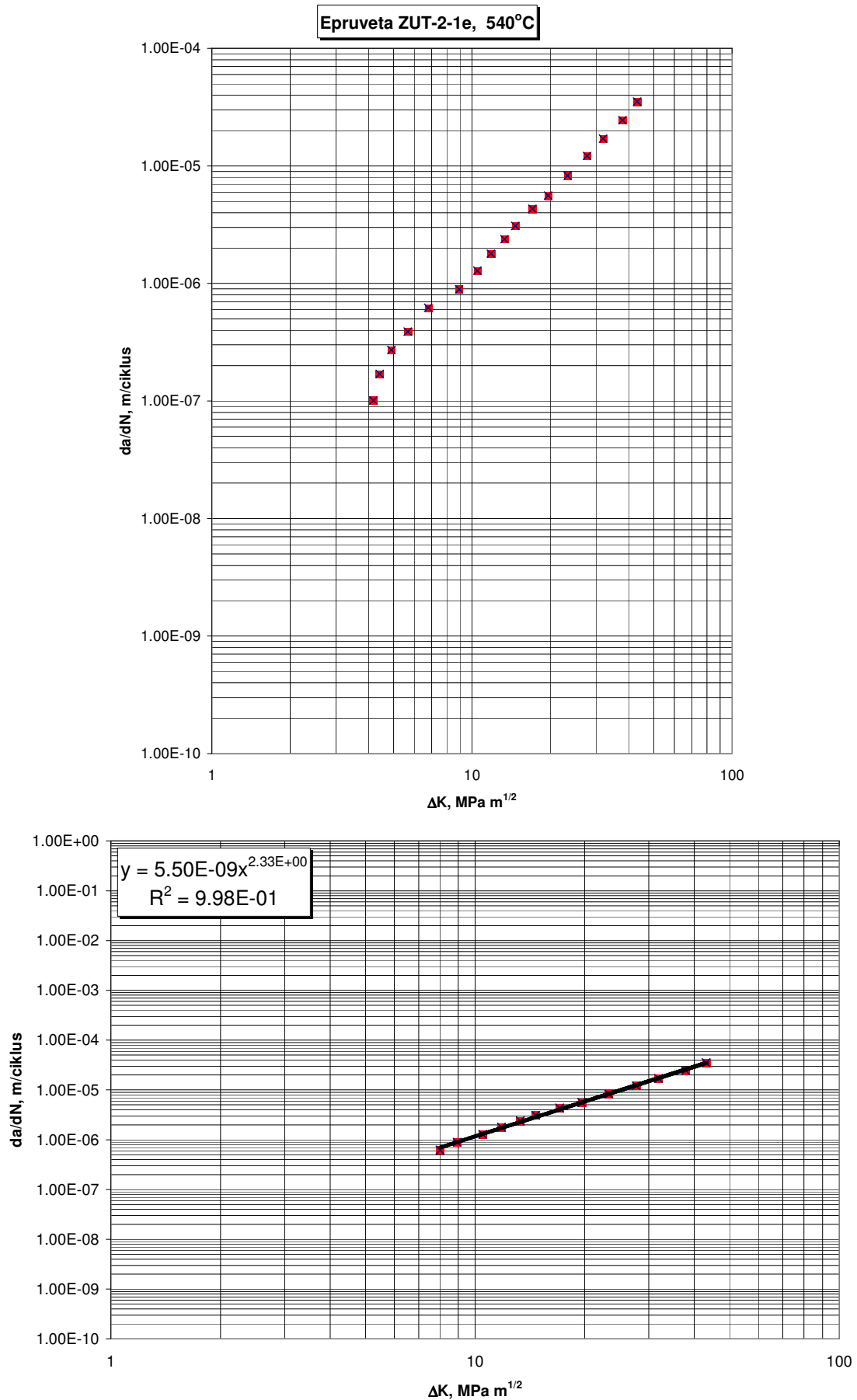
Slika 5.91. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-1-1n



Slika 5.92. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-2-1n



Slika 5.93. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-1-1e



Slika 5.94. Dijagram zavisnosti $da/dN-\Delta K$ za epruvetu ZUT-2-1e

Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta C i eksponenta m , praga zamora ΔK_{th} , i brzine rasta zamorne prsline, da/dN , pri vrednosti $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$, date su u tab. 5.20. za epruvete sa zarezom u novom OM, a u tab. 5.21 za epruvete sa zarezom u eksploatisanom OM. Parametri Parisove jednačine dati su u tab. 5.22 za epruvete sa zarezom u MŠ. Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, date su u tab. 5.23. za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane novog OM, a tab. 5.24 za epruvete sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM.

Tabela 5.20. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u novom OM

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora, ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$
OM-1-1n	20	5,9	$5,70 \cdot 10^{-12}$	2,98	$5,44 \cdot 10^{-9}$
OM-1-2n		5,6	$5,38 \cdot 10^{-12}$	3,02	$5,63 \cdot 10^{-9}$
OM-1-3n		5,8	$6,23 \cdot 10^{-12}$	2,83	$4,21 \cdot 10^{-9}$
OM-2-1n	540	5,2	$1,52 \cdot 10^{-10}$	2,94	$1,32 \cdot 10^{-7}$
OM-2-2n		5,1	$2,08 \cdot 10^{-10}$	2,88	$1,58 \cdot 10^{-7}$
OM-2-3n		5,0	$1,11 \cdot 10^{-10}$	2,99	$1,08 \cdot 10^{-7}$

Tabela 5.21. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u eksploatisanom OM

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora, ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$
OM-1-1e	20	5,2	$4,45 \cdot 10^{-12}$	3,76	$2,56 \cdot 10^{-8}$
OM-1-2e		5,1	$3,89 \cdot 10^{-12}$	3,87	$2,88 \cdot 10^{-8}$
OM-1-3e		5,2	$5,17 \cdot 10^{-12}$	3,71	$2,65 \cdot 10^{-8}$
OM-2-1e	540	4,7	$1,48 \cdot 10^{-8}$	1,80	$9,34 \cdot 10^{-7}$
OM-2-2e		4,6	$2,67 \cdot 10^{-8}$	1,68	$1,28 \cdot 10^{-6}$
OM-2-3e		4,7	$1,25 \cdot 10^{-8}$	1,84	$8,65 \cdot 10^{-7}$

Tabela 5.22. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u MŠ

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora, ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$
MŠ-1-1	20	6,8	$2,14 \cdot 10^{-11}$	2,53	$7,25 \cdot 10^{-9}$
MŠ-1-2		6,9	$3,55 \cdot 10^{-11}$	2,39	$8,71 \cdot 10^{-9}$
MŠ-1-3		6,7	$1,98 \cdot 10^{-11}$	2,56	$7,19 \cdot 10^{-9}$
MŠ-2-1	540	5,8	$1,26 \cdot 10^{-9}$	2,51	$4,08 \cdot 10^{-7}$
MŠ-2-2		5,6	$1,78 \cdot 10^{-9}$	2,47	$5,25 \cdot 10^{-7}$
MŠ-2-3		5,5	$2,24 \cdot 10^{-9}$	2,21	$3,63 \cdot 10^{-7}$

Tabela 5.23. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u novom ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora, ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$
ZUT-1-1n	20	5,7	$2,55 \cdot 10^{-11}$	2,48	$7,70 \cdot 10^{-9}$
ZUT-1-2n		5,4	$2,97 \cdot 10^{-11}$	2,41	$7,63 \cdot 10^{-9}$
ZUT-1-3n		5,5	$2,08 \cdot 10^{-11}$	2,57	$7,72 \cdot 10^{-9}$
ZUT-2-1n	540	4,9	$9,61 \cdot 10^{-10}$	2,47	$2,84 \cdot 10^{-7}$
ZUT-2-2n		4,7	$7,45 \cdot 10^{-10}$	2,83	$5,03 \cdot 10^{-7}$
ZUT-2-3n		4,8	$8,85 \cdot 10^{-10}$	2,68	$4,24 \cdot 10^{-7}$

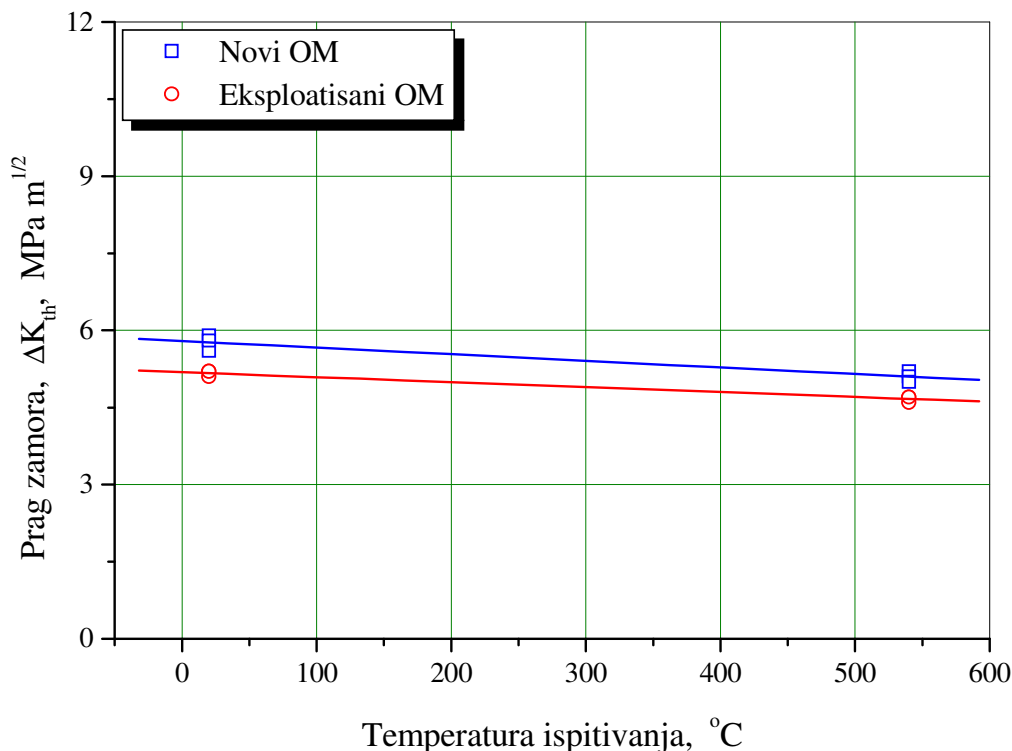
Tabela 5.24. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u eksploatisanom ZUT

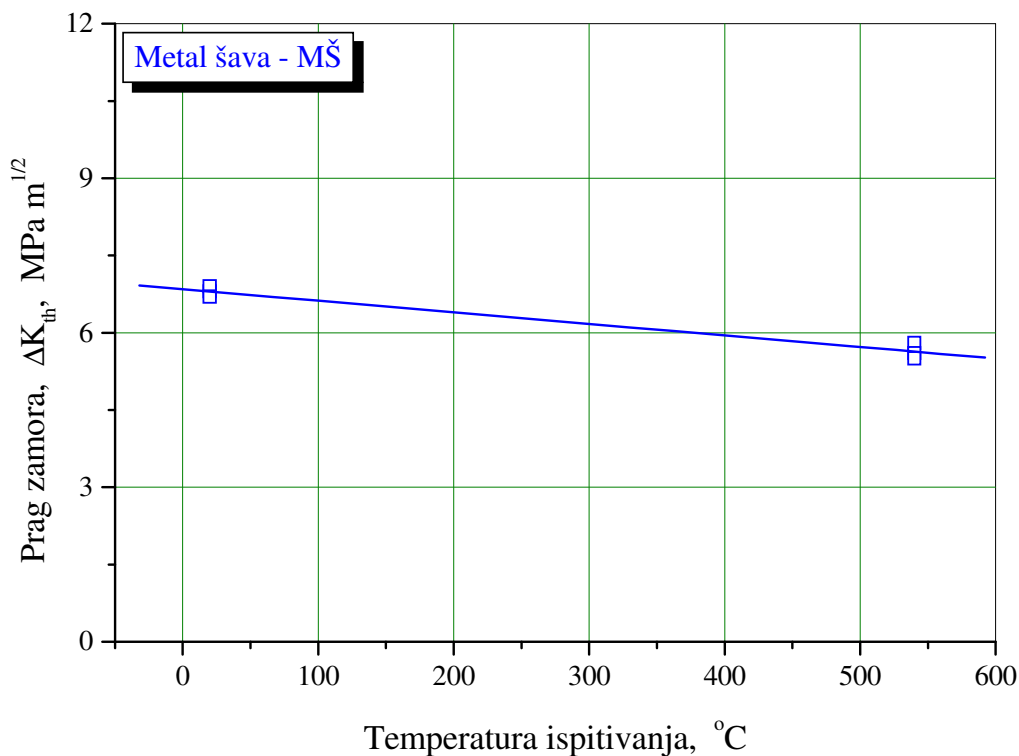
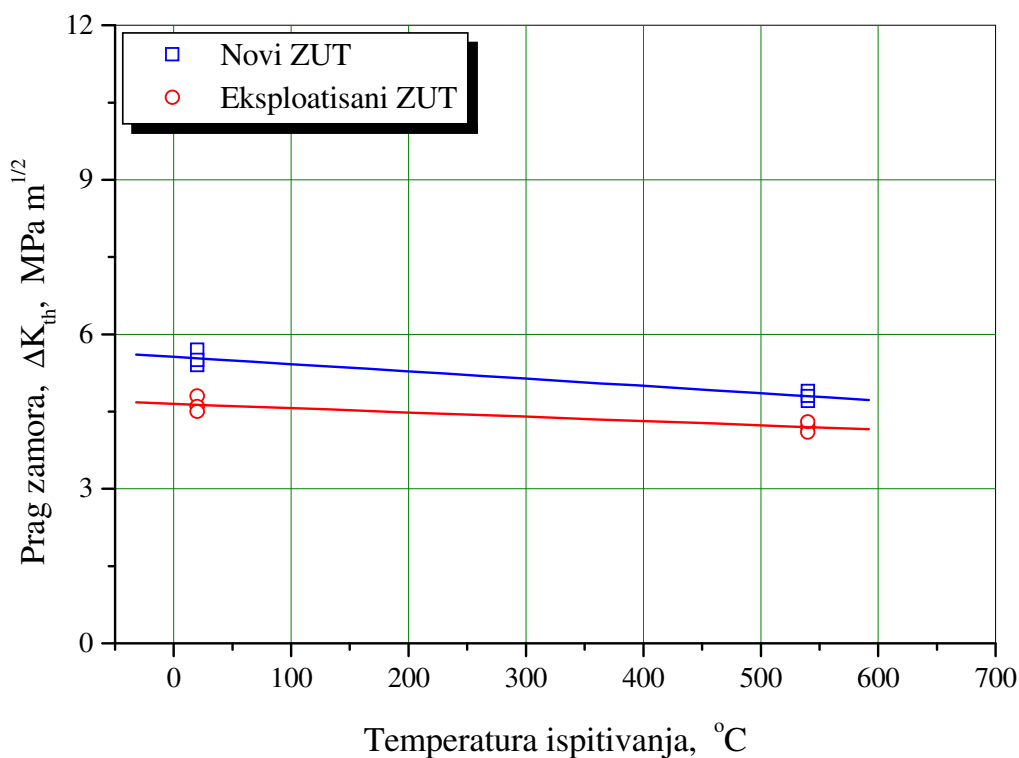
Oznaka epruvete	Temperatura ispitivanja, °C	Prag zamora, ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}	Koeficijent C	EkspONENT m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K = 10 \text{ MPa m}^{1/2}$
ZUT-1-1e	20	4,8	$1,54 \cdot 10^{-10}$	2,62	$6,42 \cdot 10^{-8}$
ZUT-1-2e		4,6	$1,95 \cdot 10^{-10}$	2,57	$7,24 \cdot 10^{-8}$
ZUT-1-3e		4,5	$2,35 \cdot 10^{-10}$	2,51	$7,60 \cdot 10^{-8}$
ZUT-2-1e	540	4,2	$5,50 \cdot 10^{-9}$	2,33	$1,18 \cdot 10^{-6}$
ZUT-2-2e		4,1	$4,67 \cdot 10^{-9}$	2,49	$1,44 \cdot 10^{-6}$
ZUT-2-3e		4,3	$6,24 \cdot 10^{-9}$	2,11	$8,04 \cdot 10^{-7}$

Uticao heterogenosti strukture odnosno mesto postavljanja zarez a i inicijacije prsline, kao i eksploatacioni uslovi (temperatura ispitivanja i period eksploatacije), imaju odlucujući uticao na vrednosti praga zamora ΔK_{th} . To se jasnije vidi grafiki na sl. 5.95 za epruvete sa zarezom u OM, sl. 5.96 za epruvete sa zarezom u MŠ, i sl. 5.97 za epruvete sa zarezom u ZUT.

Vrednosti praga zamora, ΔK_{th} dobijene ispitivanjem epruveta izvađenih iz novog OM se kreću od 5,8MPa m^{1/2} određene na 20°C i padaju do 5,1MPa m^{1/2} na 540°C. Uticao vremena eksploatacije OM (eksploatisani OM) na vrednosti praga zamora, ΔK_{th} se ogleda u dodatnom smanjenju vrednosti praga zamora za 10-15%, i one se kreću od 5,2MPa m^{1/2} određene na 20°C, da bi se dodatno smanjile do 4,7MPa m^{1/2} na 540°C.

Vrednosti praga zamora ΔK_{th} dobijene ispitivanjem epruveta sa zarezom u ZUT sa strane novog OM se kreću od 5,5MPa m^{1/2} određene na 20°C i padaju do 4,8MPa m^{1/2} na 540°C, odnosno od 4,6MPa m^{1/2} određene na 20°C do 4,2MPa m^{1/2} na 540°C kod epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM.

**Slika 5.95.** Promena vrednosti ΔK_{th} kod OM

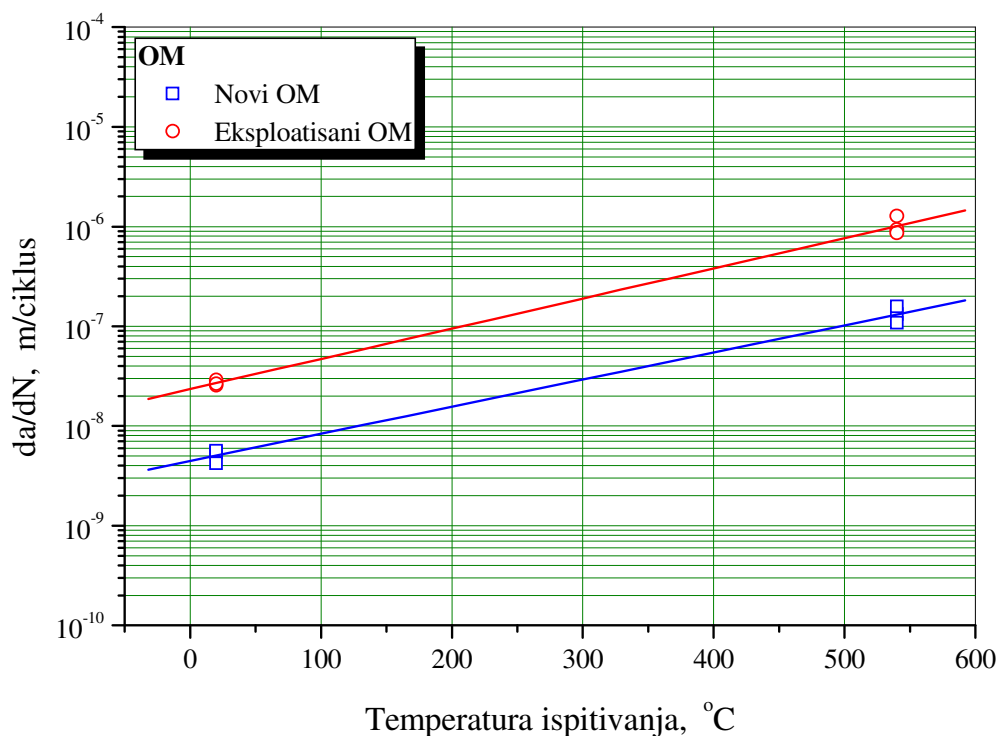
Slika 5.96. Promena vrednosti ΔK_{th} kod MŠSlika 5.97. Promena vrednosti ΔK_{th} kod ZUT

Najveću vrednost praga zamora ΔK_{th} imaju epruvete sa zarezom u MŠ. Dobjijene vrednosti praga zamora ΔK_{th} se kreću od 6,8MPa m^{1/2} kod epruveta ispitanih na sobnoj temperaturi, da bi opale do 5,6MPa m^{1/2} kod epruveta ispitanih na 540°C.

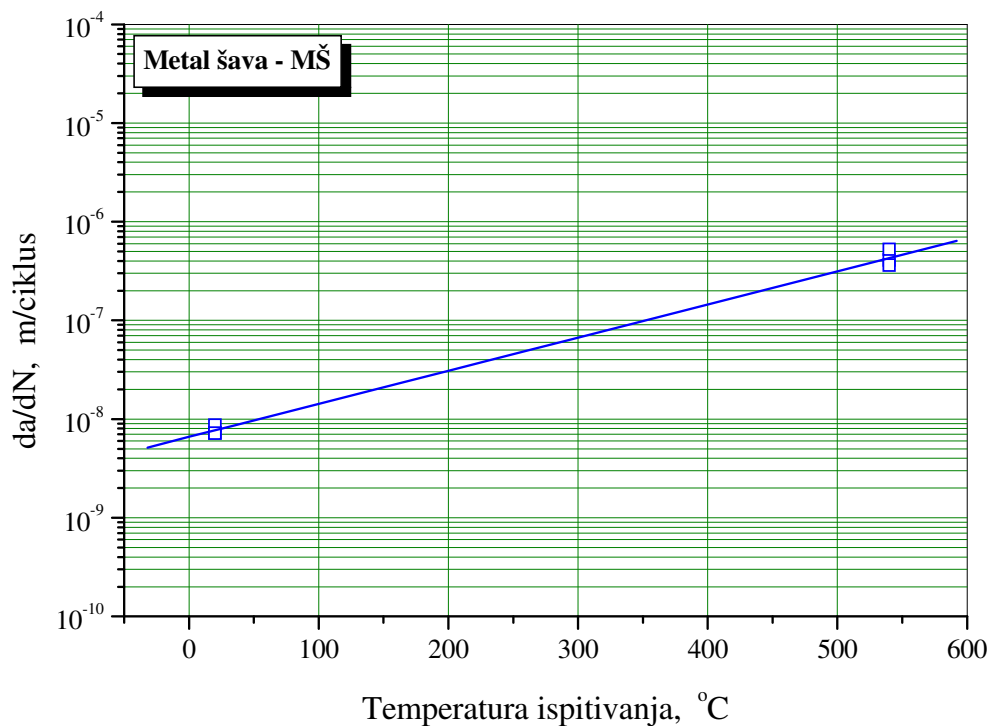
Uticaj heterogenosti strukture OM i komponenti zavarenog spoja na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , je u direktnoj vezi sa određenim parametrima Parisove jednačine, koeficijentom C i eksponentom m . Za analizu smo uzeli vrednost opsega faktora intenziteta napona $\Delta K = 10 \text{MPa m}^{1/2}$, odnosno vrednost na dijagramima zavisnosti $da/dN-\Delta K$ koja se nalaze u delu stabilnog rasta prsline u kome važi Parisov zakon.

Uticaj temperature ispitivanja i vremena eksploatacije na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , kod epruveta sa zarezom u OM je grafički prikazan na sl. 5.98. Brzina rasta zamorne prsline raste sa povećanjem temperature i kreće se od $5,09 \cdot 10^{-9} \text{m/ciklusu}$ za epruvete izvađene iz uzorka novog OM i ispitane na sobnoj temperaturi, do $1,33 \cdot 10^{-7} \text{m/ciklusu}$ na 540°C . Vreme eksploatacije dodatno povećava brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , odnosno dodatno smanjuje otpornost na propagaciju prsline. Dobijene vrednosti brzine rasta zamorne prsline, da/dN se kreću od $2,70 \cdot 10^{-8} \text{m/ciklusu}$ za epruvete eksploatisanog OM ispitane na sobnoj temperaturi, da bi se na 540°C povećala, i iznosi $1,03 \cdot 10^{-6} \text{m/ciklusu}$.

Nešto manju otpornost na propagaciju prsline, odnosno veću brzinu rasta zamorne prsline, da/dN imaju uzorci sa prslinom u MŠ, tab. 5.22. Uticaj temperature ispitivanja i vremena eksploatacije na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , kod epruveta sa zarezom u MŠ je grafički prikazan na sl. 5.99. Brzina rasta zamorne prsline se kreće od $7,72 \cdot 10^{-9} \text{m/ciklusu}$ za epruvete ispitane na sobnoj temperaturi, i povećava se do $4,32 \cdot 10^{-7} \text{m/ciklusu}$ na 540°C .

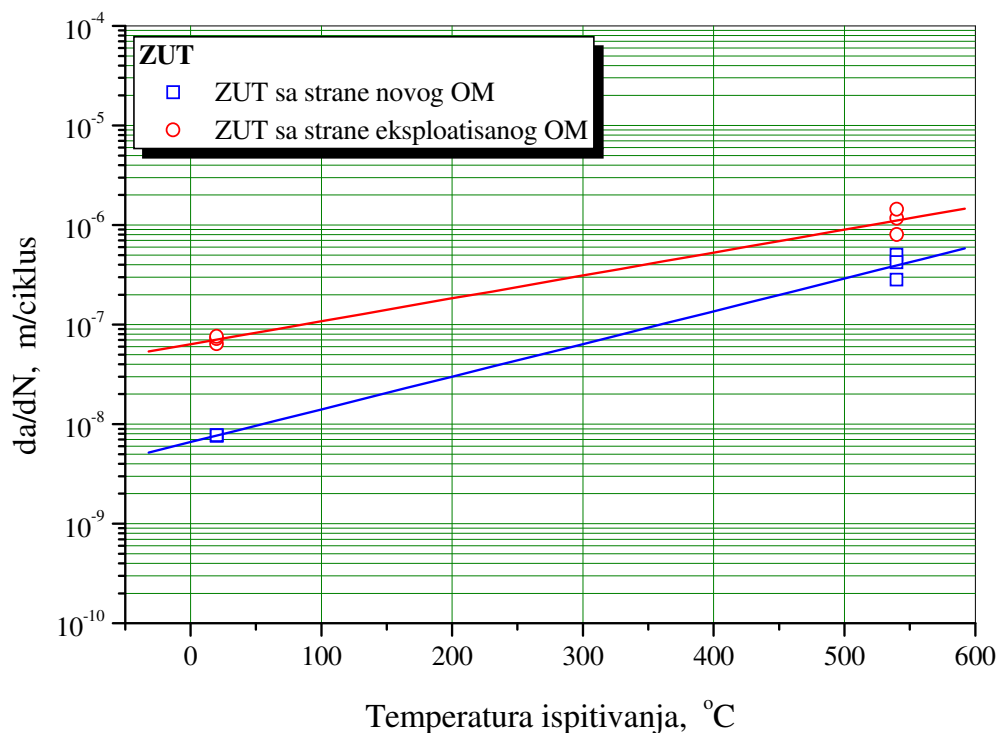


Slika 5.98. Promena da/dN u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije kod epruveta sa zarezom u OM



Slika 5.99. Promena da/dN u zavisnosti od temperature kod epruveta sa zarezom u MŠ

Iz dobijenih rezultata vidimo da najlošiju otpornost na propagaciju prsline odnosno najveću brzinu rasta zamorne prsline, da/dN imaju uzorci sa prslinom u ZUT, tab. 5.23 i 5.24. Uticaj temperature ispitivanja i vremena eksploatacije na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , kod epruveta sa zarezom u ZUT je grafički prikazan na sl. 5.100.



Slika 5.100. Promena da/dN u zavisnosti od temperature i vremena eksploatacije kod epruveta sa zarezom u ZUT

Brzina rasta zamorne prsline se kreće od $7,68 \cdot 10^{-9}$ m/ciklusu za epruvete sa zamornom prslinom u ZUT sa strane novog OM ispitane na sobnoj temperaturi, i raste do $4,04 \cdot 10^{-7}$ m/ciklusu na 540°C . Brzina rasta zamorne prsline, da/dN , se dodatno povećava kod ZUT sa strane eksploatisanog OM. Vrednost da/dN se povećava od sobne temperature gde iznosi $7,09 \cdot 10^{-8}$ m/ciklusu, do $1,14 \cdot 10^{-6}$ m/ciklusu dobijena na 540°C .

5.11.1. Diskusija ispitivanja parametara rasta zamorne prsline

Uticaj heterogenosti strukture odnosno mesto postavljanja zarezata i inicijacije prsline, kao i eksploatacioni uslovi (temperatura ispitivanja i period eksploatacije), imaju odlučujući uticaj na vrednosti praga zamora ΔK_{th} . Isto tako, heterogenosti strukture komponenti zavarenog spoja na brzinu rasta zamorne prsline, da/dN , je u direktnoj vezi sa određenim parametrima Parisove jednačine, koeficijentom C i eksponentom m .

Brzina rasta zamorne prsline raste sa povećanjem temperature. Vreme eksploatacije dodatno pogoršava karakteristike rasta zamorne prsline. Brzina rasta zamorne prsline se povećava oko 5,3 puta kod eksploatisanog materijala u odnosu na novi materijal. Ovo povećanje brzine rasta zamorne prsline, da/dN , je direktno povezano sa strukturnim promenama koje se javljaju kod eksploatisanog materijala u odnosu na novi materijal.

Novougrađeni materijal ima sitnoznu strukturu, dok eksploatisani materijal ima gruboznastu strukturu, što je posledica vremena eksploatacije. Takođe, period eksploatacije od blizu 40 godina je uticao na povećanje prisustva karbida po granicama i unutar zrna. Količina karbida u novom OM značajno je manja i karbidi su sitniji, sl. 5.26. Karbidi kao krta faza značajno povećavaju brzinu rasta zamorne prsline, odnosno smanjuju otpornost na propagaciju prsline pri delovanju promenljivog opterećenja. Što se tiče ispitivanja na povišenoj temperaturi, ona pokazuju sličnu tendenciju kao i kod ispitivanja na sobnoj temperaturi, samo što je brzina rasta zamorne prsline, da/dN , u ovom slučaju oko 7,7 puta veća u zavisnosti od mesta vrha zamorne prsline.

6. MERENJA DEFORMACIJSKOG I NAPONSKOG STANJA NA POSUDI (REAKTORU) POD PRITISKOM

Period eksploatacije od preko 40 godina zahtevao je sveobuhvatan pregled reaktora metodama bez razaranja (IBR) kao i metodama sa razaranjem, definisanje oštećenih zona, kao i sanaciju istih. Sanacija reaktora je zahtevala i zamenu dela plašta novougrađenim materijalom. Nakon potpune sanacije reaktora, kompletan reaktor je odžaren u peći, sa ciljem da se uravnoteže zaostali naponi nastali zavarivanjem u procesu sanacije.

Nakon sanacije a pre puštanja u pogon, konstatovano je da bi trebalo adekvatnim metodama ispitati predmetni reaktor, i proveriti da li je ovako dug eksploatacioni period uticao na stanje kvaliteta osnovnog materijala kao i saniranih zona. Imajući u vidu radni fluid i radne uslove, kao i lokaciju i orijentaciju saniranih delova reaktora, u toku probe hladnim vodenim pritiskom (HVP) sa spoljašnje strane, praćena je promena deformacijskog i naponskog stanja primenom tenzometrijske metode (merne trake) [80].

U drugoj fazi ispitivanja reaktora, odnosno u toku rada, što znači u eksploatacionim uslovima (odgovarajući pritisak i odgovarajuća temperatura), praćena je promena deformacijskog i naponskog stanja u saniranim zonama plašta reaktora tenzometrijskom metodom (specijalne merne trake). Merna mesta su bila u zonama na kojima je praćeno deformacijsko i naponsko stanje u toku probe hladnim vodenim pritiskom (ispitivanja na sobnoj temperaturi).

Cilj tenzometrijskih ispitivanja je praćenje i određivanje deformacijskog i naponskog stanja pri ispitnom pritisku u toku probe hladnim vodenim pritiskom, odnosno provera da nije došlo do pojave trajnih plastičnih deformacija na izabranim mestima na reaktoru. Tenzometrijska ispitivanja u eksploatacionim uslovima su rađena sa ciljem da se odredi stvarno naponsko i deformacijsko stanje u eksploataciji, definišu eventualne promene, a koje treba da budu podloga za procenu integriteta i preostalog veka reaktora.

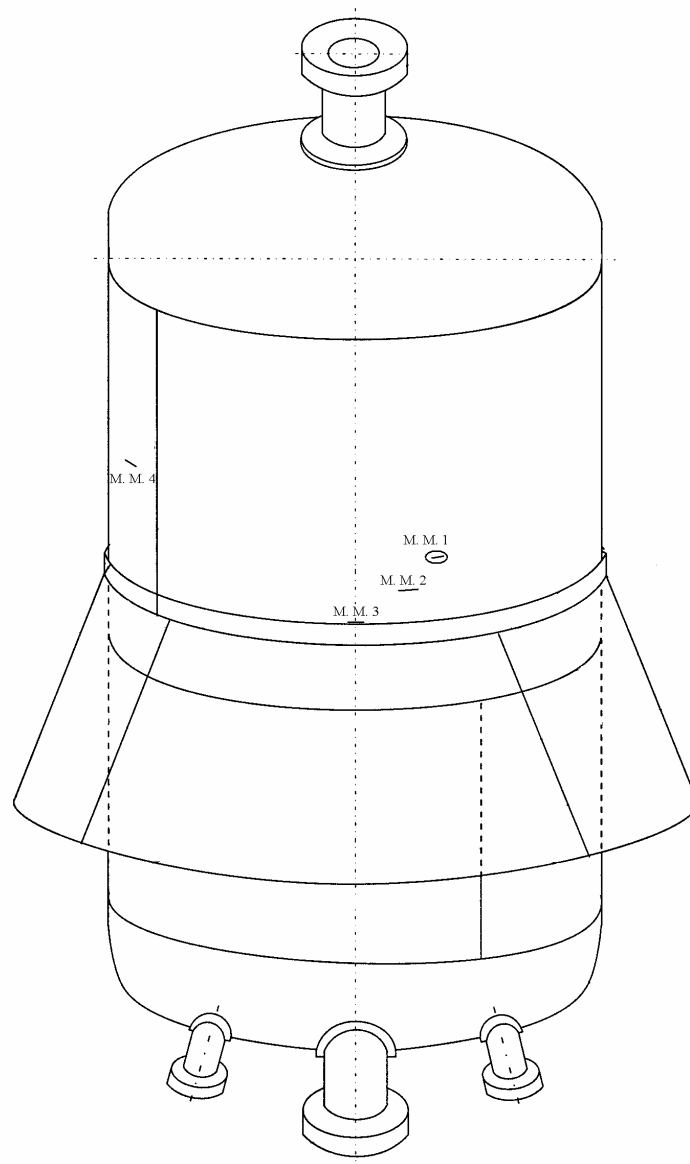
6.1. ODREĐIVANJE NAPONSKOG STANJA U TOKU PROBE HVP

Za određivanja deformacijskog, a samim tim i naponskog stanja na reaktoru u toku HVP, korišćene su pojedinačne merne trake 10/120 LY 11. Izbor da se merenje deformacijskog stanja vrši pojedinačnim mernim trakama je proistekao na osnovu merenja urađenog 2000. godine posle urađene delimične sanacije reaktora. Tim merenjima smo definisali pravac delovanja glavnog napona σ_I , pa nije bilo potrebe za korišćenjem rozeta. Kompenzacija temperaturnih promena je izvršena sa 2 merne trake 10/120 LY 11. Merna

mesta su izabrana na osnovu merenja urađenih 2000. godine, kao i na osnovu urađenih IBR ispitivanja, i to su:

- ⇒ **Merno mesto 1** - **Metal šava (MŠ)** saniranog mesta na reaktoru postupkom reparaturnog navarivanja
- ⇒ **Merno mesto 2** - **Zona uticaja toplote (ZUT)** saniranog mesta na reaktoru postupkom reparaturnog navarivanja, gde je prisutno lokalno udubljenje (4-5mm)
- ⇒ **Merno mesto 3** - **Zona uticaja toplote (ZUT)** spoja prsten-osnovni materijal gornje polovine reaktora
- ⇒ **Merno mesto 4** - **Zona neoštećenog dela osnovnog materijala (OM)**

Schema izbora mernih mesta data je na sl. 6.1.



Slika 6.1. Shematski prikaz mernih mesta na reaktoru DC-304

Za napajanje i kondicioniranje mernih mesta korišćen je 40-to kanalni merni pojačavač UPM-40 proizvođača HBM. Kako su ulazi u merni pojačavač UPM-40 u konfiguraciji polu Vinstonovog mosta [82], pojedinačnim mernim trakama su dodate po jedna pojedinačna merna traka iste vrste koja služi kao kompenzaciona merna traka. Ova traka je zalepljena na isti materijal koji nije opterećen, i kojom se vrši dopuna Vinstonovog mosta i temperaturna kompenzacija svakog mernog mesta. Pored višekanalnog mernog pojačavača UPM 40, a za prikupljanje i obradu podataka sa pojedinačnih mernih traka korišćeni su pripadajući konektorski kablovi i konektorska kutija, kao i personalni računar.

Na osnovu izmerenih mikrodeformacija na pojedinačnim mernim trakama, izračunavaju se **Glavni normalni naponi** po formuli:

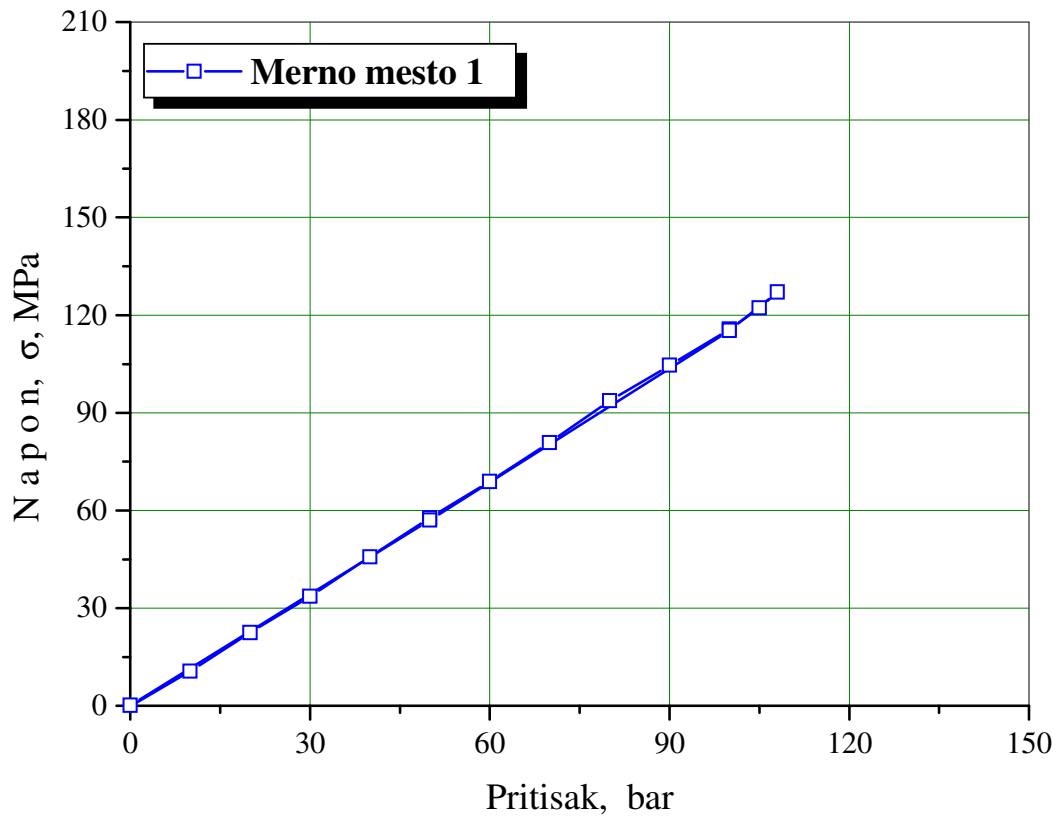
$$\sigma_l = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Merenje deformacija je vršeno stepenasto [83, 84] tokom hladne probe, kao što se vidi iz tab. 6.1. Rezultati ispitivanja su dati i dijagramski, sl. 6.2 do 6.9 kao zavisnost:

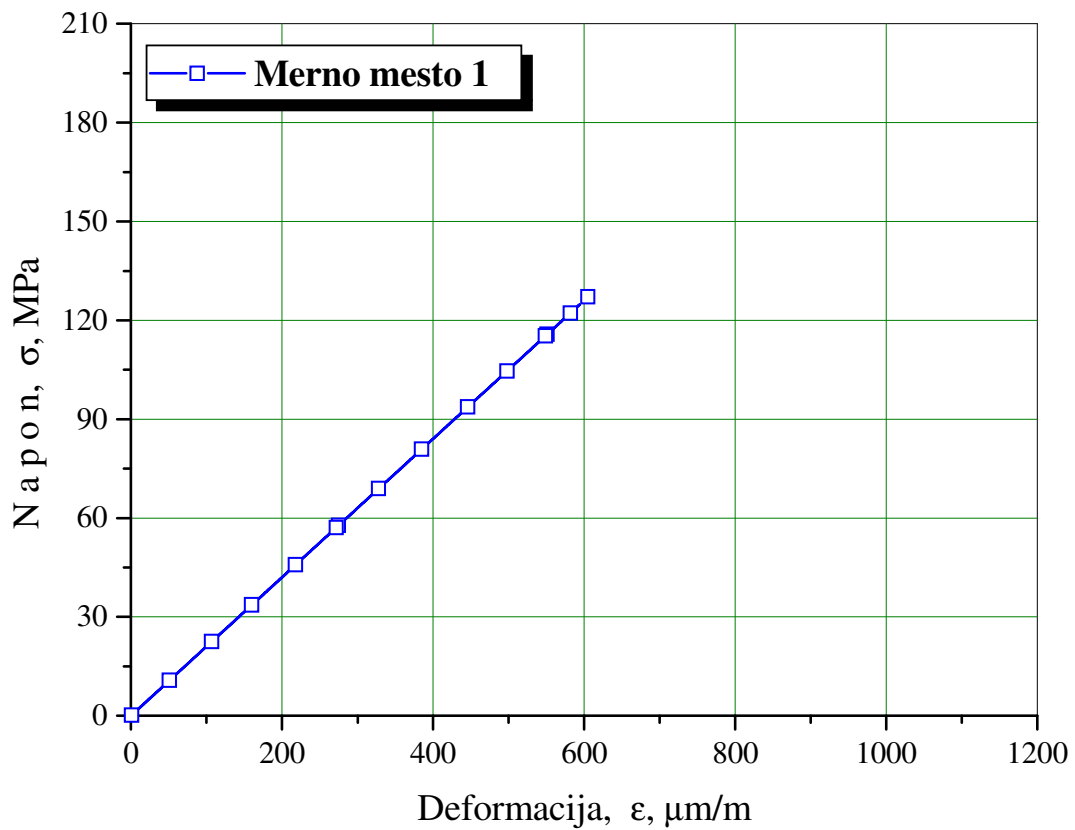
- ⇒ napon-pritisak, i
- ⇒ napon-deformacija.

Tabela 6.1. Izmerene mikrodeformacije i izračunati naponi na reaktoru u toku probe HVP

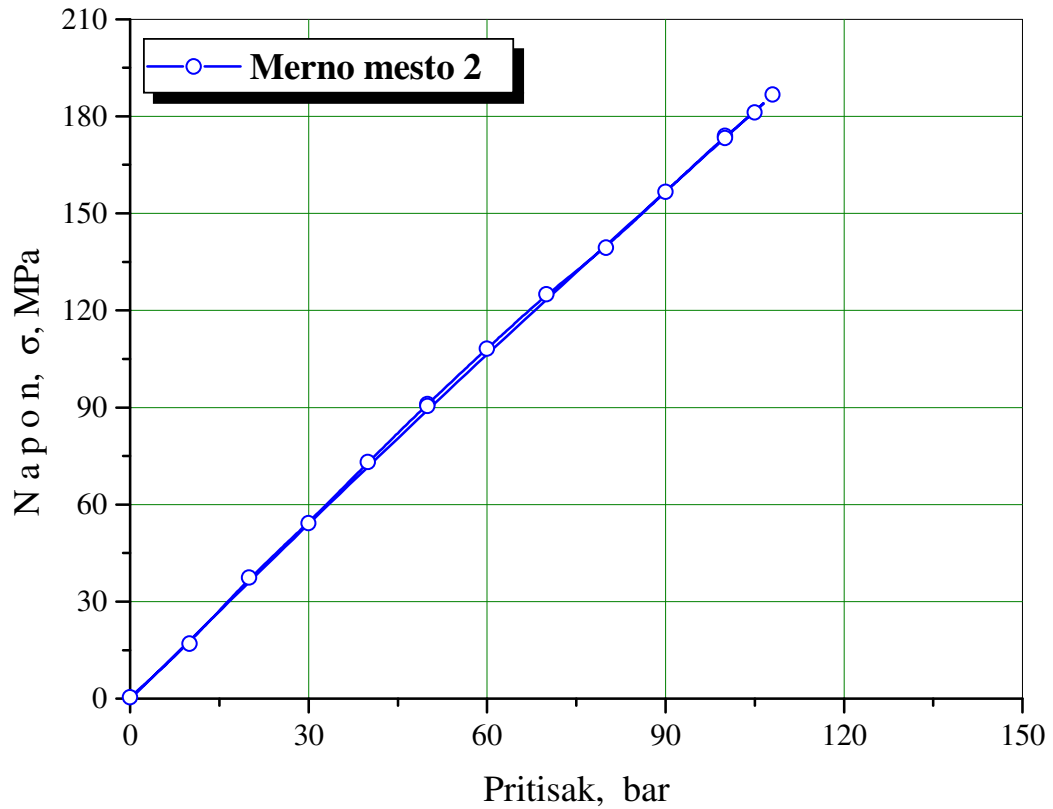
Pritisak bar	M.M. 1 $\mu\text{m/m}$	Napon σ , MPa	M.M. 2 $\mu\text{m/m}$	Napon σ , MPa	M.M. 3 $\mu\text{m/m}$	Napon σ , MPa	M.M. 4 $\mu\text{m/m}$	Napon σ , MPa
0	-1	-0,2	2	0,4	0	0,0	1	0,2
10	51	10,7	81	17,0	55	11,6	48	10,1
20	107	22,5	178	37,4	111	23,3	112	23,5
30	160	33,6	258	54,2	165	34,7	168	35,3
40	218	45,8	348	73,1	226	47,5	233	48,9
50	275	57,8	434	91,1	279	58,6	293	61,5
60	328	68,9	515	108,2	334	70,1	354	74,3
70	385	80,9	595	125,0	388	81,5	418	87,8
80	446	93,7	664	139,4	451	94,7	483	101,4
90	498	104,6	746	156,7	502	105,4	540	113,4
100	551	115,7	828	173,9	553	116,1	596	125,2
105	582	122,2	863	181,2	587	123,3	631	132,5
108	605	127,1	889	186,7	610	128,1	652	136,9
100	549	115,3	825	173,3	554	116,3	594	124,7
50	272	57,1	431	90,5	281	59,0	295	62,0
0	-3	-0,6	-1	-0,2	-5	-1,1	-3	-0,6



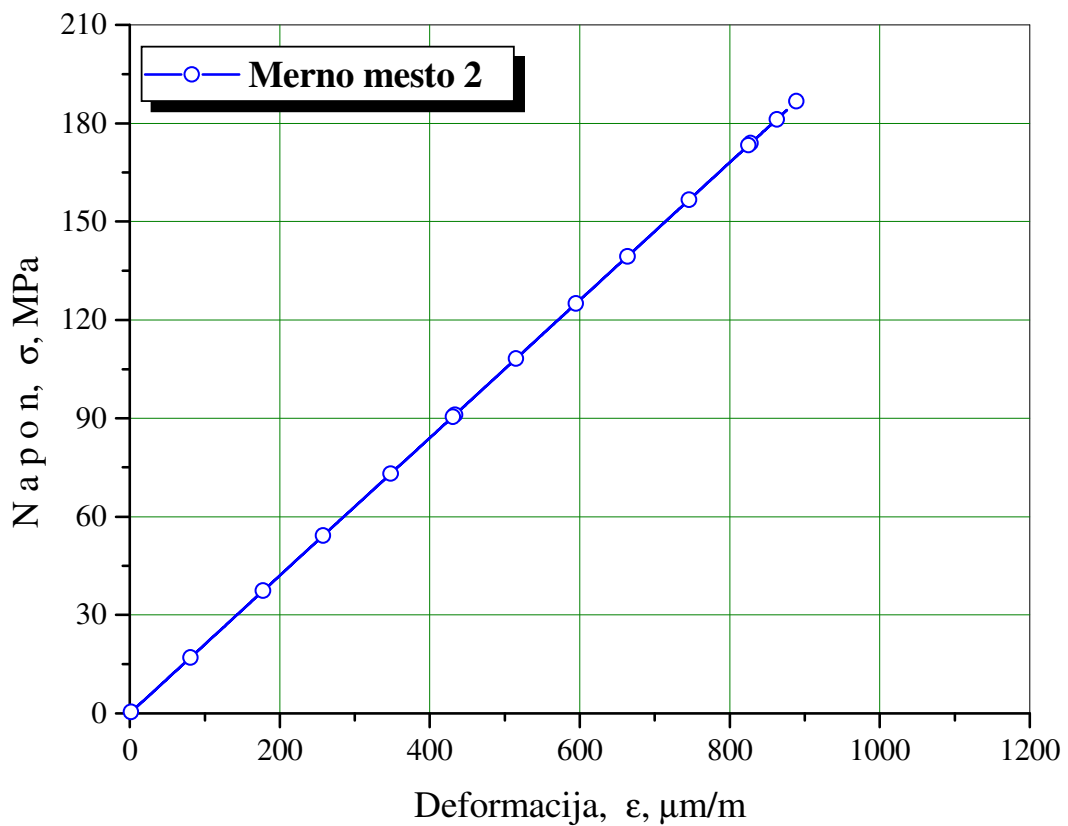
Slika 6.2. Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 1



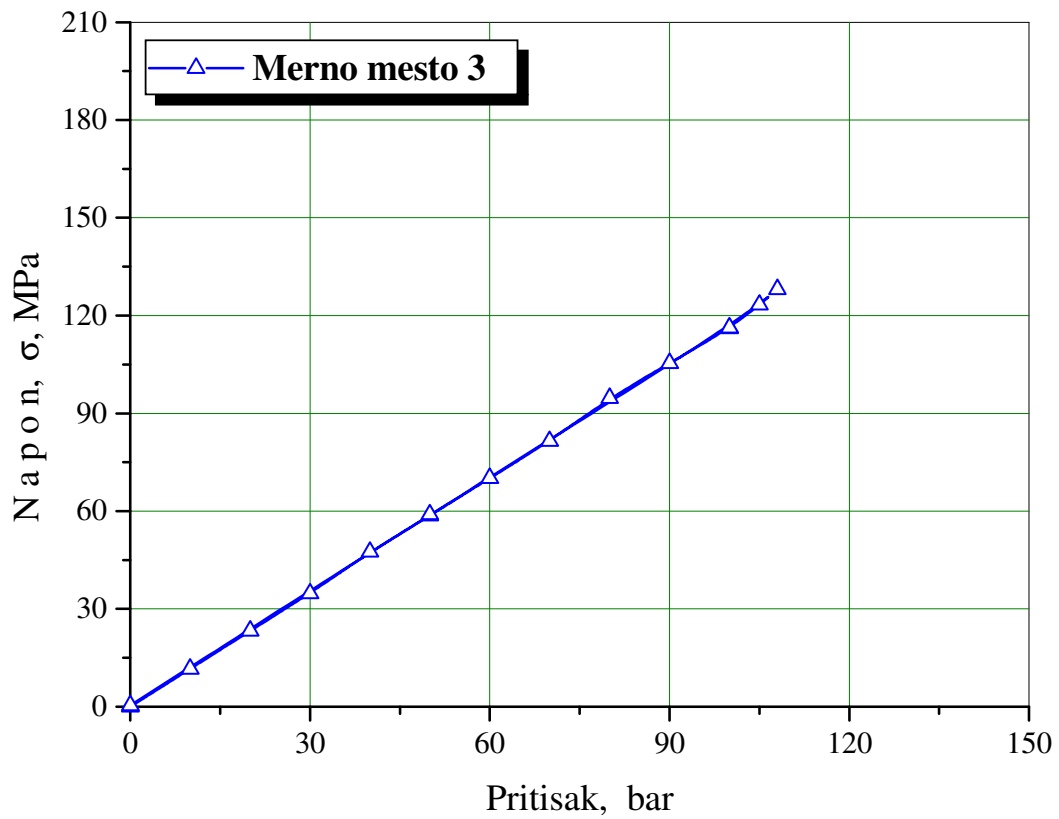
Slika 6.3. Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 1



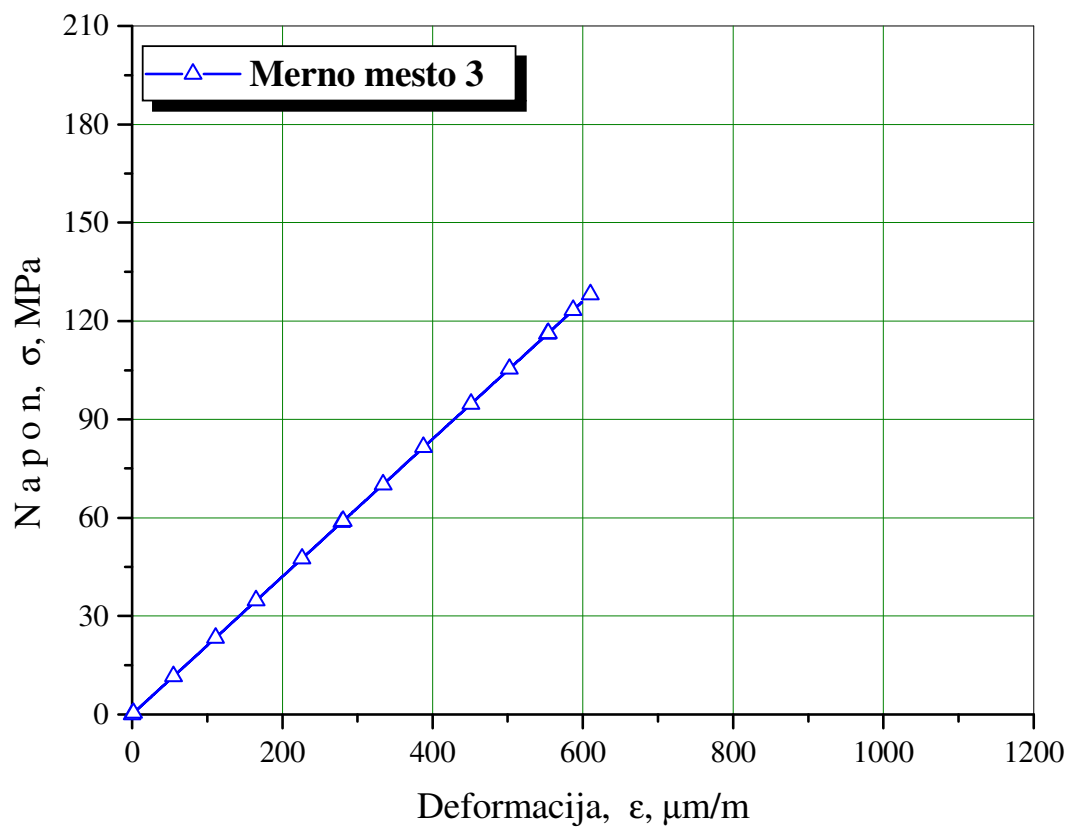
Slika 6.4. Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 2



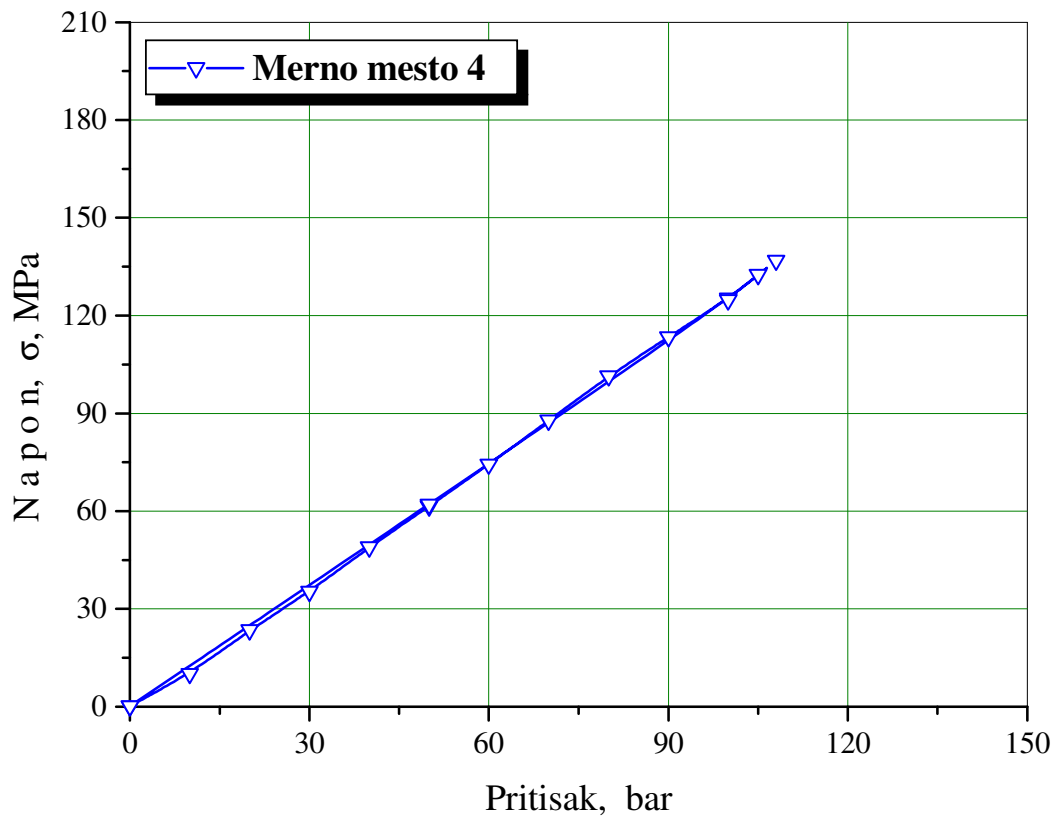
Slika 6.5. Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 2



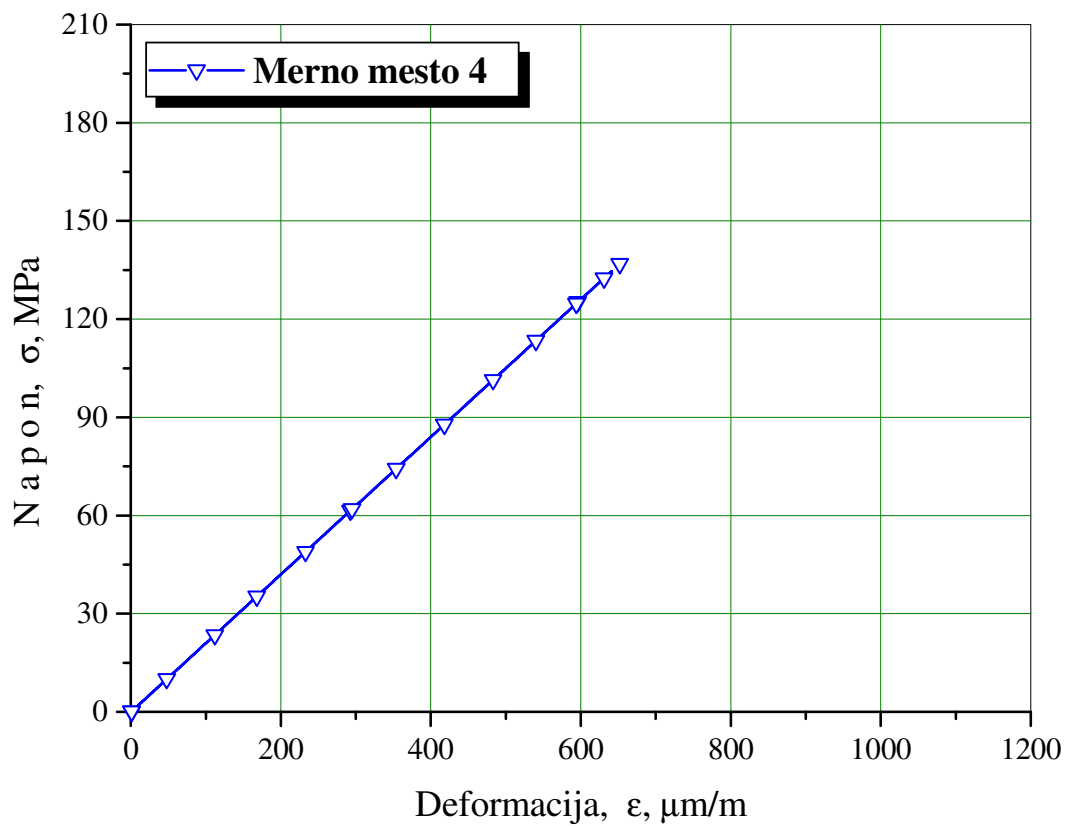
Slika 6.6. Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 3



Slika 6.7. Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 3



Slika 6.8. Dijagram napon-pritisak na mernom mestu 4



Slika 6.9. Dijagram napon-deformacija na mernom mestu 4

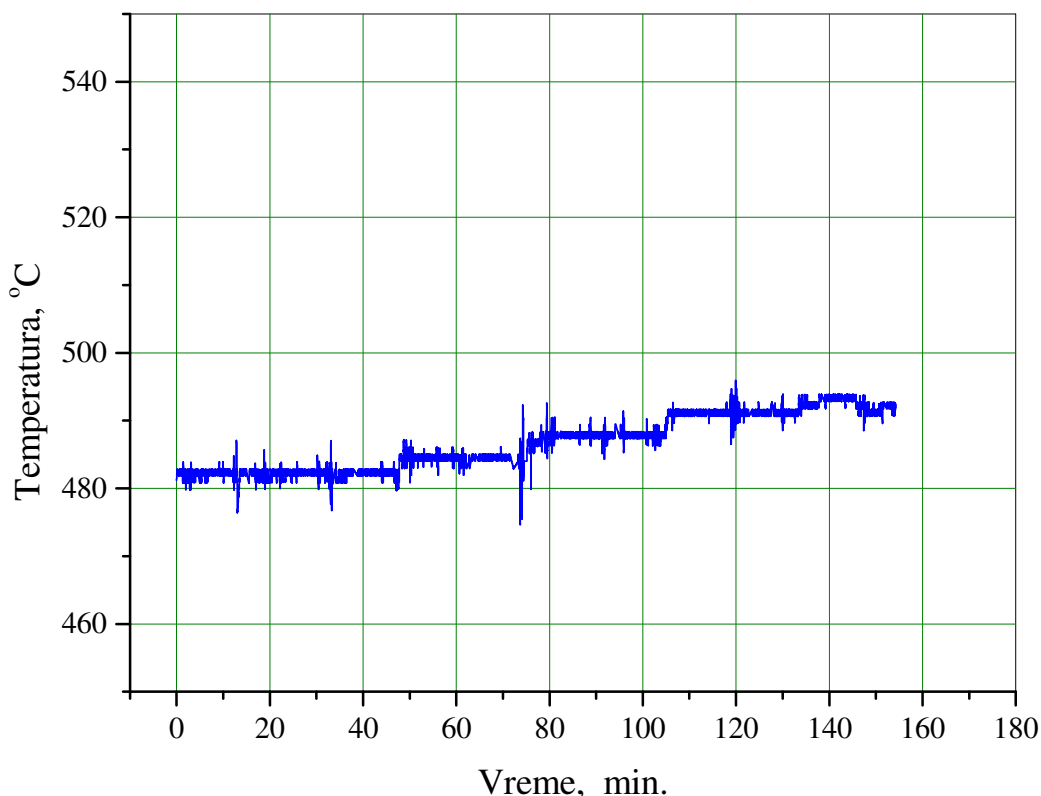
Izmerene mikrodeformacije na mernim trakama i izračunati stvarni glavni naponi ukazuju na to da ni na jednom mernom mestu nije prekoračen napon tečenja, odnosno naponi su u linearno-elastičnom području. Najveći izračunati glavni naponi su u zoni uticaja toplote (ZUT) saniranog mesta na reaktoru postupkom reparaturnog navarivanja, gde je prisutno lokalno udubljenje (Merno mesto 2, približno 187MPa).

Znajući da je na ovim mestima izmereno lokalno smanjenje debljine približno 3 do 5mm, dobijene vrednosti glavnih napona su relativno niske. Ovakav zaključak se može izvesti ako se uzme u obzir da su dobijeni naponi na ostalim mernim mestima kreću u intervalu od 128MPa u zoni mernog mesta 3 do 137MPa u zoni mernog mesta 4.

6.2. MERENJE PROMENA TEMPERATURE I PRITISKA NA REAKTORU

Merenje pritiska i temperature na reaktoru u eksploataciji je rađeno sa ciljem da se definišu stvarni radni uslovi reaktora, odnosno da se definišu eventualne promene u režimu rada, čije odstupanje bi dovelo do eventualnih neželjenih posledica. Takođe, ovi podaci su neophodni kako bi se definisale eventualne ciklične pojave koje mogu da utiču na integritet i preostali vek rada reaktora.

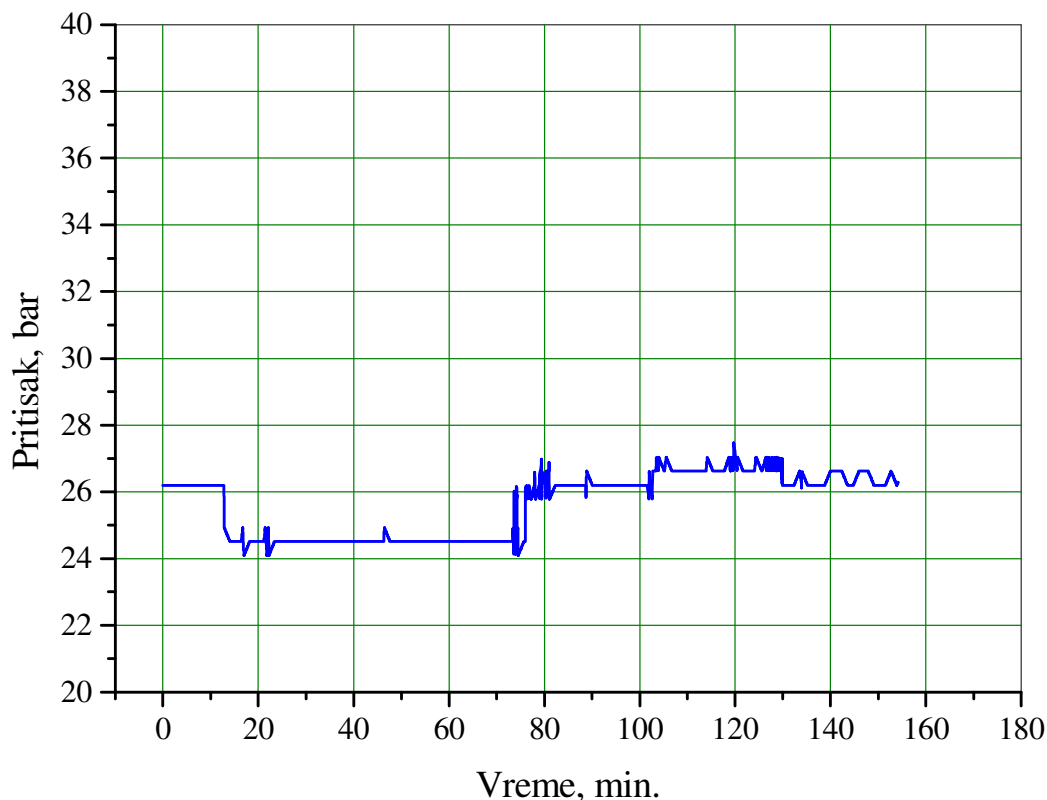
Merenje temperature je rađeno u realnom vremenu u periodu od nekoliko sekundi, do nekoliko časova, sukcesivno registrujući podatke pomoću višekanalnog dinamičkog uređaja SPIDER-8 proizvođača HBM. Termopar oznake SK-2201, proizvođača VISHAY je postavljen iznad prstena nosača suknjice. Tipičan primer promene temperature na reaktoru u eksploataciji prikazan je na sl. 6.10.



Slika 6.10. Zavisnost promene temperature od vremena na reaktoru u eksploataciji

Merenje pritiska je takođe rađeno u realnom vremenu u periodu od nekoliko sekundi do nekoliko časova, sukcesivno registrujući podatke pomoću višekanalnog dinamičkog uređaja SPIDER-8 proizvođača HBM. Za merenje pritiska korišćen je piezo membranski

davač pritiska oznake PV 08, takođe proizvođača VISHAY. Davač pritiska je postavljen iznad prstena nosača suknjice, i specijalnim cementom pričvršćen za osnovni materijal. Tipičan primer promene pritiska na reaktoru prikazan je na sl. 6.11.



Slika 6.11. Zavisnost promene pritiska od vremena na reaktoru u eksploataciji

6.3. ODREĐIVANJE NAPONSKOG STANJA REAKTORA U EKSPLOATACIJI

Merenje deformacijskog i naponskog stanja u eksploatacijskim uslovima (radni pritisak i radna temperatura) na reaktoru je rađeno sa ciljem da se odredi stvarno naponsko stanje u reaktoru. Ovi podaci su takođe neophodni kako bi se definisale eventualne ciklične pojave na osnovu kojih će se vršiti procena integriteta i preostalog veka rada reaktora.

Za određivanje deformacijskog, a samim tim i naponskog stanja na reaktoru u eksploataciji, korišćene su specijalne merne trake oznake HFP-12-250-SPW proizvođača VISHAY. Trake su specijalnim keramičkim cementom oznake HITEC 701 takođe proizvođača VISHAY zalepljene na definisana merna mesta, i nakon toga zaštićene od spoljašnjeg uticaja zaštitom SL 450. Kompenzacija temperaturnih promena je izvršena sa 2 merne trake oznake HFP-12-250-SPW [81]. Merne trake su zalepljene na ista merna mesta na kojima su bile zalepljene pojedinačne merne trake korišćene za registrovanje deformacijskog i izračunavanje naponskog stanja u toku probe hladnim vodenim pritiskom.

Za napajanje i kondicioniranje mernih mesta korišćen je osmo kanalni merni pojačavač SPIDER-8 proizvođača HBM. Merni pojačavač SPIDER-8 je korišćen iz razloga, što je trebalo u određenom vremenskom intervalu snimiti dinamičku pojavu rada reaktora. Naime, za proračun preostalog veka nam je bilo neophodno da kontinualno snimamo promenu deformacijskog stanja reaktora u eksploataciji.

Merenje deformacija je vršeno u dve faze, i to:

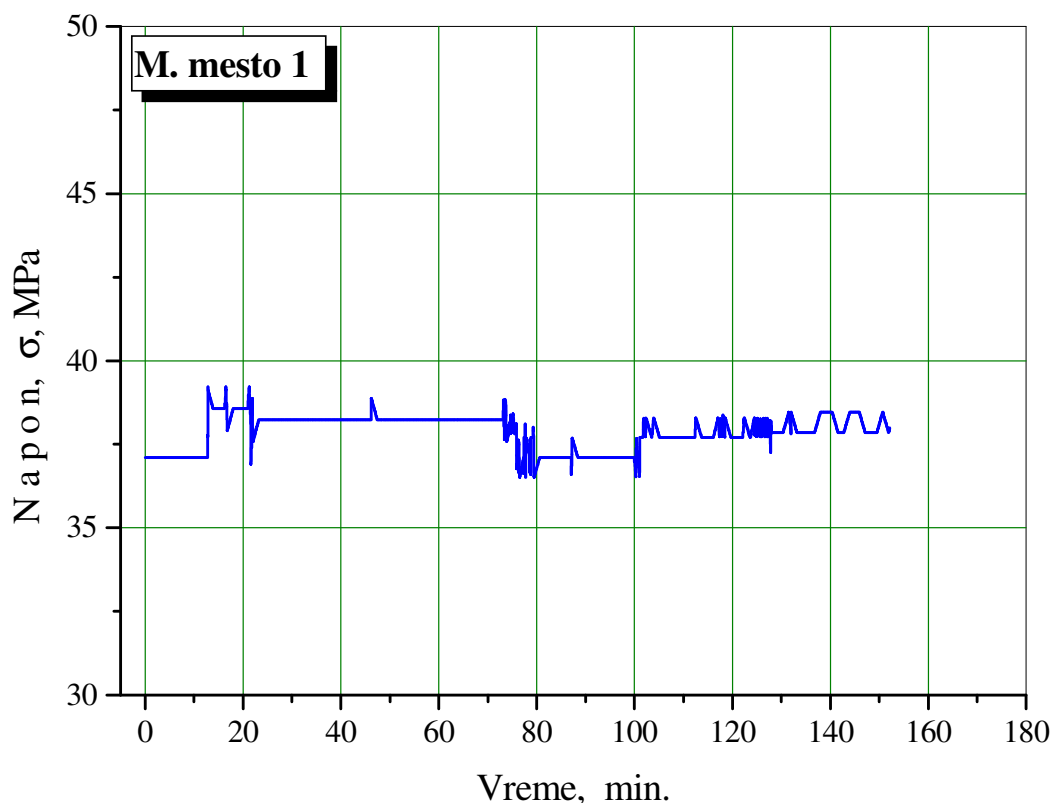
- ⇒ I faza-merenje deformacija pre starta rada reaktora (nulto stanje) i merenje deformacija na radnom pritisku i radnoj temperaturi, i
- ⇒ II faza-merenje deformacija u radnim uslovima, sa ciljem da se odredi $\Delta\sigma$, odnosno gradijent promene opterećenja.

Rezultati određivanja deformacijskog i naponskog stanja u eksploataciji na reaktoru pri radnom pritisku od 26,3bar su dati u tab. 6.2.

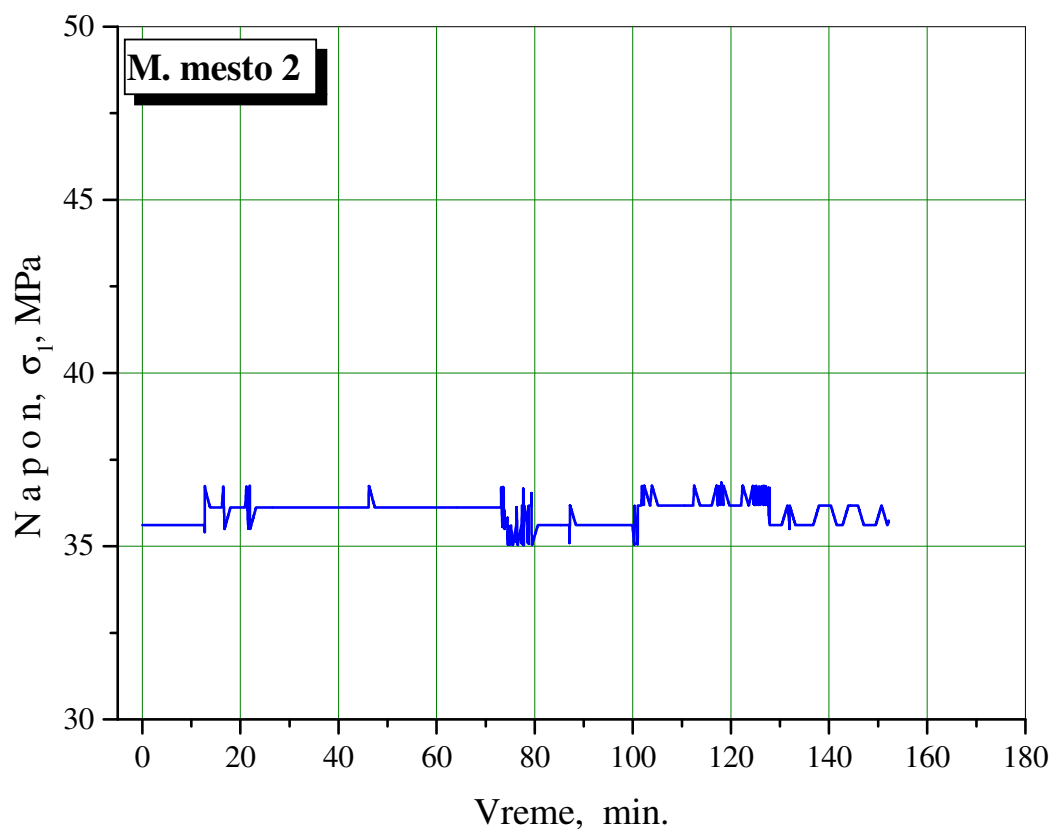
Tabela 6.2. Rezultati određivanja deformacijskog i naponskog stanja na reaktoru u eksploataciji

Merno mesto	Pritisak, p, bar	Izmerene mikrodeformacije, $\mu\text{m/m}$	Napon, σ_1 , MPa
M. M. 1	26,3	263	38,1
M. M. 2	26,3	251	36,2
M. M. 3	26,3	284	41,1
M. M. 4	26,3	317	45,9

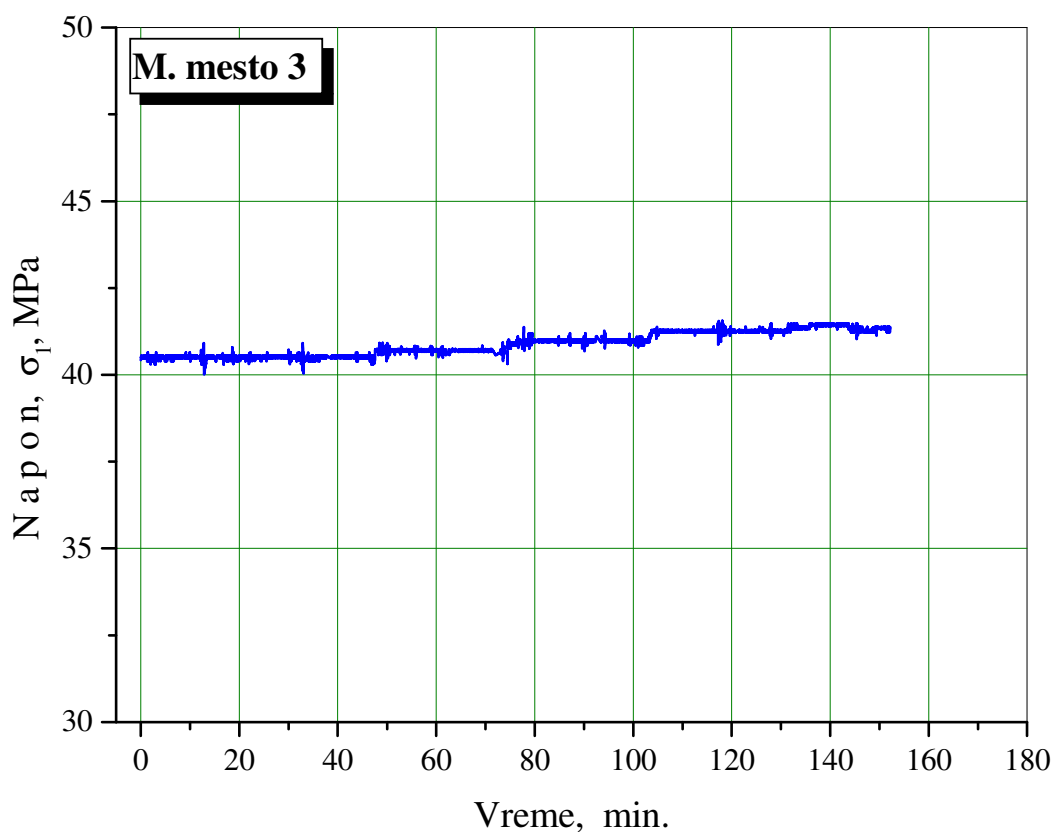
Da bi odredili $\Delta\sigma$, vršeno je merenje deformacijskog stanja u određenom vremenskom intervalu [83, 84]. Cilj ovih merenja je bio da se vidi da li je u određenom vremenskom intervalu došlo do određenih deformacijskih promena, koje su rezultat promene pritiska u reaktoru, i koja je učestanost tih promena. Promena deformacijskog, odnosno naponskog stanja usled promene pritiska na reaktoru u eksploataciji za merna mesta 1 do 4 je prikazana dijagramski, kao zavisnost napon-vreme (sl. 6.12 do 6.15).



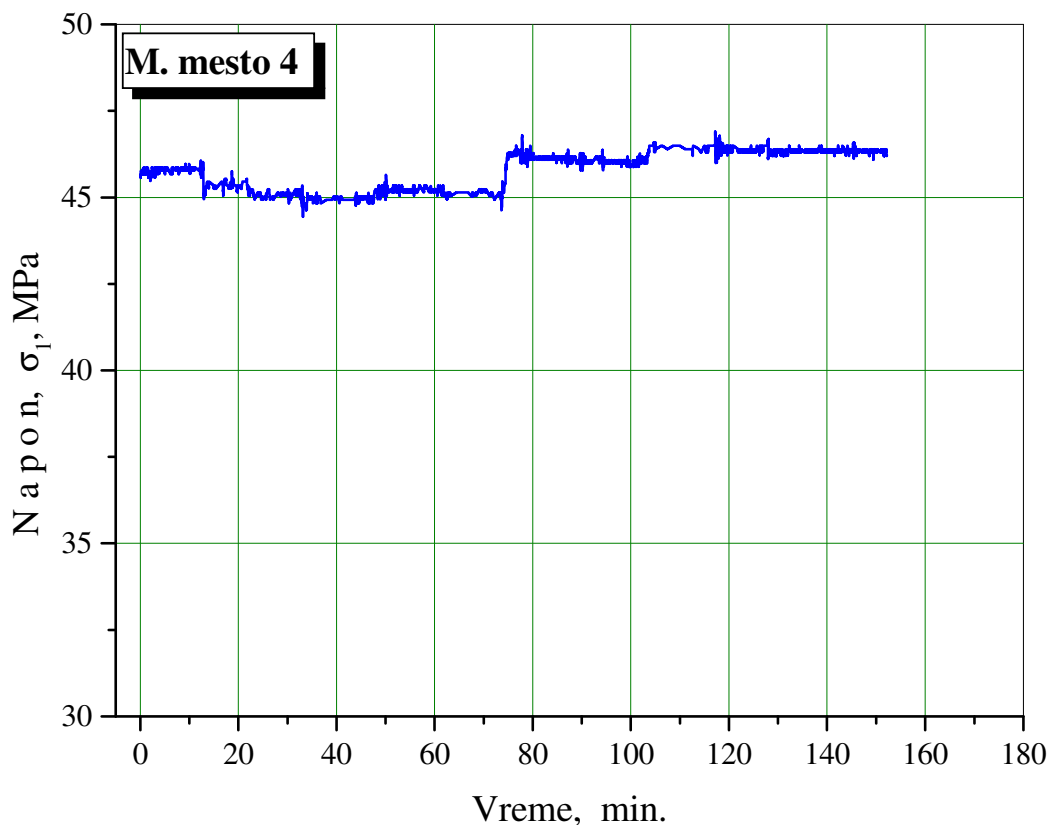
Slika 6.12. Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 1



Slika 6.13. Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 2



Slika 6.14. Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 3



Slika 6.15. Promena napona u toku eksploatacije, merno mesto 4

Izmerene vrednosti temperature i pritiska na reaktoru u eksploataciji, pokazuju da je u režimu rada ovog reaktora bilo određenih temperaturnih promena koje su se ogledale kao varijacija temperature u intervalu od 474 do 494°C. Ove promene temperature nisu značajnije uticale na promene pritiska u reaktoru. Naime, u istom vremenskom intervalu primetno je prosečno između 5 i 7 značajnijih oscilacija pritiska u toku jednog sata rada reaktora, koje mogu da imaju neki značaj kod ocene integriteta i preostalog veka reaktora. Ove promene pritiska možemo klasifikovati kao ciklične promene, i kao takve ih uzeti u obzir za analizu i ocenu integriteta i preostalog veka reaktora sa aspekta zamora i mehanike loma, odnosno delovanja promenljivog opterećenja.

Izmerene mikrodeformacije na mernim trakama i izračunati stvarni glavni naponi ukazuju na to da ni na jednom mernom mestu nije prekoračen napon tečenja, odnosno naponi su u linearno elastičnom području. Najveći izmereni glavni napon je u zoni mernog mesta br.4-Zona neoštećenog dela osnovnog materijala (OM). Sledeći po veličini izračunati napon je u zoni mernog mesta br. 3-Zona uticaja toplote (ZUT) spoja prsten-osnovni materijal gornje polovine reaktora. Najmanje izmerene deformacije i izračunati glavni naponi su u zoni mernog mesta br. 2 odnosno zoni uticaja toplote (ZUT) saniranog mesta na reaktoru postupkom reparaturnog navarivanja, gde je prisutno lokalno udubljenje (4-5mm), i u zoni mernog mesta br. 1, odnosno zoni metala šava (MŠ) saniranog mesta na reaktoru postupkom reparaturnog navarivanja.

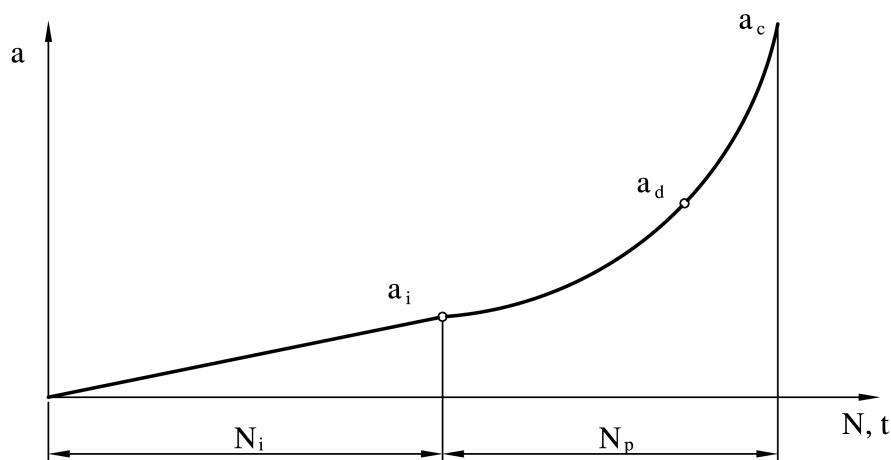
Ova merenja uglavnom omogućavaju utvrđivanje posledice dejstva opterećenja i lošeg ponašanja konstrukcije, a ne uzrok. Međutim, ukoliko unapred poznajemo ponašanje konstrukcije, onda ova merenja idu ka iznalaženju uzroka.

7. PREDVIĐANJE PREOSTALOG VEKA U EKSPLOATACIJI

Ocena integriteta i procena preostalog radnog veka konstrukcijskih elemenata ili konstrukcija izloženih dejstvu promenljivog opterećenja je potrebna za definisanje intervala kontrole za otkrivanje i otklanjanje oštećenja nastalih u eksploataciji. Proces zamora i loma se može podeliti u tri vremenske faze [85]:

- ⇒ Fazu stvaranja mikroprslina a_i i njenog daljeg rasta do veličine nazvane inženjerskom prslinom, a_0 . To može biti i minimalna dužina prsline koja se može otkriti, a_{pr} .
- ⇒ Fazu stabilnog rasta makroprslina do pojave nestabilnosti pri dužini a_c .
- ⇒ Fazu nestabilnog rasta i konačnog kvazistatičkog loma.

Kako se mehanizmi iniciranja i rasta mikroprslina (faza 1) razlikuju od mehanizma rasta makroprslina (faza 2), to su potrebna i dva različita pristupa za ocenu udela tih faza u ukupnom veku zamora (sl. 7.1). Uobičajen pristup je da se za ocenu broja ciklusa N_i potrebnih za iniciranje prsline koristi koncept lokalnih deformacija, a za ocenu udela faze rasta prsline N_p koncept mehanike loma. Kako prelaz iz faze iniciranja u fazu razvoja prsline nije lako definisati u praksi je najčešći slučaj da se u cilju pojednostavljenja postupka određivanja ukupnog veka zamora uoči koja faza zamora je dominantna i da se, zatim, ona samostalno razmatra.



Slika 7.1. Udeo perioda iniciranja N_i i perioda rasta zamorne prsline N_p u ukupnom veku zamora N_u [85]

Pretpostavka tipična za konstruisanje mašina da u elementima nema grešaka opredeljuje da je značajnija prva faza, faza iniciranja prsline. Ovo je tipičan i logičan koncept za male, pažljivo pripremljene komponente bez oštih zareza. Međutim, kod zavarenih konstrukcija mnogo je bliža pretpostavka da inicijalne prsline već postoje i da treba odrediti kako se brzo one razvijaju. Radni vek takvih konstrukcija kao što su brodovi, morske platforme za vađenje nafte, mostovi i posude pod pritiskom uglavnom se sastoji od razvoja postojećih grešaka.

Iako su opterećenja sa konstantnom amplitudom u praksi retka, najveći broj eksperimentalnih podataka u vidu zavisnosti $da/dN = f(\Delta K, R)$ je dat upravo za ovakve promene opterećenja. To znači da su promene ΔK za vreme rasta prsline tokom testa inkrementalne, kako bi se eventualni interakcijski uticaj opterećenja sveo na minimalnu meru. Empirijski modeli iz petog poglavlja sa manjim ili većim uspehom opisuju rast prsline za takve uslove, pri čemu se odgovarajuće konstante materijala C i m podešavaju tako da zadovolje eksperimentalne rezultate. Zbog toga se ti idealizovani modeli mogu koristiti za predviđanje veka zamora komponenti koje su izložene opterećenjima sa približno konstantnim vrednostima opsega ΔK i opsega R . Pod pretpostavkom da se zna promena [86]:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R), \text{ odnosno } dN = \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (7.1)$$

integracijom se dobija vek:

$$\Delta N = \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (7.2)$$

Kako je najčešće funkcija $f(\Delta K, R)$ složena, rešenje ovog integrala se retko može dati u zatvorenom obliku, to se integracija mora sprovesti numerički. Najprostiji je oblik funkcije $f(\Delta K, R)$ u Parisovom modelu, pa izraz 7.2 dobija oblik [86]:

$$\Delta N = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{\left[Y \left(\frac{a}{W} \right) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \right]^m} \quad (7.3)$$

gde je ΔN broj ciklusa neophodan za rast prsline od početne a_0 do kritične a_c ili dozvoljene dužine prsline a_d . Korekcionni faktor $Y = Y(a/W)$ za prslinu u komponenti je najčešće u obliku dugog polinoma ili je dat u tabelarnom obliku, pa se i pod uslovom da je $\Delta \sigma = \text{const.}$ i da ne zavisi od a nameće rešavanje problema numeričkom integracijom. Ovakva integracija se najlakše rešava uz primenu kompjutera, ali i bez njega postupak nije neprihvatljivo vremenski dug. Treba reći da se tokom navedenih postupaka linearne integracije ne uzima u obzir, sa stanovišta sigurnosti, pozitivna pojava retardacije, pa se dobijaju konzervativni rezultati, sa većom sigurnošću.

Ukoliko se u prvoj aproksimaciji usvoji da Y ne zavisi od dužine prsline a , tada se izraz 7.3 može napisati u obliku:

$$\Delta N = \frac{1}{C [\Delta \sigma \sqrt{a}]^m} \int_{a_0}^{a_d} a^{-\frac{m}{2}} da \quad (7.4)$$

pa se nakon integracije dobija rešenje u zatvorenom obliku:

$$\Delta N = \frac{1}{C[Y\Delta\sigma\sqrt{a}]^m} \cdot \frac{a_0^{\left(1-\frac{m}{2}\right)} - a_d^{\left(1-\frac{m}{2}\right)}}{\frac{m}{2} - 1} \quad (7.5)$$

Treba napomenuti da ova aproksimacija dovodi do nekonzervativnog rešenja u odnosu na rešenja koja uzimaju u obzir činjenicu da je $Y = Y(a)$ i koja se moraju odrediti numeričkim metodama [86].

7.1. OCENA INTEGRITETA I PROCENA PREOSTALOG VEKA REAKTORA U EKSPLOATACIJI

Ocena integriteta i procena preostalog veka upotrebe reaktora, je rađena uz prethodno urađenu kvalifikaciju tehnologije zavarivanja novi OM-eksploatisani OM limova debljine 102mm, a u skladu sa standardom EN ISO 15614-1. Ispitivanja koja ovaj standard ne predviđa, a neophodna su za ocenu integriteta i preostalog veka su ispitivanja na radnoj temperaturi (540°C), kao i dopunska ispitivanja eksploatacionih svojstava novog i eksploatisanog OM i komponenti zavarenog spoja na sobnoj i radnoj temperaturi. Dopunska ispitivanja su uključila određivanje kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} , kritične dužine prsline a_c , i parametara rasta zamorne prsline (da/dN i ΔK_{th}) OM, MŠ i ZUT na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C [87]. Rezultati ovih ispitivanja su dati u poglavlju pet.

Cilj eksperimentalnih istraživanja prezentiranih u poglavlju pet i merenja deformacijskog i naponskog stanja prezentiranih u poglavlju šest je ocena integriteta i preostalog veka reaktora odnosno predviđanje preostalog veka sa aspekta delovanja eksploatacionih uslova (radna temperatura i radni pritisak). Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza treba da daju praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na ponašanje OM, komponenti zavarenog spoja i same posude pod pritiskom (reaktora) predviđenog za rad na povišenim temperaturama, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, kao i revitalizacije i produženja radnog veka procesne opreme (reaktora) izrađene od čelika za rad na povišenim temperaturama.

Ocena integriteta i procena preostalog veka upotrebe reaktora za opterećenja približno konstantne amplitude, kakva su približno u eksploataciji, odnosno broj ciklusa neophodan za rast prsline od početne a_0 do kritične a_c , izračunava se po formuli 7.5.

Polazni parametri ispitivanja su sledeći:

- ⇒ **Mesto eventualne prsline**, odnosno da li se ona javlja u OM, MŠ ili ZUT.
- ⇒ **Početna prsline a_0** je prsline koja se može detektovati ispitivanjima bez razaranja sa spoljne strane, a koja za predmetni reaktor ne sme da bude prosečno preko dužine 5mm.
- ⇒ **Promena opterećenja u reaktoru**, od najnepovoljnijeg slučaja, odnosno da je radni napon σ blizak naponu tečenja $\sigma_{0,2}$ ispitivanog materijala (211MPa), pa do realnog radnog režima, odnosno do nivoa maksimalnog radnog napona za predmetni reaktor, izmerenog tenzometrijskim merenjima u eksploataciji (46MPa).
- ⇒ **Dužina kritične ili dozvoljene prsline**, koja je menjana od veličine 5mm do veličine kritične dužine prsline a_c dobijene ispitivanjem parametara mehanike loma na proračunskoj temperaturi od 540°C, za novi i eksploatisani OM, MŠ, i ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM.

- ⇒ **Konstante Parisove jednačine C i m** , određene u testu ispitivanja parametara rasta zamorne prsline na proračunskoj temperaturi od 540°C, za novi i eksploatisani OM, MŠ, i ZUT sa strane novog i sa strane eksploatisanog OM.
- ⇒ **Koeficijent Y je geometrijski član**, koji zavisi od odnosa dužine prsline i debljine OM reaktora, i dat je u literaturi [87] za slučaj površinske prsline i za različite odnose a/W .

Rezultati procene preostalog radnog veka reaktora, odnosno broja ciklusa ΔN , znajući da su reaktori u radu konstantno izloženi delovanju promenljivog opterećenja su dati u tab. 7.1 i 7.2 za novi i eksploatisani OM, tab. 7.3 za MŠ, i u tab. 7.4 i 7.5 za ZUT sa strane novog i eksploatisanog OM.

Zavisnost mesta iniciranja prsline od vremena eksploatacije, je prikazan grafički na sl. 7.2 za slučaj prsline u novom OM, sl. 7.3 za slučaj prsline u eksploatisanom OM, sl. 7.4 za slučaj prsline u MŠ, sl. 7.5 za slučaj prsline u ZUT sa strane novog OM, i na sl. 7.6 za slučaj prsline u ZUT sa strane eksploatisanog OM.

Tabela 7.1. Preostali eksploatacioni period-prslina u novom OM

Slučaj opterećenja	Geometrijski član, Y	Opseg dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, MPa	Pretpost. dužina prsline, a , m	Početna dužina prsline, a_0 , mm	Kritična dužina prsline, a_c , mm	Broj ciklusa, ΔN
I	5,58	211	0,01	5	41	160641
	6,01		0,02			46618
	6,45		0,03			20868
	6,91		0,041			10767
II	5,58	46	0,01	5	41	14149448
	6,01		0,02			4106189
	6,45		0,03			1838105
	6,91		0,041			948389

* Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 5mm.

Za slučaj prsline u novom OM: $C = 1,52 \cdot 10^{-10}$, $m = 2,94$

Tabela 7.2. Preostali eksploatacioni period-prslina u eksploatisanom OM

Slučaj opterećenja	Geometrijski član, Y	Opseg dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, MPa	Pretpost. dužina prsline, a , m	Početna dužina prsline, a_0 , mm	Kritična dužina prsline, a_c , mm	Broj ciklusa, ΔN
I	5,58	211	0,01	5	29	20521
	6,01		0,02			9622
	6,21		0,025			7421
	6,41		0,029			6329
II	5,58	46	0,01	5	29	318383
	6,01		0,02			149276
	6,21		0,025			115128
	6,41		0,029			98199

* Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 5mm.

Za slučaj prsline u eksploatisanom OM: $C = 1,48 \cdot 10^{-8}$, $m = 1,80$

Tabela 7.3. Preostali eksploatacioni period-prslina u MŠ

Slučaj opterećenja	Geometrijski član, Y	Opseg dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, MPa	Pretpost. dužina prsline, a, m	Početna dužina prsline, a_0 , mm	Kritična dužina prsline, a_c , mm	Broj ciklusa, ΔN
I	6,01	211	0,02	5	63,5	196096
	6,45		0,03			98731
	6,88		0,04			58520
	7,21		0,05			39320
	7,65		0,06			26957
	7,81		0,0635			23834
II	6,01	46	0,02	5	63,5	8972132
	6,45		0,03			4517323
	6,88		0,04			2677509
	7,21		0,05			1799030
	7,65		0,06			1233369
	7,81		0,0635			1090506

* Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 5mm.

Za slučaj prslina u MŠ: $C = 1,26 \cdot 10^{-9}$, $m = 2,51$

Tabela 7.4. Preostali eksploatacioni period-prslina u ZUT sa strane novog OM

Slučaj opterećenja	Geometrijski član, Y	Opseg dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, MPa	Pretpost. dužina prsline, a, m	Početna dužina prsline, a_0 , mm	Kritična dužina prsline, a_c , mm	Broj ciklusa, ΔN
I	5,58	211	0,01	5	32	70053
	6,01		0,02			24775
	6,45		0,03			12611
	6,51		0,032			11382
II	5,58	46	0,01	5	32	3015732
	6,01		0,02			1066565
	6,45		0,03			542903
	6,51		0,032			489975

* Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 5mm.

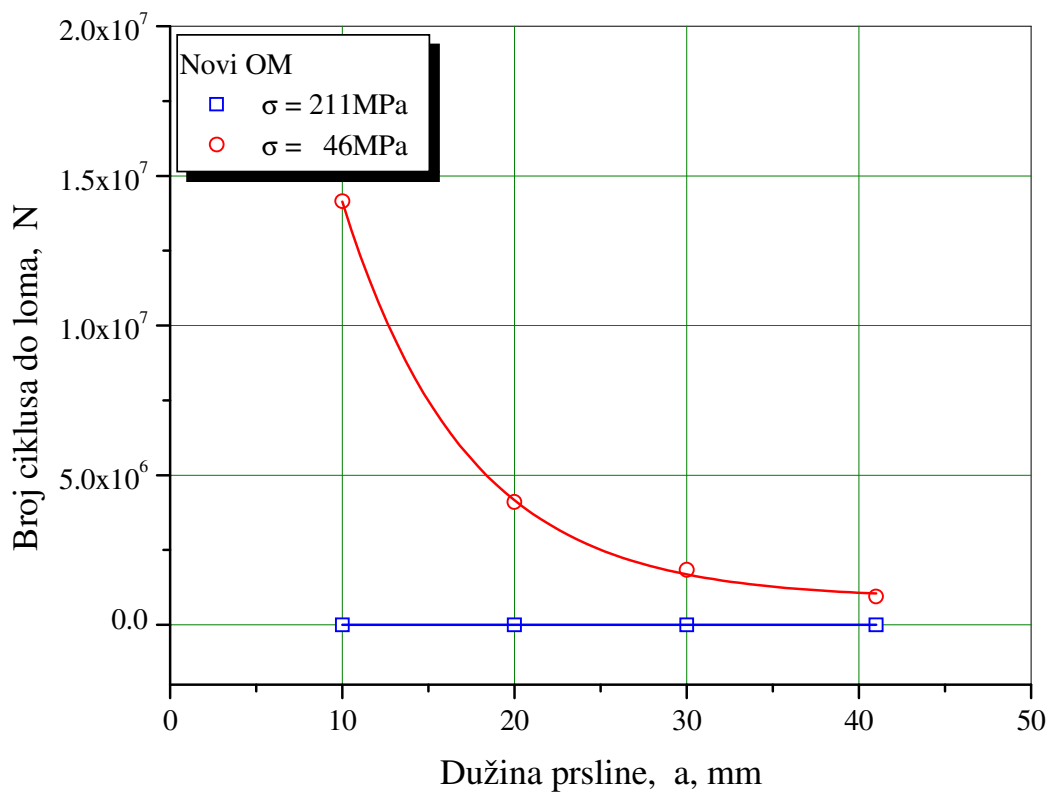
Za slučaj prslina u ZUT sa strane novog OM: $C = 9,61 \cdot 10^{-10}$, a eksponent $m = 2,47$

Tabela 7.5. Preostali eksploatacioni period-prslina u ZUT sa strane eksploatisanog OM

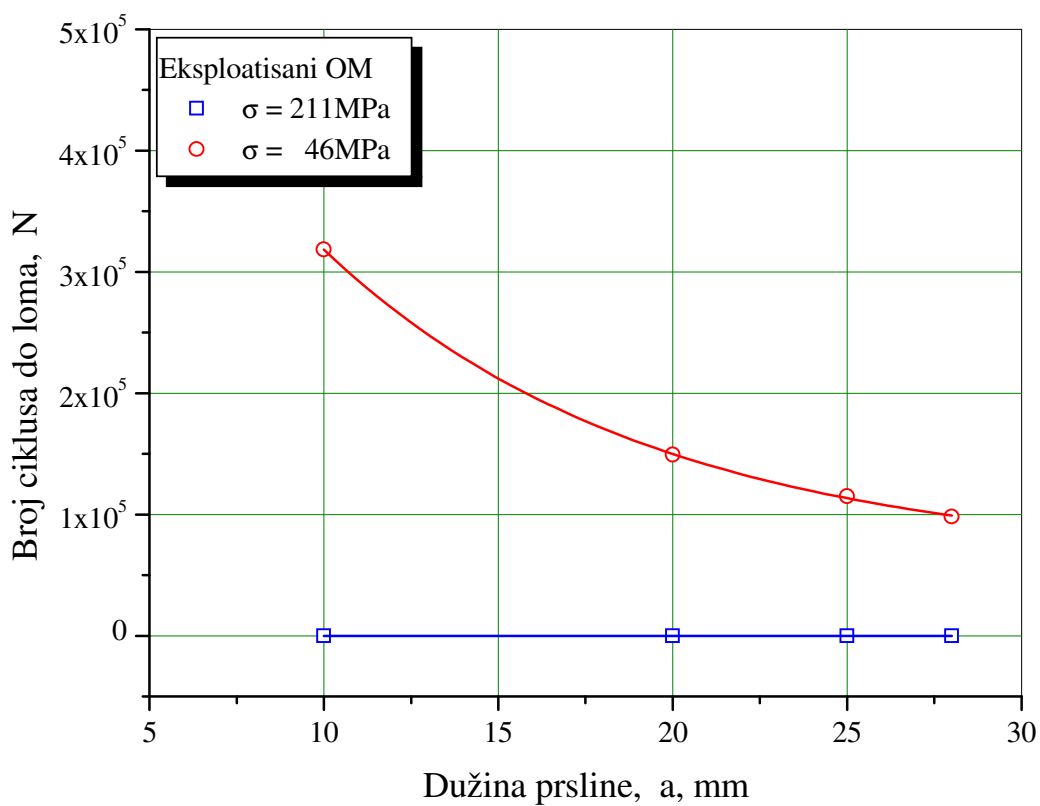
Slučaj opterećenja	Geometrijski član, Y	Opseg dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, MPa	Pretpost. dužina prsline, a, m	Početna dužina prsline, a_0 , mm	Kritična dužina prsline, a_c , mm	Broj ciklusa, ΔN
I	5,58	211	0,01	5	27	17470
	6,01		0,02			6554
	6,21		0,025			4682
	6,39		0,027			4005
II	5,58	46	0,01	5	27	607655
	6,01		0,02			227949
	6,21		0,025			162859
	6,39		0,027			139303

* Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 5 mm.

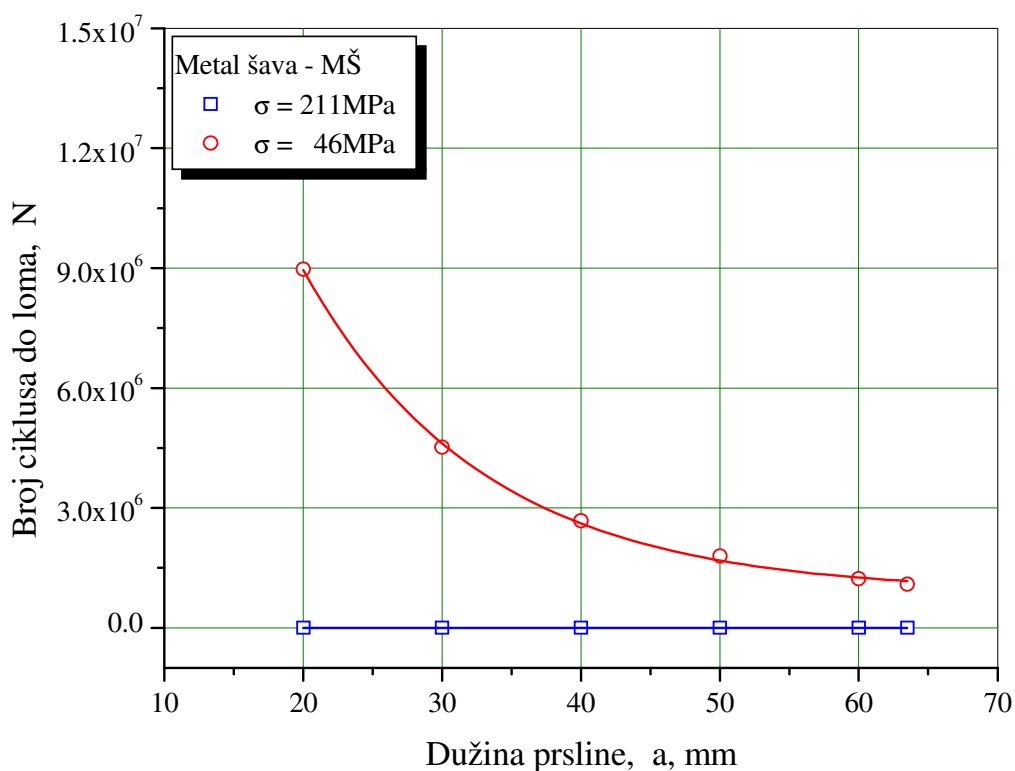
Za slučaj prslina u ZUT sa strane eksploatisanog OM: $C = 5,5 \cdot 10^{-9}$, a eksponent $m = 2,33$



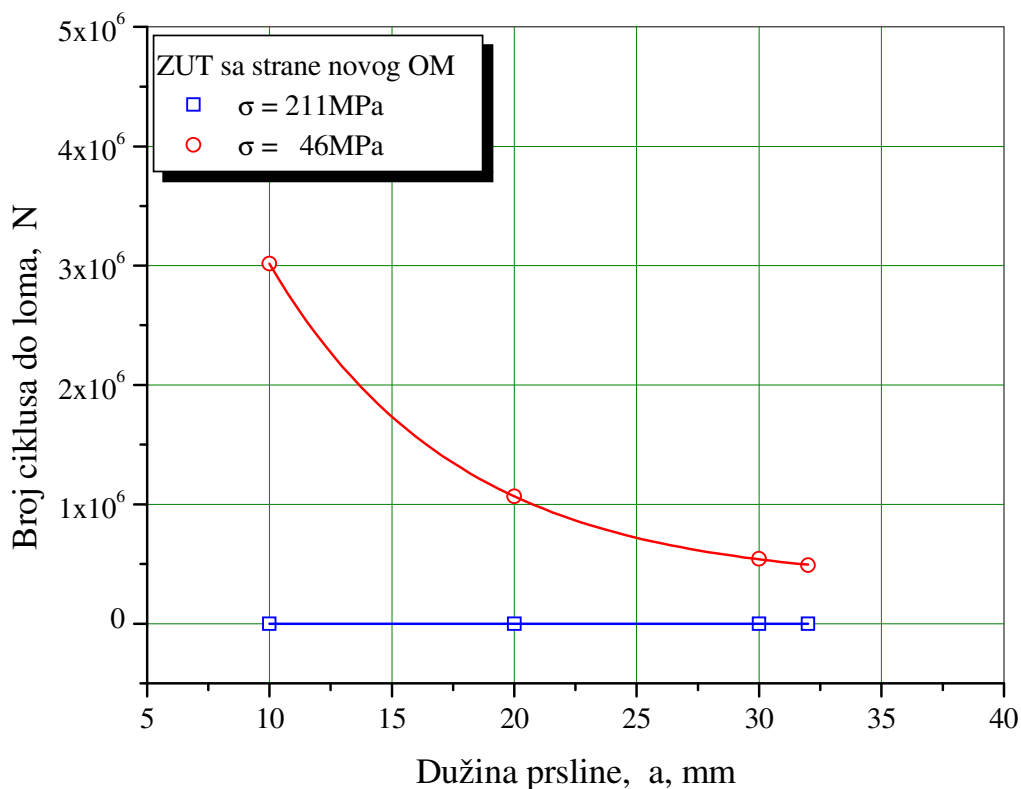
Slika 7.2. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod novog OM



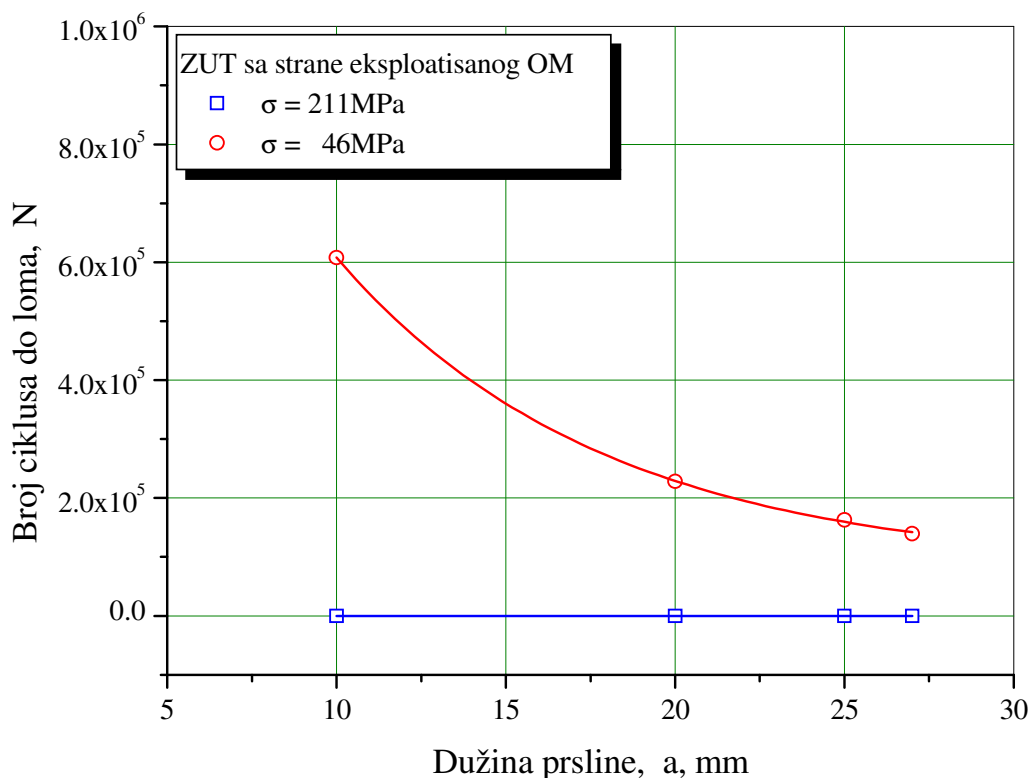
Slika 7.3. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod eksploatisanog OM



Slika 7.4. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod MŠ



Slika 7.5. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT sa strane novog OM



Slika 7.6. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT sa strane eksploatisanog OM

Rezultati prikazani u tab 7.1 do 7.5, i grafički na sl. 7.2 do 7.6, pokazuju da preostali vek reaktora u eksploataciji, odnosno broj ciklusa, ΔN , do postizanja kritične dužine prsline, a_c , zavisi od:

- ⇒ pretpostavljene dužine prsline, a ;
- ⇒ opsega dozvoljenog naprezanja, $\Delta\sigma$, i
- ⇒ mesta inicijacije prsline.

Što je pretpostavljena dužina prsline i opseg dozvoljenog naprezanja veći, broj ciklusa do eventualne havarije i nekontrolisanog loma je manji. Pri pretpostavljenom radnom opterećenju (naponu) koje je jednako naponu tečenja za dati materijal u radnim uslovima ($R_{p0.2} = 211\text{MPa}$), broj ciklusa potreban da se postigne kritična dužina prsline je vrlo mali, tab. 7.1 do 7.5. Ovako mali broj ciklusa je očekivan, imajući na umu da se radi o niskocikličnom zamoru, odnosno delovanju opterećenja bliskom naponu tečenja.

U slučaju kada je pretpostavljeno radno opterećenje (napon) realno, odnosno opterećenje koje je određeno primenom tenzometrijske metode na reaktoru i iznosi 46MPa, broj ciklusa potreban da se postigne kritična dužina prsline je višestruko veći, jer je nivo napona niži. Međutim, iako je nivo napona niži, on je ipak veći od nivoa napona pri pragu zamora, ΔK_{th} , tako da do rasta pretpostavljene prsline u svakom slučaju dolazi.

Dalje, u analizi smo uzeli u obzir i mesto eventualne prsline, odnosno da li se ona javlja u OM, MŠ ili ZUT. Takođe, analiziran je uticaj vremena eksploatacije, odnosno da li se eventualna prsline javlja u novom ili eksploatisanom OM, ZUT sa strane novog OM ili eksploatisanog OM. Uticaj heterogenosti strukture komponenti zavarenog spoja direktno se

reflektuje na brzinu rasta zamorne prsline da/dN , odnosno u direktnoj je vezi sa određenim parametrima Parisove jednačine, koeficijentom C i eksponentom m .

Iz tab. 7.1 do 7.5, odnosno dijagrama datih na sl. 7.2 do 7.6 a za slučaj stvarnog opterećenja od 46MPa, je vidljivo:

- ⇒ Za slučaj da inicijalna prslina dužine 5mm u novom OM dostigne kritičnu dužinu od 41mm, potreban je eksploatacioni period od 25,7 godina, a da inicijalna prslina iste dužine u eksploatisanom OM, dostigne kritičnu dužinu od 29mm, potreban je eksploatacioni period od 4,6 godina.
- ⇒ Za slučaj da inicijalna prslina dužine 5mm u MŠ dostigne kritičnu dužinu od 63,5mm, potreban je eksploatacioni period od 29,6 godina.
- ⇒ Za slučaj da inicijalna prslina dužine 5mm u ZUT sa strane novog OM dostigne kritičnu dužinu od 32mm, potreban je eksploatacioni period od 21,4 godinu, a da inicijalna prslina iste dužine u ZUT sa strane eksploatisanog OM, takođe dostigne kritičnu dužinu od 27mm, potreban je eksploatacioni period od 4,1 godina.

Kako se sigurnost konstrukcije ocenjuje prema njenoj najslabijoj komponenti, može se konstatovati da za slučaj realnog opterećenja od 46MPa, a za slučaj da inicijalna prslina od 5mm dostigne kritičnu dužinu prsline od 27mm, u ZUT sa strane eksploatisanog OM, potreban je eksploatacioni period od najmanje 4,1 godina rada. Ovakav zaključak podrazumeva permanentnu kontrolu tehnološkog procesa rada reaktora, IBR kontrolu svih kritičnih mesta na reaktoru, uključujući i OM.

Važan segment u fazi kontrole reaktora je i hladna vodena proba (HVP). U većini slučajeva, kako je to i potvrđeno u praksi [88], HVP dovodi do inicijacije prsline u kritičnim zonama, kao što je ZUT, te je neophodno u daljnjoj eksploataciji obavezno smanjiti ispitni pritisak.

Ispitni pritisak reaktora, koji sada iznosi 108bar, trebalo bi usaglasiti sa najnovijim propisima sadržanim u ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII "Rules for Construction of Pressure Vessels-Division 1" [89]. Ispitni pritisak se izračunava prema formuli:

$$p_i = 1,3 \cdot p_r \left(\frac{\sigma_{max.20}}{\sigma_{max.pr}} \right) \quad (7.6)$$

gde je:

p_i - ispitni pritisak, bar

p_r - radni pritisak, bar

$\sigma_{max.20}$ - maksimalno dozvoljeni napon, na sobnoj temperaturi, MPa

$\sigma_{max.pr}$ - maksimalno dozvoljeni napon na proračunskoj temperaturi od 537°C, MPa

Za proračun ispitnog pritiska kod reaktora korišćeni su sledeći podaci:

$p_r = 26,3\text{bar}$ (tab. 6.2)

$\sigma_{max.20} = 120\text{MPa}$ (podaci iz dokumentacije reaktora)

$\sigma_{max.pr} = 50\text{MPa}$ (podaci iz dokumentacije reaktora)

Koristeći formulu 7.6, dobijamo vrednost ispitnog pritiska od 82,1bar.

Prema tome, da bi izbegli neželjene posledice, odnosno mogućnost iniciranja prsline u toku HVP, neophodno je smanjiti ispitni pritisak i usaglasiti sa najnovijim ASME normama.

8. ZAKLJUČAK

Istraživanja prikazana u radu su imala za cilj da se utvrdi kako eksploatacioni uslovi utiču na mehaničko-eksploatacione osobine OM i komponenti zavarenog spoja legiranog čelika namenjenog za izradu (posuda pod pritiskom) reaktora i da se definiše procedura kojom se može izvršiti procena integriteta i preostalog veka korišćenja posuda pod pritiskom (reaktora).

Na osnovu urađenih eksperimentalnih ispitivanja, obavljene analize i diskusije može se zaključiti sledeće:

- ⇒ Ispitivanjem epruveta zavarenog spoja uvođenjem opterećenja poprečno na zavareni spoj dobijeni su neophodni podaci kako izabrana tehnologija zavarivanja i vreme eksploatacije utiču na čvrstoću zavarenog spoja, kao i komponente zavarenog spoja. Dobijeni rezultati ispitivanja ukazuju na to da su sve ispitivane epruvete pukle u eksploatisanom OM. Ovaj podatak je vrlo bitan, jer ukazuje na slabljenje OM koji je bio u eksploataciji. Rezultati poprečnog zatezanja epruveta zavarenog spoja ukazuju da sa povećanjem temperature ispitivanja dolazi do smanjenja vrednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće, a povećanja izduženja.
- ⇒ Rezultati ispitivanja epruveta izvađenih iz zavarenih limova savijanjem, ukazuju na kvalitetno izvedeno zavarivanje, jer pri dostizanju ugla savijanja od 180° nije došlo do pojave prslina. Na osnovu rezultata ispitivanja i njihove analize možemo zaključiti da je izabrana tehnologija zavarivanja dobra i da su svi rezultati ispitivanja dostavljenog uzorka zadovoljavajući.
- ⇒ Promena tvrdoće komponenti zavarenog spoja odgovara promeni zateznih osobina. Merenjem tvrdoće zavarenog spoja po preseku konstatovan je uticaj vremena eksploatacije na pad vrednosti tvrdoće, kao i to da vreme eksploatacije podjednako ima uticaja na slabljenje i OM i ZUT.
- ⇒ Mikrostrukturna ispitivanja pokazuju da oba osnovna metala imaju ravnomernu strukturu, koja pored svetlih poligonalnih kristala ferita, sadrži i transformisane oblasti čiji detalji mogu biti analizirani pri većim povećanjima. Razlika između novog i eksploatisanog OM je u veličini zrna. Novougrađeni osnovni metal ima strukturu sa veličinom zrna 5 prema ASTM skali, dok eksploatisani materijal ima strukturu sa veličinom zrna 3 prema ASTM skali. Veća povećanja (500x i više) su omogućila da se otkriju razlike u strukturnim karakteristikama eksploatisanog i novog OM. Naime, period eksploatacije od blizu 40 godina je uticao na značajno prisustvo karbida na granicama i unutar zrna. Količina karbida u novom OM značajno je manja i karbidi su sitniji. Količina izdvojenih karbida po granici zrna, ali

i unutar samog zrna, je posebno značajna kod ponašanja OM u uslovima delovanja promenljivog opterećenja.

- ⇒ Mikrostruktura u zoni uticaja toplote sa strane eksploatisanog i novog OM se sastoji od ferita, beinita i perlita. Beinit, u zoni uticaja toplote, nastaje kao posledica veće brzine hlađenja dela osnovnog metala koji je u toku zavarivanja bio zagrejan na temperaturu austenitizacije. Sadržaj beinita opada sa porastom rastojanja od linije spoja.
- ⇒ Struktura metala šava pokazuje prisustvo krupnih dendrita nastalih kao posledica veličine livačkog kupatila zbog dimenzija zavarenih ploča.
- ⇒ Ukupna energija udara zavisi od mesta urezivanja zarez, temperature ispitivanja i vremena eksploatacije. Najveću vrednost ukupne energije udara A_{uk} , imaju epruvete sa zarezom u OM, nešto nižu vrednost imaju epruvete sa zarezom u MŠ, a najmanju vrednost ukupne energije udara imaju epruvete sa zarezom u ZUT. Primarni uticaj na vrednosti ukupne energije udara, kao i na komponente, energiju stvaranja prsline i energiju širenja prsline, ima temperatura ispitivanja, jer je ona usko povezana sa plastičnim osobinama ispitivanog materijala. Ukupna energija udara opada sa povećanjem temperature, a uticaj temperature ispitivanja je najveći kod epruveta sa V-zarezom u zoni uticaja toplote (ZUT), jer je heterogenost strukture ovde najveća. Vreme eksploatacije dodatno smanjuje ukupnu energiju udara kod epruveta sa zarezom u eksploatisanom OM, kao i kod epruveta sa zarezom u ZUT sa strane eksploatisanog OM. Ovu pojavu možemo kao i kod zateznih ispitivanja dovesti u vezu sa strukturnim promenama u materijalu uzrokovanim vremenom eksploatacije.

Heterogenost mehaničkih svojstava komponenti zavarenog spoja se jasno vidi kroz dobijene vrednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} :

- ⇒ Vrednosti K_{Ic} zavise od temperature ispitivanja, mesta postavljanja zarez, i vremena eksploatacije. Karakter krivih se isključivo menja u zavisnosti od ova tri parametra. Najslabija otpornost prema razvoju prsline, odnosno, najmanja vrednost K_{Ic} , je kod epruveta sa zarezom u ZUT, a najbolja otpornost prema razvoju prsline je kod epruveta sa zarezom MŠ.
- ⇒ Vreme eksploatacije je značajno uticalo na otpornost prema razvoju prsline, što generalno treba dovesti u vezu sa slabljenjem mehaničko-eksploatacionih osobina korišćenog materijala u odnosu na novi materijal. Vidimo da period eksploatacije od 40 godina ima uticaja na vrednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} , i ona kod eksploatisanog OM, i kod ZUT sa strane eksploatisanog OM opada.
- ⇒ Temperatura ispitivanja primarno utiče na vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic} . Sa povećanjem temperature opada žilavost loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} , i dostiže minimalnu vrednost kod uzoraka sa vrhom prsline u ZUT sa strane eksploatisanog materijala.

Za eksploatacionu sigurnost konstrukcija procesne opreme najznačajnije su karakteristike koje opisuju pojavu i rast prsline pod uticajem promenljivog opterećenja. To su pre svega trajna dinamička čvrstoća i parametri rasta zamorne prsline. Vreme eksploatacije i temperatura ispitivanja utiču na ponašanje OM i komponenti zavarenog spoja u prisustvu greške tipa prsline i u uslovima delovanja promenljivog opterećenja:

- ⇒ Vreme eksploatacije i uslovi radne temperature dovode do smanjenja vrednosti trajne dinamičke čvrstoće, odnosno sklonost ka krtom lomu se povećava. Eksploatacioni period od približno 40 godina doveo je do smanjenja vrednosti trajne dinamičke čvrstoće kod epruveta zavarenog spoja, odnosno eksploatisanog OM za oko 19%, što može da bude veoma značajan podatak ako se znaju uslovi rada reaktora.

- ⇒ Dobijene vrednosti praga zamora ΔK_{th} , i brzine rasta zamorne prsline da/dN , su u direktnoj vezi sa položajem vrha zamorne prsline i sa uslovima eksploatacije, odnosno, temperature radnog režima i vremena eksploatacije. Najveću vrednost praga zamora ΔK_{th} imaju epruvete sa zarezom u MŠ.
- ⇒ Najbolju otpornost na propagaciju prsline imaju uzorci sa prslinom u OM. Očito je da sitnozrnija feritno-perlitna struktura koja se nalazi dominantno u OM uslovljava i bolju otpornost na aktiviranje prisutne prsline, što se ogleda kroz manju vrednost brzine rasta zamorne prsline da/dN . Najlošiju otpornost na propagaciju prsline odnosno najveću brzinu rasta zamorne prsline da/dN imaju uzorci sa prslinom u ZUT. Brzina rasta zamorne prsline da/dN je znatno veća kod ZUT sa strane eksploatisanog OM u odnosu na novi OM.
- ⇒ Vreme eksploatacije dodatno pogoršava karakteristike rasta zamorne prsline. Brzina rasta zamorne prsline se povećava oko 5,3 puta kod eksploatisanog materijala u odnosu na novi materijal. Ovo povećanje brzine rasta zamorne prsline da/dN je direktno povezano sa strukturnim promenama koje se javljaju kod eksploatisanog materijala u odnosu na novi materijal. Što se tiče ispitivanja na povišenoj temperaturi, ona pokazuju sličnu tendenciju kao i kod ispitivanja na sobnoj temperaturi, samo što je brzina rasta zamorne prsline da/dN u ovom slučaju oko 7,7 puta veća u zavisnosti od mesta vrha zamorne prsline.

Merenje deformacijskog i naponskog stanja reaktora u eksploataciji podrazumevalo je primenu tenzometrijske metode (merne trake). Na osnovu izvršenih ispitivanja na reaktoru i urađene analize, može se zaključiti sledeće:

- ⇒ Urađena merenja na reaktoru su pokazala da u toku eksploatacije postoje određene ciklične promene opterećenja.
- ⇒ U slučaju da dođe do inicijacije prsline, preostali eksploatacioni period zavisi od nivoa eksploatacionog opterećenja i mesta inicijacije prsline.

Sva ova ispitivanja su imala cilj da daju odgovore na pitanja data u hipotezi ove disertacije, a to je:

- ⇒ Da dugogodišnji eksploatacioni period reaktora i pored evedentnog slabljenja mehaničko-eksploatacijskih osobina nije ugrozio strukturni integritet samoga reaktora, i
- ⇒ Da je na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja definisana procedura kojom se može izvršiti procena integriteta i preostalog veka korišćenja posuda pod pritiskom (reaktora), a koja se grubo može predstaviti kroz sledeće faze:
 1. Mehaničko-eksploatacijska ispitivanja osnovnog materijala (OM), komponenti zavarenog spoja (MŠ i ZUT), kao i samog zavarenog spoja.
 2. Određivanje deformacijskog i naponskog stanja na posudi pod pritiskom (reaktoru) u toku eksploatacije (merenje promena deformacije i napona, odnosno određivanje $\Delta\varepsilon$ i $\Delta\sigma$), kao i merenje promena pritiska i temperature u toku eksploatacije, odnosno određivanje Δp i ΔT .
 3. Sveobuhvatno davanje procene integriteta i preostalog veka korišćenja posude pod pritiskom predviđene za rad na povišenim temperaturama (reaktora).

Primenjujući parametre mehanike loma u oceni integriteta i preostalog veka posude pod pritiskom, možemo konstatovati da je prihvatljiva primena i linearno-elastične, kao i elasto-plastične mehanike loma. Kako se u konkretnom slučaju radi o duktilnom materijalu, kod koga ne možemo da zanemarimo njegovu plastičnost, u zavisnosti od oblika plastičnog

tečenja primenjuju se različite varijante elasto-plastične mehanike loma (EPML). Dijagram analize loma (Failure Assessment Diagramme-FAD) se pokazao kao najprihvatljivija varijanta EPML za ocenu integriteta posude pod pritiskom (reaktora). FAD dijagram predstavlja graničnu krivu koja se dobija na osnovu modifikovanog modela trake tečenja za prolaznu prslinu u beskonačnoj ploči.

Dobijeni rezultati ispitivanja predstavljaju praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom (reaktora) namenjenih za rad na povišenim temperaturama.

Pravac daljih istraživanja trebalo bi da bude u dopuni procedure ocene integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom korišćenjem numeričkih metoda proračuna. Metodom konačnih elemenata (MKE) moguće je definisati kritična mesta u eksploataciji, odnosno izvršiti proračun statičkog, dinamičkog i termičkog ponašanja posude pod pritiskom (reaktora).

LITERATURA

- [1] JUS C.T3.010/95 "Tehnički uslovi za zavarene spojeve izvedene topljenjem na čeliku-Nivoi kvaliteta", Službeni list SRJ br. 25/95, 1995.
- [2] VOLČENKO, V.N., IAMPOLJSKI, V.M., VINOKUROV, V.A., FROLOV, V.V., "Teoria svaročniih procesov, Višaia škola, Moskva, 1988."
- [3] KASATKIN B.S., KOZLOVEC, O.N., "Mikrostruktura i svoistva svareniih soedinenii nizkolegirovaniih stalei", Avtomatičkaia svarka, No. 7, 1989.
- [4] "Classification of Microstructures in Low C, Low Alloy Steel Weld Metal and Terminology", MIZ, IX-1282-83.
- [5] "Weld Metal Microstructures", A State-of-the Art review.
- [6] JUS ISO 5817, "Elektrolučno zavarivanje čelika-Kriterijumi prihvatljivosti grešaka zavarenih spojeva (Identičan sa ISO 5817/1992)", Službeni list SRJ br. 25/95, 1995.
- [7] DOKUMENTI MIZ, "Radiografska ispitivanja, Katalog referentnih dijagrama", 2001.
- [8] JUS C.T3.020, "Zavarivanje, klasifikacija grešaka u zavarenim spojevima izvedenim topljenjem metala (Identičan sa ISO 6520/1982)", Službeni list SFRJ br. 29/82, 1982.
- [9] HRIVNJAK, I., "Zavaritelnost oceli", Alfa Vydav., Techn. Ekonom. Liter., Bratislava, 1979.
- [10] RADOVIĆ, A., "Metalurški i tehnološki problemi zavarljivosti", Međunarodno savetovanje-Zavarivost materijala i metode ispitivanja, Vranje, 1985.
- [11] BROHL, F., MESCH, H., "Welding of Alloyed Ferritic and Martensitic Steels in Piping Systems for High-temperature Service", Mannesmann, Düsseldorf, 1986.
- [12] LIVŠIĆ, L.S., HAKIMOV A.N., "Metallovedenie svarki i termičeskaja obrabotka svarnih soedinenii", Mašinostroenie, Moskva, 1979.
- [13] SEDMAK, A., Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija, Monografija, Mašinski fakultet Beograd, 2003.
- [14] IRWIN, G. R., Fracture, Handbuch der Physik VI, Springer-Verlag, 1958.
- [15] BURZIĆ, Z., BURZIĆ, M., Application of modern technologies in the destructive metal materials testing, Journal of Metallurgy, Vol. 11, No. 2, p.127-141, 2005.
- [16] ČULAFIĆ, V.B., Uvod u mehaniku loma, Mašinski fakultet Podgorica, 1999.
- [17] ANDERSON, T.L., Fracture Mechanics-Fundamentals and applications, CRC Press, USA, 1994.
- [18] BURZIĆ, Z., Teorijske i Esperimentalne osnove Mehanike loma, radni materijal-predavanja, Tehnički fakultet Bihać, 2003.
- [19] HARRIS, Jr, J. A., Engine component retirement for cause, Vol. 1, Executive Summary, AFWAL-TR-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1987.
- [20] IRWIN, G.R., Plastic zone near a crack and fracture toughness, Proc. 7th Sagamore

- Research Conference on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material. Vol. 4, p. 463-478, 1960.
- [21] WELLS, A.A., Application of fracture mechanics at and beyond general yielding, British Welding Journal 11, p. 563-570, 1963.
- [22] KRAFT, J.R., A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, p. 379-386, 1968.
- [23] SEDMAK, S., Uticaj zareza i prslina na pojavu loma pri elastičnoj i plastičnoj deformaciji, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
- [24] GRIFFITH, A. A., The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Trans R. Soc, London 1920, Vol. A221, str. 163.
- [25] PEROVIĆ, Z., Zavarene konstrukcije, Univerzitet Crne Gore, Štamparija OBOD Cetinje, Podgorica 2002.
- [26] ASTM E399-89, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. p. 522. 1986.
- [27] BS 5762-DD 19, Standard Test Method for Crack Opening Displacement, London, 1976.
- [28] ASTM E813-89, Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. p. 651, 1993.
- [29] ASTM E1152-91, Standard Test Method for Determining J-R Curve, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. p. 724, 1995.
- [30] ASTM E 1290-89, Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, 1993.
- [31] ASTM E 1737-96, Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01., 1996.
- [32] ASTM E 1820-99a, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, 1999.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] SRPS C.A4.083, Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanici loma, 1993.
- [36] SRPS C.A4.084, Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{IC}), 1993.
- [37] RADOVIĆ, A., Mogućnosti korišćenja kriterijuma mehanike loma u oceni sigurnosti zavarenih spojeva, Letnja škola mehanike loma-Mehanika loma zavarenih spojeva, Arandelovac, str. 15-43, 1984.
- [38] SEDMAK, A., BURZIĆ Z., Izveštaj o kvalifikaciji tehnologije reparaturnog zavarivanja reaktora DC-301, Mašinski fakultet Beograd, 1999.
- [39] BURZIĆ, Z., SEDMAK, S., MANJGO, M., Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva, Integritet i Vek Konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.
- [40] SEDMAK, S., Istraživanje uticaja količine zavarivanjem unete toplote na promene u ZUT kompleksno legiranih čelika visoke čvrstoće, Naučnoistraživački projekt Fabrike vagona Kraljevo i Osnovne zajednice nauka regiona Kraljevo-Čačak, TMF, Beograd, 1980-1981.
- [41] BROWN, W.F., Srawley, J.E., Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength

- Metallic Materials, Special Technical Publication STP 410, Philadelphia, 1969.
- [42] BURZIĆ, Z., Savremene metode provere mehaničko-tehnoloških osobina zavarenih spojeva-Deo 2, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 47, No. 3, str. 151-158, 2002.
- [43] AWS B4.0M:2000, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, American National Standards Institute (ANSI), July 25, 2000.
- [44] MILLER, K.J., O'DONNELL, W.J., The fatigue limit and its elimination, Fatigue Fracture Engineering Materials Structures, Vol. 22, p. 545-557, 1999.
- [45] PARIS, P.C., ERDOGAN, F., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [46] PARIS, P.C., SIH, G.C., Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and Application, STP 381, p. 30-83.
- [47] BURZIĆ, Z., Ispitivanje promenljivim opterećenjem glatkih i zarezanih epruveta, 7. Tematski zbornik radova, Eksperimentalne i numeričke metode u oceni integriteta konstrukcije, V. Plana, str. 75-92, 1997.
- [48] RADON, J.C., Determination of Threshold Stress Intensties, Fatigue of Low Alloy Steel BS4360-50D, Int. J. Fatigue, p. 225, 1982.
- [49] WALKER, E.K., An Effective Strain Concept for Crack Propagation and Fatigue With Specific Application to Biaxial Stress Fatigue, AFFDL-TR-70-144, p. 225-233, 1970.
- [50] FORMAN, R.G., KEARNEY, V.E., ENGLE, R.M., Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures, Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol.89, No.3, p. 459, 1997.
- [51] KLESNIL, M., LUKAS, P., Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, p. 77-92, 1972.
- [52] SCHWALBE K. H., Bruchmechanik metalischer Werkstoffe, Carl Hauser Verlag, Munchen, 1980.
- [53] WESTERGARD, H.M., Bearing Pressures and Crack, Yournal of Applied Mechanics, Vol. 6, p. 49-53, 1939.
- [54] EN 895, Sučeono zavareni spojevi na metalnim materijalima-ispitivanje poprečnim zatezanjem (Welded butt joints in metallic materials-Transverse tensile test), 1995.
- [55] SRPS EN 10002-1, Mehanička ispitivanja metala-zatezna ispitivanja, Deo 1, Termini i definicije, 1999.
- [56] ASTM E8-01, Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, p. 196, 2001.
- [57] EN 1043, Destructive tests on welds in metallic materials-Hardness test Part 2, Micro hardness testing on welded joints, 1996.
- [58] SRPS EN 10045-1, Mehanička ispitivanja metala, Ispitivanje udarom po Šarpiju, Deo 1, Termini i definicije, 1993.
- [59] ASTM E 23-02, Standard Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, 2002.
- [60] EN 875, Welded butt joints in metallic materials-Specimen, location and notch orientation for impact test, 1995.

- [61] KUDRIN, V., *Steelmaking*, Mir Publishers, 1989, p. 11-12.
- [62] SPIES, F. A., *Instrumentierter Kerbschlageversuch, Nekonvencionalno preizkušanje materialov*, Ravne-Mežica, p. 2-11, 1989.
- [63] IVICA ČAMAGIĆ, *Analiza napona i deformacija zavarenih spojeva niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u prisustvu prslina*, magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, 2009.
- [64] Aleksandar Sedmak, Vera Šijački-Žeravčić, Vitomir Đorđević, Anđelka Milosavljević, Miomir Vukićević, *Mašinski materijali, drugi deo*, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [65] EN 910, *Welded butt joints in metallic materials-Bend test*, 1993.
- [66] 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.
- [67] ASTM E467-89, "Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Loads in an Axial Load Fatigue Testing Machine", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, p. 577, 1989.
- [68] ASTM E468-89, "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, p. 582, 1989.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] EN 10002-5, *Tensile testing of metallic materials. Method of test at elevated temperatures*, 1991.
- [72] BURZIĆ, Z., "Savremene metode provere mehaničko-tehnoloških osobina zavarenih spojeva-Deo 2", *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, Vol. 47, No. 3, str. 151-158, 2002.
- [73] "Classification of Microstructures in Low C, Low Alloy Steel Weld Metal and Terminology", *MIZ*, IX-1282-83.
- [74] METALS HANDBOOK, "Metallography", Vol. 6, ASM International, p. 1124, 1998.
- [75] "Weld Metal Microstructures", *A State-of-the Art review*.
- [76] KASATKIN B.S., KOZLOVEC, O.N., "Mikrostruktura i svojstva svarenih soedinienii nizkolegirovanih stalei", *Avtomatičkaia svarka*, No. 7, 1989.
- [77] "ESIS Procedure for Determining the Fracture Behavior of Materials", *European Structural Integrity Society ESIS P2-92*, 1992.
- [78] BURZIĆ, M., BURZIĆ, Z., KURAI, J., "Fatigue Behaviour of Alloyed Steel for High Temperature", *First Serbian (26th YU) Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Kopaonik, Serbia, p. 1085-1090, 2007.
- [79] BURZIĆ, M., KUTIN, M., GRUJIĆ, B., ADAMOVIĆ, Ž., "Safe Operation of Welded Structure with Cracks at Elevated Temperature", *Journal of Mechanical Engineering*, in press, 2008.

- [80] BURZIĆ, M., ALEKSIĆ, B., "Merenje deformacijskog i naponskog stanja na reaktoru DC-303 u eksploataciji", Izveštaj br. 23-125/2006, CertLab, Pančevo, 2006.
- [81] "Katalog mernih traka VISHAY", SAD, 2006.
- [82] "Uputstvo za rukovanje mernim uređajem UPM 40", HOTTINGER, 1987.
- [83] MANESKI, T., ČUKIĆ, R., "Analiza naponskog stanja reaktora DC-303-NIS RN Pančevo", Izveštaj br. 1-12/2000, Mašinski fakultet Beograd, 2000.
- [84] BURZIĆ, Z., BURZIĆ, M., SEDMAK, A., "Tenzometrijska merenja na reaktorima DC-301 do DC-304", Izveštaj Mašinskog fakulteta, 2000.
- [85] PEROVIĆ, Z., "Zamor mašinskih djelova i konstrukcija", Univerzitet Crne Gore, Podgorica, 2006.
- [86] DOBI, Đ., "Žilavosna proba i mehanika loma", Četvrta letnja škola mehanike loma, Perspektive razvoja mehanike loma Dubrovnik, str. 367-374, 1986.
- [87] BURZIĆ, M., "Analiza parametara prsline toplootpornog čelika", Integritet i vek konstrukcija, Vol. 6, No. 1, str. 45-56, 2008.
- [88] MANESKI, T., MILOŠEVIĆ-MITIĆ, V., OSTRIC, D., "Postavke čvrstoće konstrukcija", Mašinski fakultet u Beogradu, 2002.
- [89] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII "Rules for Construction of Pressure Vessels - Division 1", 2003.

CURRICULUM VITAE

Mr Ivica R. Čamagić, dipl. inž. maš.

Kućna adresa: Nikole Pašića 35, 18420 Blace

Adresa na poslu: Fakultet tehničkih nauka, Kneza Miloša 7,
38220 Kosovska Mitrovica

e-mail: icamagic@verat.net, ivica.camagic@pr.ac.rs

Datum i mesto rođenja:

- 29.08.1974. god, Prokuplje, Srbija

Obrazovanje:

- 1981-1989. Osnovna škola u Blacu, prosečna ocena 5,00.
- 1989-1993. Gimnazija, prirodno-matematički smer, obrazovni profil saradnik u prirodnim naukama, prosečna ocena 5,00.
- 1993-1999. Mašinski fakultet Univerziteta u Prištini, smer Mašinske konstrukcije i mehanizacija, prosečna ocena 8,54.
- 27.09.1999. Odbranjen diplomski rad na Mašinskom fakultetu u Prištini, sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, pod naslovom "Konstruisanje posude pod pritiskom osnovnih karakteristika DN2500 NP15 NT150" sa ocenom 10.
- 1999. Upisane poslediplomske studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu na Katedri za tehnologiju materijala, smer Mašinski materijali i zavarivanje gde su i položeni svi ispiti do 2001.
- 30.10.2009. Odbranjena magistarska teza na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici pod naslovom "Analiza napona i deformacija zavarenih spojeva niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u prisustvu prslina".
- 26.05.2010. Usvojen izveštaj Komisije za ocenu naučne zasnovanosti predložene teme doktorske disertacije pod naslovom "Istraživanje uticaja eksploatacionih uslova na procenu integriteta i preostalog veka posuda pod pritiskom namenjenih za rad na povišenim temperaturama" i podobnosti kandidata i za mentora određen dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Radno iskustvo:

- od 01.10.2002. Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, asistent na Katedri za termotehniku, termoenergetiku, mašinske konstrukcije i mehanizaciju.

Članstva u naučnim i stručnim organizacijama:

- Član Društva za integritet i vek konstrukcija (DIVK),
- Član ESIS-European Structural Integrity Society,
- Član Srpskog društva za mehaniku.

Naučno-istraživačka i stručna aktivnost se odnosi na:

- ispitivanja materijala i konstrukcija sa aspekta zamora i mehanike loma,
 - mehaničko metalurška ispitivanja materijala i konstrukcija,
 - kvalifikacije tehnologije zavarivanja i ispitivanje zavarenih konstrukcija,
 - uvođenje i ispitivanje savremenih materijala,
-

- primenu aktivnih IBR metoda (akustična emisija i tenzometrija) u ispitivanju materijala i konstrukcija (pre svega posuda pod pritiskom),
- fraktografiju i ispitivanje uzroka loma različitih materijala.

Učešće na projektima

- 31.05.2000.-01.12.2001. istraživač-stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju, naučnoistraživačka organizacija Institut Goša Holding Korporacije, Beograd, projekat "Osvajanje sistema grejanja i hlađenja putničkih vagona primenom termodinamičkih poluprovodnika", EV.BR.I.5.1837.
- 01.01.2003.-31.12.2005. istraživač Ministarstva nauke i zaštite životne sredine na projektu iz programa osnovnih istraživanja, "Mehanika loma i oštećenja (MLO)", EV.BR. 1793, rukovodilac projekta dr Jovo Jarić, Matematički fakultet, Beograd.
- 01.01.2006-31.12.2010. istraživač Ministarstva nauke i zaštite životne sredine na projektu iz programa osnovnih istraživanja, "Savremene strategije rešavanja komunalnih problema u većim gradovima i oblastima sa većom gustinom naseljenosti", EV.BR. 149066G, rukovodilac projekta dr Slavica Cvetković, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica.

Jezici:

- English-čitam.
- Russian-čitam i govorim.

Naučno-stručni radovi:

Rad u međunarodnom časopisu M23

- **Analysis of the Influence of Microstructure Heterogeneity and Mechanical Properties of Welded Joint Constituents on Fracture Toughness for Plane Strain, K_{Ic} , Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, Zijah Burzić, Aleksandar Sedmak, Key Engineering Materials Vols. 488-489 (2012), pp. 617-620 © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.488-489.617, Selected, peer reviewed papers from the 10th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (FDM 2011), 19-21 September, 2011, Dubrovnik, Croatia (Z. Tonković and M.H. Aliabadi).**
- **Influence of Testing Temperature and Crack Positioning on Behaviour of Welded Joint Submitted to Impact Load, Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, Zijah Burzić, Džafer Kudumović, Tamara Gvozdrenović, Predrag Pravdić, TECHNICS TECHNOLOGIES EDUCATION MANAGEMENT, ISSN 1840-1503, Impact Factor 0,351 (ISI Journal Citation Reports 2011), Vol. 7, No. 2, 2012, pp. 622-630.**
- **Compatibility of Values of Plane Strain Fracture Toughness, K_{Ic} , Crack Growth and Impact Energy Parameter for Welded Joints Behaviour Evaluation in Presence of Cracks, Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, Zijah Burzić, Srđan Jović, Tamara Gvozdrenović, Džafer Kudumović, TECHNICS TECHNOLOGIES EDUCATION MANAGEMENT, ISSN 1840-1503, Impact Factor 0,351 (ISI Journal Citation Reports 2011), Vol. 8, No. 1, 2013, pp. 50-58.**

Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom M24

- **Examination of Wear Resistance of Polymer-Basalt Composites, A. Todić, D. Čikara, V. Lazić, T. Todić, I. Čamagić, A. Skulić, D. Čikara, Tribology in Industry,**
-

ISSN: 0354-8996 (print version), ISSN: 2217-7965 (electronic version), Vol. 35, No. 1, pp. 36-41, 2013.

Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja M51

- **VARIABLE AND IMPACT LOAD TESTING OF HSLA STEEL WELDED JOINT, I. Čamagić**, N. Vasić, B. Ćirković, S. Cvetković, Z. Vasić, STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE, ISSN 1451-3749 (štampano izdanje) (printed edition), EISSN 1820-7863 (Online), Vol. 10, No. 3, 2010, pp. 231-234.
- **THE USAGE OF THE FRACTURE MECHANICS IN DETERMINING THE GROWTH PARAMETERS OF THE FATIGUE CRACK FOR PARTICULAR AREAS OF A WELDED JOINT, I.Čamagić**, Z.Burzić, S.Cvetković, ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE, ISSN 0354-7965, 2008, vol 53, No. 3, pp. 97-103.
- **Influence of Vanadium on Mechanical Characteristics of Air-Hardening Steels, Todić Aleksandar, Ćikara Dejan, Todić Tomislav, Čamagić Ivica**, FME TRANSACTIONS, ISSN1451-2092, Vol. 39, No. 2, 2011, pp. 49-54.

Rad u naučnom časopisu M53

- **ODREĐIVANJE TRAJNE DINAMIČKE ČVRSTOĆE EPRUVETA OSNOVNOG METALA I ZAVARENOG SPOJA NISKOLEGIRANOG ČELIKA POVIŠENE, Ivica Čamagić**, Nemanja Vasić, Zlatibor Vasić, Zijah Burzić, Aleksandar Todić, IMK-14 Istraživanje i razvoj, ISSN 0354-6829, Godina XVII, Broj (38), 1/2011, str. 53-56.
- **O JEDNOJ EFIKASNOJ METODI ZA PRORAČUN NOSAČA ALATA KOD UNUTRAŠNJEG STRUGANJA DUGAČKIH OBRADAKA, Pejović Branko, Ćirković Bogdan, Čamagić Ivica**, TEHNIČKA DIJAGNOSTIKA, ISSN 1451-1975, 2009, vol. 8, br. 3, str. 21-27.

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini M33

- **CHARACTERISATION OF DIFFERENT CRACK PARAMETERS IN HIGH STRENGTH STEEL WELDED JOINT, Burzić Z., Čamagić I.**, Sedmak S., Sedmak A., Grabulov V., IIW International Congress on Welding and Allied Processes, November 29-December 1, 2004, Cairo, Egypt.
 - **PREDLOG KONCEPCIJE TEHNOLOŠKOG REŠENJA SANACIJE, TEHNIČKOG UREĐENJA I REKULTIVACIJE POSTOJEĆIH SMETLIŠTA, Slavica Cvetković, Ivica Čamagić**, VIII MEĐUNAODNO SAVETOVANJE O DOSTIGNUĆIMA ELEKTROTEHNIKE, MAŠINSTVA I INFORMATIKE, DEMI 2007, Banja Luka ISBN 99938-623-2-0 (str. 855-860).
 - **REŠAVANJE KOMUNALNIH PROBLEMA U OBLASTIMA SA VEĆOM GUSTINOM NASELJENOSTI, Slavica Cvetković, Ivica Čamagić**, Okrugli sto sa međunarodnim učešćem, ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE U INDUSTRIJSKIM PODRUČJIMA, KOSOVSKA MITROVICA (19-20) april 2007 (str. 202-209) ISBN 978-86-80839-13-6.
 - **KOMPJUTERSKO ODREĐIVANJE MARŠUTA I SAKUPLJANJA SMEĆA, Slavica Cvetković, Ivica Čamagić**, Jovan Ristić, Okrugli sto sa međunarodnim učešćem, ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE U INDUSTRIJSKIM PODRUČJIMA, KOSOVSKA MITROVICA (19-20) april 2007 (str. 343-349) ISBN 978-86-80839-13-6.
 - **PARAMETRIC MODELING OF GEAR GEOMETRY BASED ON RELATIONS OF SIZE FORM AND TRANSMISSION RATIO IN GEAR SHAFTING, Predrag**
-

ŽIVKOVIĆ, Ivica ČAMAGIĆ, Peti međunarodni simpozijum "KONSTRUISANJE, OBLIKOVANJE I DIZAJN 2008", 15 -16. april 2008, Novi Sad.

- **ODREĐIVANJE VREMENSKE PERIODE PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA KOTLOVSKOG POSTROJENJA U TERMOELEKTRANI GACKO**, Dragan Kalaba, Dejan Čikara, Zoran Nadeždin, Ivica Čamagić, Simpozijum Elektrane, 2008, Vrnjačka Banja.
 - **THE ANALYSIS OF THE FRACTURE RESISTANCE FROM THE ASPECT OF THE APPLICATION OF THE PARAMETERS OF THE FRACTURE MECHANICS FOR A WELDED JOINT OF LOW-ALLOY STEEL WITH HIGHER SOLIDITY IN THE PRESENCE OF CRACKS**, Ivica Čamagić, Zijah Burzić, Slavica Cvetković, 10th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry", 16-19 September 2010, Donji Milanovac, Serbia.
 - **THE TESTING OF TENSE AND BLAST CHARACTERISTICS OF THE TEST TUBES OF THE WELDED JOINT AND THE COMPONENTS OF THE WELDED JOINT OF LOW-ALLOY STEEL WITH HIGHER DENSITY AND THE ESTIMATION OF THE EFFECTS OF HETEROGENITY OF THE WELDED JOINT STRUCTURE TO THE CHANGE OF THE DEFORMITY CONDITION**, Ivica Čamagić, Slavica Cvetković, Zijah Burzić, 1st International Scientific Conference on Engineering "Manufacturing and Advanced Technologies" MAT 2010, Mostar, Bosnia and Herzegovina, 18-20 November 2010.
 - **STRESS ANALYSIS OF THE HIGH-STRENGTH LOW-ALLOYED STEEL SUBMITTED TO VARIABLE LOAD**, Ivica Čamagić, Slavica Cvetković, Zijah Burzić, Predrag Zivković, The International Conference, "Mechanical Engineering in XXI Century", 25-26 November 2010, Niš, Serbia.
 - **ISTRAŽIVANJE UTICAJA VANADIJUMA NA STRUKTURU I ZATEZNU ČVRSTOĆU SAMOKALJIVIH ČELIKA**, Aleksandar Todić, Dejan Čikara, Tomislav Todić, Branko Pejović, Ivica Čamagić, II međunarodni kongres, "Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji", 09-11 mart 2011, Jahorina, Bosna i Hercegovina.
 - **FATIGUE ANALYSIS FROM FRACTURE MECHANICS ANGLE**, Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, Zijah Burzić, 10th Anniversary International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, DEMI 2011, Banja Luka.
 - **COMPOSITE MATERIALS SUCH APSORPTION MATERIALS FOR SUPPORTING STRUCTURES OF MACHINES**, Bogdan Ćirković, Ivica Čamagić, Nemanja Vasić, 34th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, September 28-30 2011, Niš, Serbia University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering.
 - **THE EFFECT OF VANADIUM CONTENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF SELF-TEMPERED STEEL X160CrMo12-1**, Aleksandar Todić, Dejan Čikara, Tomislav Todić, Branko Pejović, Bogdan Ćirković, Ivica Čamagić, 34th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, September 28-30 2011, Niš, Serbia University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering.
 - **BEHAVIOR ASSESSMENT OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOYED STEEL EXPOSED TO TENSILE AND VARIABLE LOAD**, Čamagić I., Vasić N.,
-

Cvetković S. (Kosovska Mitrovica-Serbia), Burzić Z., Todić A. (Belgrade-Serbia), 11th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry", RaDMI 2011, 15-18. September 2011, Soko Banja, Serbia.

- **APPLICATION OF FRACTURE MECHANICS PARAMETERS FOR WELDED JOINTS USABILITY TESTING, I. Čamagić**, N. Vasić, Z. Burzić, P. Živković, Z. Vasić, Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.
- **HIGH TEMPERATURE INFLUENCE ON SANDWICH BEAM STABILITY**, N. Vasić, I. Čamagić, Z. Vasić, Third Serbian (28th Yu) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, 5-8 July 2011.
- **INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE HETEROGENEITY WELDED JOINT CONSTITUENTS ON VALUES OF FRACTURE TOUGHNESS AND IMPACT ENERGY, Ivica Čamagić**, Nemanja Vasić, Zijah Burzić, Aleksandar Sedmak, Aleksandar Todić, 8th International scientific conference Development and modernization of production, University of Bihać, Faculty of technical engineering, September 29th-October 1st 2011.

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu M34:

- **COMPATIBILITY OF ENDURANCE LIMIT AND FATIGUE CRACK GROWTH PARAMETERS IN BEHAVIOR OF WELDED JOINT OF LOW ALLOYED STEELS, Ivica Čamagić**, Zijah Burzić, Nemanja Vasić, Srđan Jović, Slobodan Makragić, Predrag Živković, Serbian Scientific Society, Symposium Nonlinear Dynamics-Milutin Milanković, Multidisciplinary and Interdisciplinary Applications, (SNDMIA 2012), Belgrade, October 1-5, 2012, Booklet of Abstracts, pp. 169.

Ostalo:

Rad u međunarodnom časopisu M23 koji je prošao recenziju:

- **COMPATIBILITY OF FRACTURE MECHANICS PARAMETERS AND FATIGUE CRACK GROWTH PARAMETERS IN WELDED JOINT BEHAVIOR EVALUATION, Ivica Čamagić**, Nemanja Vasić, Zlatibor Vasić, Zijah Burzić, Aleksandar Sedmak, TEHNIČKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE, ISSN 1330-3651, No. 2, Vol. 20 (April, 2013) as original scientific paper.
-

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Истраживање утицаја експлоатационих услова на процену интегритета и преосталог века боудра чор приликом намењених за рад на повишеним температурама

која је моје ауторско дело.

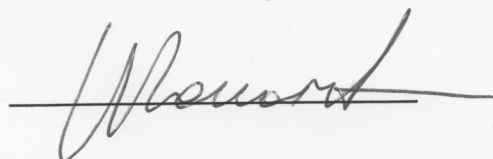
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда



У Косовској Митровици, 29.11.2023.