

## UTICAJ EKSPLOATACIONIH USLOVA NA PONAŠANJE ZAVARENOG SPOJA LEGIRANOG ČELIKA Č.7400

### AN EFFECT OF SERVICE CONDITIONS TO THE BEHAVIOUR OF WELDED JOINT OF THE ALLOYED STEEL 13 Cr Mo 4 4 (Č.7400)

Mr Meri Burzić, dipl. inž,<sup>(1)</sup>

Mr Marina Kutin, dipl. inž,<sup>(1)</sup>

Mr Mirjana Puharić, dipl. inž,<sup>(1)</sup>

Prof. dr Živoslav Adamović, dipl. inž,<sup>(2)</sup>

(1)Goša Institut, Beograd

(2)Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin



#### IZVOD

Radi potpunijeg razumevanja uzroka i načina pojave i rasta prslina u zavarenim spojevima čelika 13 CrMo 4 4 (Č.7400) predviđenog za rad u uslovima povišene temperature i pritiska, potrebno je da se utvrdi kako heterogenost strukture i mehaničkih svojstava zavarenog spoja, a pre svega ZUT, utiče na pojavu i rast prslina kao i na parametre rasta zamorne prslina. Ispitivanjem Šarpi epruveta sa iniciranjem zamornom prslinom u OM, MŠ i u ZUT, data je ocena kako heterogenost strukture i mehaničkih svojstava zavarenog spoja utiču na parametre rasta zamorne prslina, odnosno parametre Parisove jednačine dobijene iz zavisnosti  $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$ .

**Ključne reči:** Legirani čelik 13 CrMo 4 4, Parisov zakon, brzina rasta zamorne prslina, prag zamora.

#### 1. UVOD

Obično se navodi da je udeo zamora u ukupnom broju otkazivanja zavarenih konstrukcija u odnosu na sve druge vrste eksploatacijskih lomova najveći. Eksploatacijska svojstva legiranog čelika 13 CrMo 4 4 (Č.7400), projektovanog za izradu posuda pod pritiskom koje rade u uslovima povišene temperature i pritiska, u velikoj meri zavise od svojstava kritičnih područja zavarenog spoja. Zona uticaja toplote (ZUT) i metal šava (MŠ) predstavljaju kritična mesta, pre svega zbog povećane sklonosti ka krtom lomu [1].

Kvalifikacija tehnologije zavarivanja limova čelika 13 CrMo 4 4 (Č.7400) debljine 96 mm je urađena u skladu sa standardom JUS EN 288-3 [2]. Međutim, ovim standardom nisu predviđena ispitivanja na radnoj temperaturi (540°C), kao i ispitivanja

#### ABSTRACT

For completely realization of cause and manner, crack initiation and crack propagation in welded joint of steel 13 CrMo 4 4 (Č.7400) predicted for action in high temperature and pressure, so it is necessary to establish the heterogeneous of structure and mechanics property of welded joint and HAZ affects on crack initiation and propagation, and fatigue crack growth. During the testing of Sharpy specimens for fatigue crack initiation in BM, WM and HAZ how heterogeneous of structure and mechanic property in welded joint influence on fatigue crack rate parameters and Paris relationships parameters  $\log(da/dN) - \log(\Delta K)$ .

**Key words:** Alloyed steel 13 CrMo 4 4, Paris relationships, fatigue crack growth rate, fatigue threshold

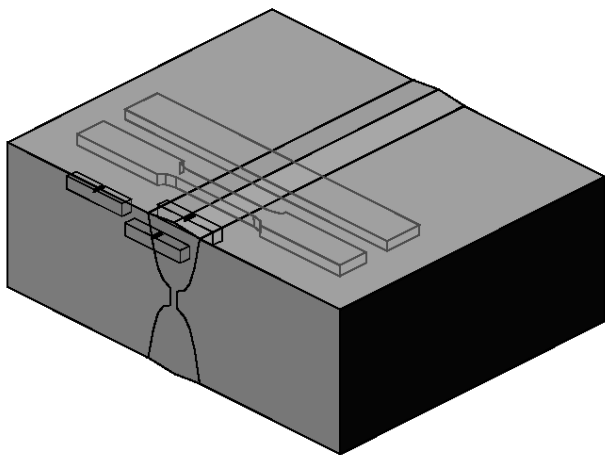
eksploatacionih svojstava osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja na sobnoj i radnoj temperaturi. Cilj ispitivanja je da se na osnovu dobijenih rezultata da ocena uticaja heterogenosti strukture i mehaničkih svojstava osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja čelika 13 CrMo 4 4 na pojavu i rast prslina kao i na parametre rasta zamorne prslina ( $da/dN$  i  $\Delta K_{th}$ ) na sobnoj i radnoj temperaturi od 540°C.

#### 2. MATERIJAL

Za ispitivanje parametara rasta zamorne prslina, na raspolaganju smo imali uzorak zavarenog spoja čelika 13 CrMo 4 4 (Č.7400) dimenzija 350x500x96 mm sa metalom šava po sredini (dvostruki "U" šav). Izgled zavarenog uzorka i shema vađenja epruveta je data na sl. 1.

Zavarivanje limova čelika 13 CrMo 4 4 (Č.7400) je izvedeno u dve faze, i to:

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



Slika 1. Shematski prikaz dvostrukog "U" šava i mesta vadenja epruveta

Zavarivanje je izveo atestirani zavarivač, uz stalni nadzor specijaliste zavarivanja.

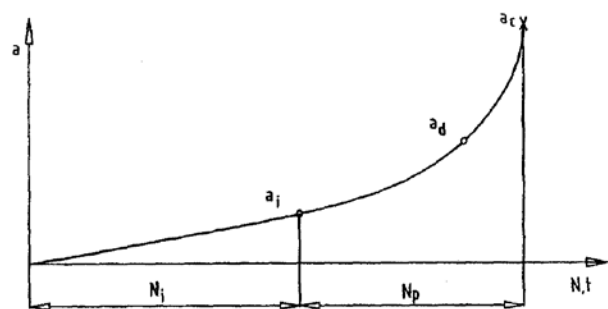
### 3. PARAMETARI RASTA ZAMORNE PRSLINE

Predviđanje radnog veka mašinskih elemenata, mašina ili konstrukcija opterećenih zamornim opterećenjima su potrebna kako pri konstruisanju tako i za definisanje intervala kontrole za otkrivanje i otklanjanje oštećenja nastalih u eksploataciji. Proces zamora i loma se može podeliti u tri vremenske faze [3]:

1. Fazu stvaranja mikroprslina  $a_i$  i njenog daljeg rasta do veličine nazvane inženjerskom prslinom,  $a_0$ . To može biti i minimalna dužina prslina koja se može otkriti,  $a_{pr}$ .
2. Fazu stabilnog rasta makroprslina do pojave nestabilnosti pri dužine  $a_c$ .
3. Fazu nestabilnog rasta i konačnog kvazistatičkog loma.

Kako su mehanizmi iniciranja i rasta mikroprslina (faza 1) razlikuju od mehanizma rasta makroprslina (faza 2), to su potrebne i dva različita pristupa za ocenu udela tih faza u ukupnom veku zamora (sl. 3). Uobičajen pristup je da se za ocenu broja cik-

lusa  $N_i$  potrebnih za iniciranje prslina koristi koncept lokalnih deformacija, a za ocenu udela faze rasta prslina  $N_p$  koncept mehanike loma. Kako prelaz iz faze iniciranja u fazu razvoja prslina (sl. 2) nije lako definisati u praksi je najčešće slučaj da se u cilju pojednostavljenja postupka određivanja ukupnog veka zamora uoči koja faza zamora je dominantna i da se, zatim, ona samostalno razmatra. Pretpostavka tipična za konstruisanje mašina da u elementima nema grešaka opredeljuje da je značajnija prva faza, faza iniciranja prslina. Ovo je tipičan i logičan koncept za male, pažljivo pripremljene komponente bez oštih zarezova. Međutim, u velikim konstrukcijama i zavarenim spojevima mnogo je bliža pretpostavka da inicijalne prslina već postoje i da treba odrediti kako brzo se 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.



Slika 2. Udeo perioda iniciranja  $N_i$  i perioda rasta zamorne prslina  $N_p$  u ukupnom veku zamora  $N_f$

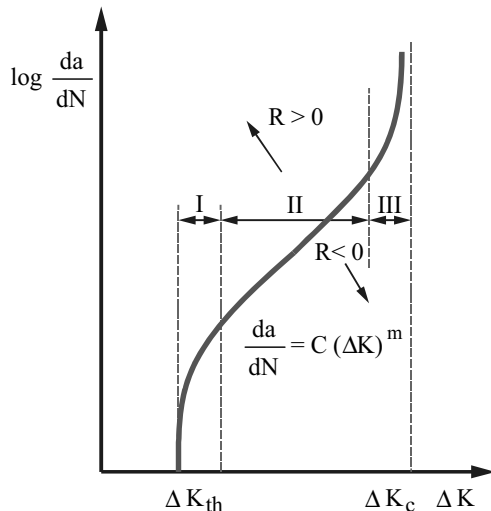
Zamor sa promenljivim amplitudama opterećenja može uključivati ustaljen obrazac pojave cikličnih napona ili neki stohastički oblik. Princip sličnog ponašanja ( $dK/da=0$ ) tokom rasta prslina u ovim slučajevima nije zadovoljen pa će uticaj istorije opterećenja na rast prslina biti izražen. Za analizu slučajeva sa rastućim ili opadajućim opsegom K-faktora za koje je gradijent  $dK/da$  mali, pogodno je koristiti modele koji su postavljeni za zamor sa  $\Delta K = \text{const}$  tj.  $dK/da=0$ , kao recimo Parisov model [3].

Razvoj u proučavanju ponašanja materijala pri dejstvu promenljivog opterećenja je omogućen paralelnim uvođenjem eksperimentalnog i teorijskog pristupa, jer samo teorijski pristup ne može da potpuno objasni nastanak i rast zamorne prslina. Danas se intenzivno istražuje koji sve faktori utiču na zavisnost  $da/dN = f(\Delta K)$ , u tzv. nisko cikličnom zamoru, kada se u petlji histerezisa jednog ciklusa uspostavlja plastična deformacija. Analiza stanja napona i defor-

macija 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 [3]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (1)$$

Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora ( $\Delta K_{th}$  na sl. 3), i visokih brzina ( $K_{Ic}$ ) veliki linearni srednji dio 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. Primjena Parisove jednačine se pokazala naročito plodonosnom u području zamora konstrukcija izrađenih od visokočvrstih materijala.



Slika 3. Tipičan izgled krive brzine rasta zamorne prsline u funkciji od  $\Delta K$  [3]

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  $\Delta K$  za vreme rasta prsline tokom testa inkrementalne, kako bi se eventualni interakcijski uticaj opterećenja sveo na minimalnu meru. Empirijski modeli iz prethodnog odeljka 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  $\Delta K$  i opsega  $R$ . Pod pretpostavkom da se zna promena

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \text{ odnosno } dN = \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (2)$$

integracijom se dobija vek

$$\Delta N = \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (3)$$

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 (3) dobija oblik

$$\Delta N = \frac{1}{C_p} \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{\left[ Y \left( \frac{a}{W} \right) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \right]^{m_p}} \quad (4)$$

gde je  $\Delta N$  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 komputera, 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 sigurnosti.

Ukoliko se u prvoj aproksimaciji usvoji da  $Y$  ne zavisi od dužine prsline  $a$  tada se izraz (4) može napisati u obliku

$$\Delta N = \frac{1}{C_p [Y \Delta \sigma \sqrt{a}]^{m_p}} \int_{a_0}^{a_d} a^{-\frac{m_p}{2}} da \quad (5)$$

pa se nakon integracije dobija rešenje u zatvorenom obliku

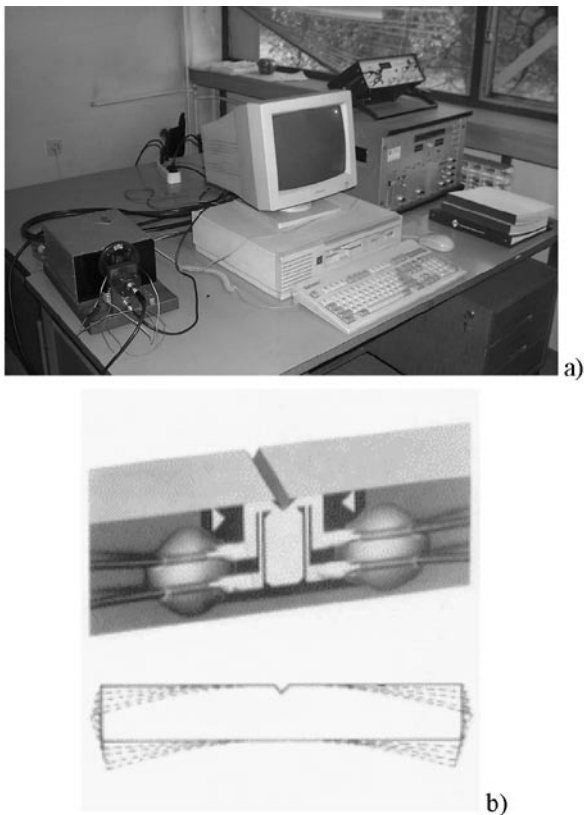
$$\Delta N = \frac{1}{C_p [Y \Delta \sigma \sqrt{a}]^{m_p}} \cdot \frac{a_0^{\left(1-\frac{m_p}{2}\right)} - a_d^{\left(1-\frac{m_p}{2}\right)}}{\frac{m_p}{2} - 1} \quad (6)$$

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.

#### 4. EKSPERIMENTALNI DEO

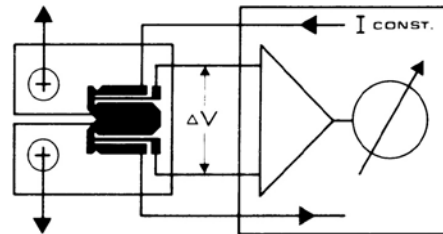
Iz oštrog koncentratora napona će u uslovima promjenljivog opterećenja poslije određenog broja ciklusa doći do inicijacije prsline i do njenog rasta ako je prekoračen prag zamora  $\Delta K_{th}$ . Kako konstrukcija pod određenim uslovima neće biti ugrožena dok prsline ne dostigne kritičnu veličinu, može se, uz prethodne analize, dopustiti eksploatacija konstrukcije sa prsline i u periodu rasta prsline. Bitan podatak za odluku o daljoj eksploataciji je poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od delujućeg opterećenja. Standard ASTM E647 [4] propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline  $da/dN$ , koja se razvija iz postojeće prsline i proračun opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ . To znači da epruveta treba da ima zamornu prsline. Dva su bitna ograničenja u standardu ASTM E647: brzina rasta mora da je veća od  $10^{-8}$  m/ciklus da bi se izbeglo područje praga zamora,  $\Delta K_{th}$ , a opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

Ispitivanje u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline  $da/dN$  i praga zamora  $\Delta K_{th}$  izvedeno je na standardnim Šarpi epruvetama metodom savijanja epruvete u tri tačke na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru CRACKTRONIC, sl. 4. Samo ispitivanje je radeno u kontroli sile.



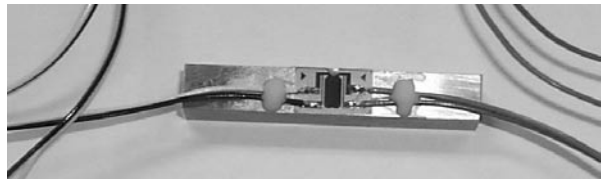
Slika 4. Savremeni sistem dinamička ispitivanja RUMUL-CRACKTRONIC

Na mehanički pripremljene epruvete su zalepljene merne trake (folije) RUMUL RMF A-5 merne dužine 5 mm, pomoću kojih je praćen rast prsline uređajem za merenje propagacije prsline FRAC-TOMAT, baziranom na električnom potencijalu trake i povezanom sa instrumentima, sl. 5. Traka je tanka otporna merna folija zalepljena na epruvetu na isti način kao i klasične merne trake za merenje deformacije.



Slika 5. Shema merne folije i načina registrovanja rasta prsline

Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje je dat na sl. 6. 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.



Slika 6. Izgled pripremljene epruvete za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline

Određivanje zavisnosti brzine rasta zamorne prsline po ciklusu  $da/dN$  i opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$  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,  $\Delta K$ , koji zavisi od geometrije epruvete i dužine prsline, i od opsega promjenljive sile,  $\Delta P = P_g - P_d$ .

Za određivanje opsega faktora intenziteta napona koristi se formula

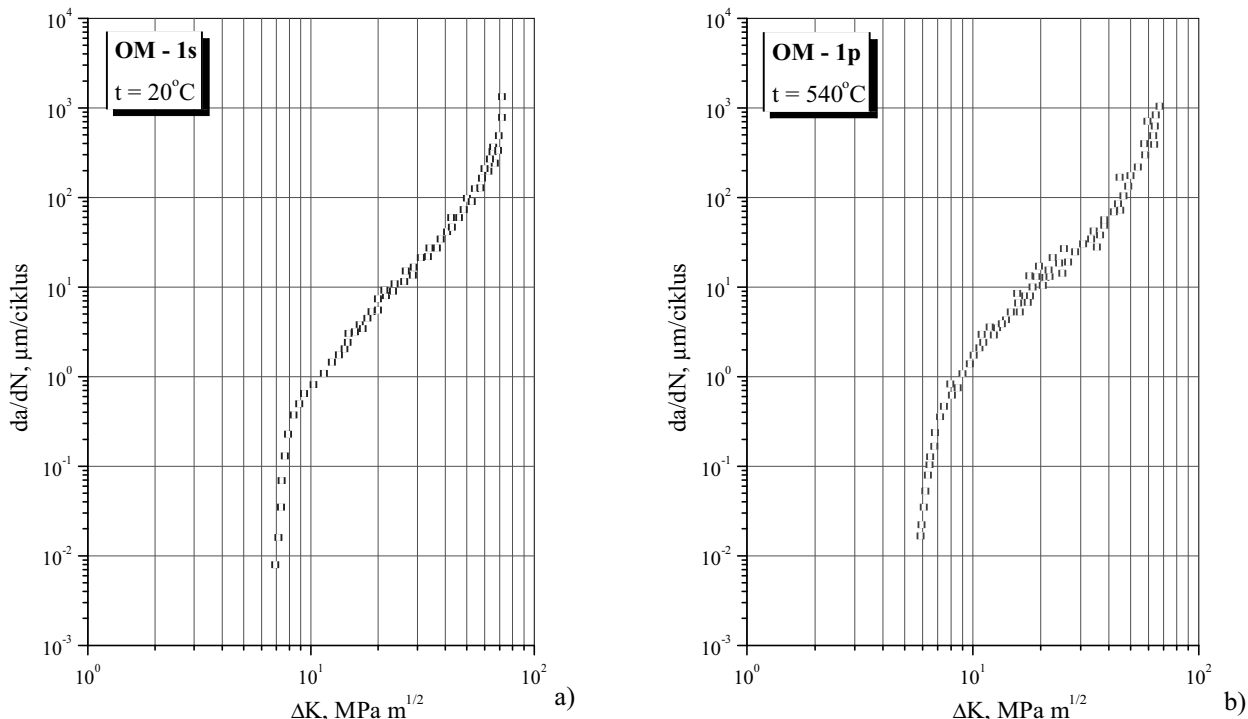
$$\Delta K = \frac{\Delta P \cdot L}{B \sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad 7$$

gde je:

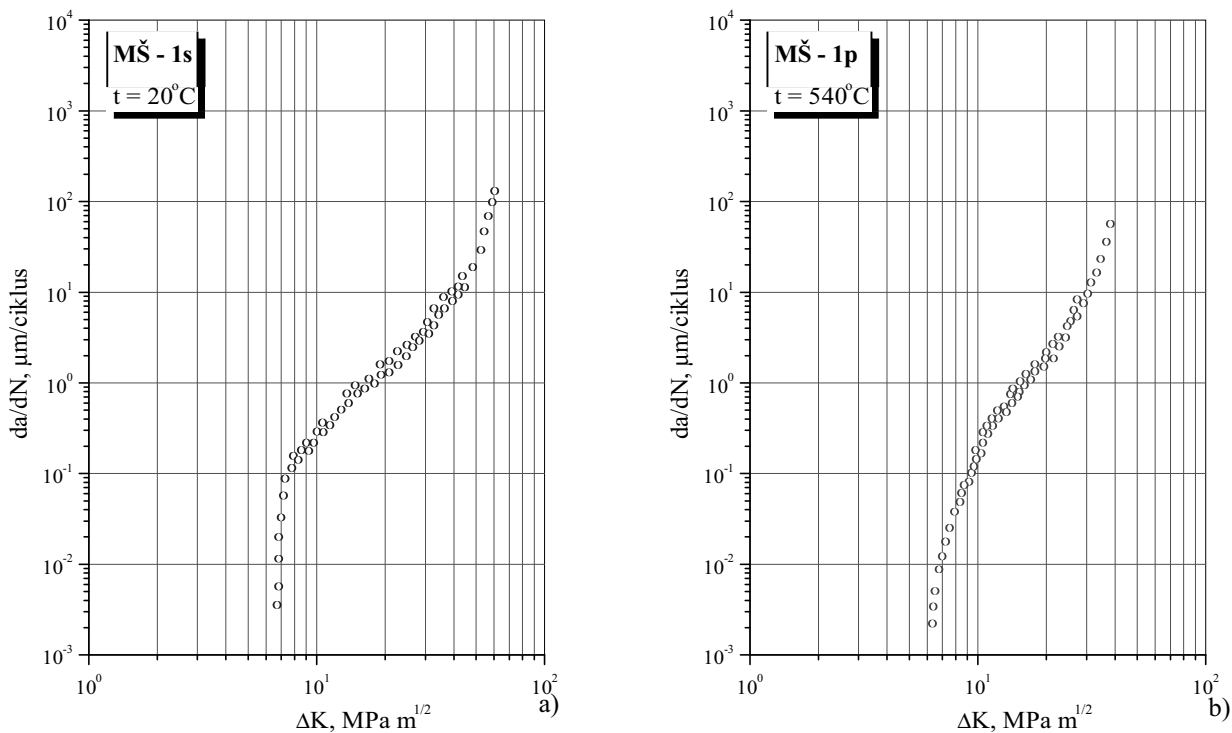
- L – raspon oslonaca, mm;
- B – debljina epruvete, mm;
- W – širina (visina) epruvete, mm, i
- a – dužina pukotine.

Na osnovu toka ispitivanja izračunavaju se i crta-ju zavisnosti  $\log da/dN - \log (\Delta K)$ . Dijagrami brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN - \text{promena opsega faktora intenziteta napona, } \Delta K$ , dati su na sl. 7 za epruvetu oznake OM-1s ispitane na sobnoj tempera-turi, i za epruvetu oznake OM-1p ispitane na radnoj temperaturi. Zavisnost  $\log da/dN - \log (\Delta K)$  za epru-vete sa zarezom u MŠ je data na sl. 8 za epruvetu

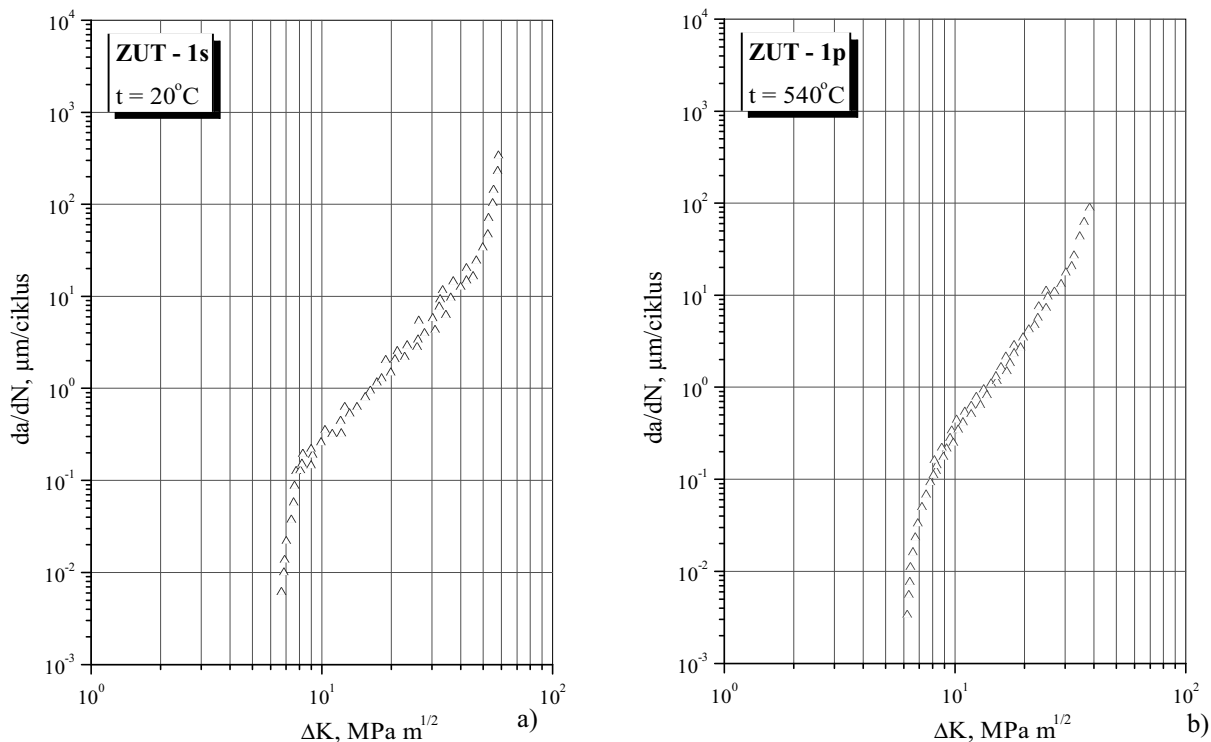
oznake MŠ-1s i za epruvetu oznake MŠ-1p. Za epru-vete sa zarezom u ZUT, zavisnosti  $\log da/dN - \log (\Delta K)$  su dati na sl. 9 za epruvetu oznake ZUT-1s, i za epruvetu oznake ZUT-1p. U tab.1 su prikazane dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta C i eksponenta m, kao i praga zamora  $\Delta K_{th}$  za sve ispitane epruvete izvađene iz ispitivanog uzorka [5].



Slika 7. Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  epruvete OM-1s (a) i OM-1p (b)



Slika 8. Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  epruvete MŠ-1s (a) i MŠ-1p (b)



Slika 9. Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  epruvete ZUT-1s (a) i ZUT-1p (b)

Tabela 1. Parametri Parisove jednačine za epruvete izvadene iz ispitivanog uzorka zavarenog spoja

Oznaka epruvete	Temperatura Ispitivanja, °C	Prag zamora $\Delta K_{th}$ , MPa m <sup>1/2</sup>	Koeficijent C	EkspONENT m	$da/dN$ , /ciklus pri $\Delta K=10$ MPa m <sup>1/2</sup>
OM-1s	20	6.8	$2.98 \cdot 10^{-13}$	3.62	$1.24 \cdot 10^{-09}$
OM-2s		6.5	$3.55 \cdot 10^{-13}$	3.49	$1.10 \cdot 10^{-09}$
OM-3s		6.7	$1.67 \cdot 10^{-13}$	3.78	$1.01 \cdot 10^{-09}$
MŠ-1s	20	6.8	$3.88 \cdot 10^{-13}$	3.82	$2.56 \cdot 10^{-09}$
MŠ-2s		7.0	$3.51 \cdot 10^{-13}$	3.94	$3.06 \cdot 10^{-09}$
MŠ-3s		6.8	$3.42 \cdot 10^{-13}$	3.82	$2.26 \cdot 10^{-09}$
ZUT-1s	20	6.7	$3.05 \cdot 10^{-13}$	4.01	$3.12 \cdot 10^{-09}$
ZUT-2s		6.5	$2.52 \cdot 10^{-13}$	4.05	$2.83 \cdot 10^{-09}$
ZUT-3s		6.7	$1.97 \cdot 10^{-13}$	4.11	$2.54 \cdot 10^{-09}$
OM-1p	540	5.9	$3.11 \cdot 10^{-13}$	4.08	$3.74 \cdot 10^{-09}$
OM-2p		6.1	$2.79 \cdot 10^{-13}$	4.13	$3.76 \cdot 10^{-09}$
OM-3p		6.2	$2.97 \cdot 10^{-13}$	4.07	$3.49 \cdot 10^{-09}$
MŠ-1p	540	6.2	$3.27 \cdot 10^{-13}$	4.14	$4.51 \cdot 10^{-09}$
MŠ-2p		6.1	$3.41 \cdot 10^{-13}$	4.06	$3.92 \cdot 10^{-09}$
MŠ-3p		6.2	$3.36 \cdot 10^{-13}$	4.03	$3.61 \cdot 10^{-09}$
ZUT-1p	540	6.1	$3.38 \cdot 10^{-12}$	3.17	$5.00 \cdot 10^{-09}$
ZUT-2p		6.0	$3.31 \cdot 10^{-12}$	3.28	$6.31 \cdot 10^{-09}$
ZUT-3p		6.0	$3.55 \cdot 10^{-12}$	3.35	$7.95 \cdot 10^{-09}$

---

---

## 5. ANALIZA REZULTATA

Kako se iz priloženih rezultata datih u tab. 1 vidi, mesto postavljanja zarezova i inicijacije prsline kao i temperatura ispitivanja, ima značajnog uticaja na vrednosti praga zamora  $\Delta K_{th}$ , i parametre rasta zamorne prsline. Za različite vrednosti opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$  možemo izračunati brzinu rasta zamorne prsline. Za analizu smo uzeli vrednost  $\Delta K$  od  $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Ova vrednost opsega faktora intenziteta napona se nalazi u delu krive u kojoj važi Parisov zakon. Brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$  se kreće u intervalu od  $1,24 \cdot 10^{-9}$  za uzorak sa vrhom zamorne prsline u OM ispitane na sobnoj temperaturi do  $3,12 \cdot 10^{-9} \text{ mm/ciklusu}$  za uzorak sa vrhom zamorne prsline u ZUT, takođe ispitane na sobnoj temperaturi.

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 u ovom slučaju od 2 do 3 puta veća u zavisnosti od mesta vrha zamorne prsline. Naime, i kod ovih ispitivanja najmanju brzinu rasta zamorne prsline ima uzorak sa vrhom zamorne prsline u OM, i ona iznosi  $3,76 \cdot 10^{-9}$  dok je najveća brzina rasta zamorne prsline kod uzorka sa vrhom zamorne prsline u ZUT i ona iznosi  $7,95 \cdot 10^{-9} \mu\text{m/ciklusu}$ .

Međutim, i pored ovolikih razlika, generalno i kod epruveta sa prslinom u OM i komponentama zavarenog spoja MŠ i ZUT, dobijene su dosta male brzine rasta zamorne prsline što ide u prilog oceni o dobrim osobinama ovoga materijala i komponenti zavarenog spoja u prisustvu greške tipa prsline u uslovima delovanja promenljivog opterećenja (prevashodno niskocikličnog zamora). Ponašanje komponenti zavarenog spoja, kao i samog zavarenog spoja u celini treba povezati sa promenom nagiba dala krive u zoni važenja Parisovog zakona. Po pravilu materijali koji imaju manju brzinu rasta zamorne prsline imaju na dijagramu  $da/dN-\Delta K$  manji nagib. Sporiji rast je potvrđen kod uzorka sa prslinom u osnovnom metalu i metalu zavara, jer za istu brzinu rasta zahteva veći opseg faktora intenziteta napona. Maksimalna brzina rasta zamorne prsline se može očekivati na nivou opsega faktora intenziteta napona koji se približava žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, jer se na tom nivou dostiže krti lom. Međutim, ono što je mnogo važnije je to, što na osnovu ovih rezultata ispitivanja, a koristeći poznate zavisnosti (4) do (6), možemo predvideti vek konstrukcije, u uslovima delovanja promenljivog opterećenja.

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu napred izloženog može se zaključiti da:

- Mesto postavljanja zarezova i inicijacije prsline kao i temperatura ispitivanja, ima odlučujući uticaj na vrednosti praga zamora  $\Delta K_{th}$ , i parametre rasta zamorne prsline.

- Najveću otpornost prema propagaciji prsline, odnosno najmanju brzinu rasta zamorne prsline imaju uzorci sa zarezom i iniciranjem prslinom u OM, dok je najveća brzina rasta zamorne prsline kod uzorka sa zarezom u ZUT. Ova konstatacija je u direktnoj vezi sa uticajem heterogenosti strukture komponenti zavarenog spoja na brzinu rasta zamorne prsline  $da/dN$ .

- Ponašanje osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja uzorka ispitanih na radnoj temperaturi ( $540^\circ\text{C}$ ) u uslovima delovanja promenljivog opterećenja (prag zamora, parametri rasta zamorne prsline) a u prisustvu greške tipa prsline pokazuje povećanje brzine rasta zamorne prsline dva do četiri puta, što je u direktnoj vezi sa slabljenjem osobina osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja u uslovima povišene temperature.

Generalno, predviđanje veka zamora za opterećenja konstantne amplitude, odnosno broj ciklusa neophodan za rast prsline od početne  $a_0$  do kritične  $a_c$  ili dozvoljene dužine prsline  $a_d$  danas predstavlja osnov procene integriteta i preostalog veka svake konstrukcije, uključujući i posude pod pritiskom.

## LITERATURA

[1] Burzić, Z., Sedmak, S., Manjgo, M., *Primena mehanike loma u oceni osobina zavarenih spojeva*, RIM 2001, Bihać, str. 451-460, 2001.

[2] EN 288-3, "Obezbeđenje kvaliteta u zavaranju", Zbirka standarda DUZS, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd, 1996.

[3] Paris P. C., and Erdogan F. "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.

[4] ASTM E647, "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above  $10^{-8} \text{ m/cycle}$ ", Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01, p. 714.

[5] Burzić, M., Burzić, Z., Kurai, J., *Procena preostalog veka korišćenja reaktora u RNP*, Elaborat za potrebe Rafinerije nafte Pančevo, CertLab