

## ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA NA VRHU RASTUĆE ZAMORNE PUKOTINE

Mersida Manjgo<sup>1</sup>, Meri Burzić<sup>2</sup>, Zijah Burzić<sup>3</sup>, Senad Rahimić<sup>4</sup>

*Ključne riječi: Zamorna pukotina, brzine rasta zamorne pukotine, prag zamora*

Abstract:

Razvoj u proučavanju ponašanja materijala pri djelovanju promjenljivog opterećenja je omogućen paralelnim uvođenjem eksperimentalnog i teorijskog pristupa, jer samo teorijski pristup ne može da potpuno objasni nastanak i rast zamorne pukotine. Analiza stanja napreznja i deformacija na vrhu rastuće zamorne pukotine postupcima linearno-elastične mehanike loma (LEML) je dovela do formuliranja Parisove jednadžbe za sve metale i legure, koja dovodi u vezu brzinu rasta zamorne pukotine s opsegom faktora intenziteta napreznja na vrhu pukotine. U ovom radu je opisano ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika Sa 387 Gr. 91 u prisustvu greške tipa pukotine pri djelovanju promjenljivog opterećenja. Poznavajući uslove pod kojim će određena konstrukcija raditi, odnosno znajući tehnologiju zavarivanja istog, može se proračunati i pretpostaviti preostali vijek eksploatacije.

### 1 UVOD

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

Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora  $\Delta K_{th}$ , 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 materijala povišene i visoke čvrstoće.

Iz oštih koncentrata 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 prslinom i u periodu rasta prsline. Bitan podatak za odluku o daljoj eksploataciji je poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od djelujućeg opterećenja.

Standard ASTM E647 propisuje mjerenje 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 prslinu. Dva su bitna ograničenja u standardu ASTM E647: brzina rasta mora da je veća od  $10^{-8}$  m/ciklus da bi se izbjeglo područje praga zamora,  $\Delta K_{th}$ , a opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

## 1.1 Eksperiment

Za eksperimentalnu analizu korišten je čelik kvaliteta A-387 Gr. 91 debljine 96 mm. Mikrolegirani čelik SA 387 Gr. 91 koji spada u grupu Cr-Mo čelika, ima napon tečenja min 450MPa i garantovanu energiju udara na sobnoj temperaturi minimum 41J. Hemijski sastav ispitivanog čelika je dat u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivane šarže čelika SA 387 Gr. 91

Šarža	Hemijski sastav, mas. %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Cu
	0.129	0.277	0.443	0.001	0.001	8.25	0.874	0.01	0.198	0.056	0.068

Pri zavarivanju mikrolegiranih čelika SA 387 Gr. 91 najvažnije je odabrati korektan termički ciklus zavarivanja koji neće imati negativan uticaj na osobine čelika.

Na termički ciklus pri zavarivanju utiče niz faktora: unesena energija; debljina materijala; temperatura osnovnog materijala (temperatura predgrijevanja); oblik zavarenog spoja i dimenzije i broj slojeva.

Zavarivanje čeličnih limova je urađeno sa dva postupka i dodatna materijala, a prema zahtjevu sadržanom u postupku zavarivanja:

- Korjenski zavar - TIG zavarivanje (postupak 141 prema EN ISO 6947), 4 (četiri) prolaza. Korišćeni dodatni materijal za TIG je žica oznake BOEHLER C 9 MV-IG, prečnika 2,4mm (međunarodna oznaka W CrMo 91 prema EN ISO 21952-A).
- Ispuna - REL zavarivanje (postupak 111 prema EN ISO). Korišćeni dodatni materijal za REL je elektroda oznake BOEHLER FOX C9 MV, prečnika 3,50 i 4,00mm (međunarodna oznaka E CrMo 91 B 4 2 H5 prema EN ISO 3580-A).

Kao zaštitni gas je korišćen Argon (Ar), protoka 12 litara/min. Hemijski sastav dodatnog materijala dat je u tabeli 2, a mehanička svojstva u tabeli 3.

*Tabela 2. Hemijski sastav dodatnih materijala*

Dodatni materijal	Postupak zavarivanja	Hemijski sastav, %											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Nb	N
C 9 MV-IG	TIG	0.11	0.23	0.5	0.006	0.003	9.0	0.93	0.5	0.19	0.03	0.07	0.04
FOX C9 MV	REL, 3.5mm	0.09	0.19	0.55	0.01	0.006	8.5	1.00	0.5	0.19	0.1	0.04	0.05
FOX C9 MV	REL, 4.0mm	0.11	0.26	0.66	0.008	0.005	8.5	0.94	0.5	0.20	0.1	0.06	0.04

*Tabela 3. Mehanička svojstva dodatnih materijala*

Dodatni materijal	Postupak zavarivanja	Napon tečenja, $R_{eL}/R_{p0,2}$ , MPa	Zatezna čvrstoća, $R_m$ , MPa	Izduženje, A, %	Energija udara, KV, J
C 9 MV-IG	TIG	$\geq 530$	$\geq 620$	$\geq 17$	$\geq 50$
FOX C9 MV	REL, 3.5mm	$\geq 550$	$\geq 680$	$\geq 17$	$\geq 47$
FOX C9 MV	REL, 4.0mm	$\geq 550$	$\geq 680$	$\geq 17$	$\geq 47$

Ispitivanje na sobnoj temperaturi 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. Samo ispitivanje je rađeno u kontroli sile. Ovaj pulzator ostvaruje sinusoidalno jednosmjerno promjenljivo momentno opterećenje u opsegu od -70 do 70 Nm. Uređaj je povezan sa računarom, štampačem i pisačem, čime se omogućava automatizacija mjerenja i direktno prikupljanje i obrada dobijenih podataka.

Ispitivanje je obavljeno pri istom odnosu minimalnog i maksimalnog opterećenja  $R = -1$ . Ostvarena učestalost se kretala u opsegu od 175 do 195 Hz u zavisnosti od toga da li je prslina prolazila kroz osnovni metal, metal šava ili zonu uticaja toplote i od veličine opterećenja. Srednje opterećenje i njegova amplituda je registrovana sa tačnošću  $\pm 3$  Ncm.

Epruvete su prije ispitivanja mehanički pripremljene i na tako pripremljene epruvete su zaljepljene mjerne trake - folije pomoću kojih je praćen priraštaj prsline. Za ispitivanje su korištene mjerne folije RMF A-5 mjerne dužine 5 mm. Da bi se mogao pratiti rast prsline pomoću mjerne folije, korišćen je uređaj za registrovanje priraštaja prsline FRACTOMAT, slika 1.



Slika 1. Savremeni sistem za dinamička ispitivanja

Sistem za mjerenje priraštaja prsline, FRACTOMAT i mjerna folija su bazirani da registruju promjenu električnog otpora mjerne folije. Kako zamorna prslina raste ispod mjerne folije, mjerna folija puca prateći vrh zamorne prsline i obezbeđuje promjenu otpora folije koja varira linearno sa promjenom dužine 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,  $\Delta F = F_g - F_d$ .

Za određivanje opsega faktora intenziteta napona koristi se formula ,

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B \sqrt{W^3}} \cdot f(a / W) \quad (1)$$

gdje je:

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

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

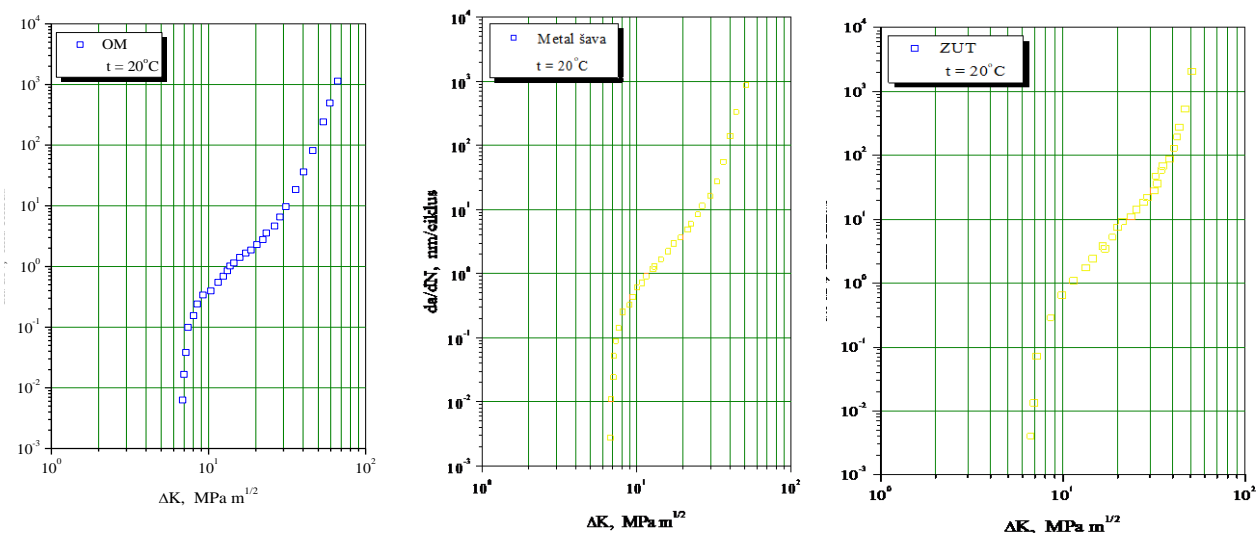
$$f(a/W) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \left[ 1,99 - \frac{a}{W} \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left( 2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left( 1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \quad (2)$$

Važni podaci u ocjeni ponašanja materijala sa greškom tipa prsline u uslovima djelovanja promjenljivog opterećenja se dobijaju određivanjem parametara rasta zamorne prsline. Uticaj eksploatacionih uvjeta (vremena eksploatacije i temperature) na parametre rasta zamorne prsline je analiziran ispitivanjem OM, kao i komponenti zavarenog spoja.

Ispitivane su tri grupe epruveta u zavisnosti od mjesta vrha prsline, i to: I grupa - epruvete sa vrhom prsline u OM, II grupa - epruvete sa vrhom prsline u MŠ i III grupa - epruvete sa vrhom prsline u ZUT.

Na osnovu toka ispitivanja i dobijenih zavisnosti dužina prsline  $a$  - broj ciklusa  $N$ , izračunava se brzina rasta zamorne prsline  $da/dN$ . U zavisnosti od primjenjenog promjenljivog opterećenja iskazanog kroz promjenu opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , crtaju se krive  $\log da/dN - \log(\Delta K)$ .

Karakteristični dijagrami brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$  - promjena opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u OM, slika 2a, za epruvete sa vrhom zamorne prsline u MŠ, slika 2b i za epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT, slika 2c.



Slika 2. a) Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  za epruvete sa vrhom zamorne prsline u OM  
b) Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  za epruvete sa vrhom zamorne prsline u MŠ  
c) Dijagram zavisnosti  $da/dN - \Delta K$  za epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT

Dobijene vrijednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora  $\Delta K_{th}$ , i brzine rasta zamorne prsline,  $da/dN$ , pri vrijednosti  $\Delta K=10\text{MPa m}^{1/2}$ , date su u tabeli 4 za epruvete sa zarezom u OM, tabela 5 za epruvete sa zarezom u MŠ, i tabela 6 za epruvete sa zarezom u ZUT.

Tabela 4. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u OM

Oznaka epruvete	Temperatura Ispitivanja, °C	Prag zamora $\Delta K_{th}$ , MPa m <sup>1/2</sup>	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, μm/cikl, pri $\Delta K=10\text{MPa m}^{1/2}$
OM-1	20	6,9	$2,98 \cdot 10^{-10}$	3,62	$1,24 \cdot 10^{-6}$
OM-2		6,8	$3,07 \cdot 10^{-10}$	3,58	$1,17 \cdot 10^{-6}$
OM-3		7,1	$2,85 \cdot 10^{-10}$	3,59	$1,11 \cdot 10^{-6}$

Tabela 5. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u MŠ

Oznaka epruvete	Temperatura Ispitivanja, °C	Prag zamora $\Delta K_{th}$ , MPa m <sup>1/2</sup>	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, μm/cikl, pri $\Delta K=10\text{MPa m}^{1/2}$
MŠ-1	20	7,2	$3,88 \cdot 10^{-10}$	3,62	$2,56 \cdot 10^{-6}$
MŠ -2		7,1	$4,05 \cdot 10^{-10}$	3,71	$2,07 \cdot 10^{-6}$
MŠ -3		7,4	$3,93 \cdot 10^{-10}$	3,80	$2,48 \cdot 10^{-6}$

Tabela 6. Parametri rasta zamorne prsline za epruvete sa zarezom u ZUT

Oznaka epruvete	Temperatura Ispitivanja, °C	Prag zamora $\Delta K_{th}$ , MPa m <sup>1/2</sup>	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN, m/cikl, pri $\Delta K=10\text{MPa m}^{1/2}$
ZUT-1	20	6,6	$3,05 \cdot 10^{-10}$	4,01	$3,12 \cdot 10^{-6}$
ZUT -2		6,8	$3,07 \cdot 10^{-10}$	4,04	$3,37 \cdot 10^{-6}$
ZUT -3		6,5	$2,85 \cdot 10^{-10}$	4,09	$3,51 \cdot 10^{-6}$

## 2 ZAKLJUČAK

Za eksploatacionu sigurnost konstrukcija od Sa 387 Gr. 91 najznačajnije su karakteristike koje opisuju pojavu i rast prslina pod uticajem promjenljivog opterećenja. To su prije svega parametri rasta zamorne prslina kod konstrukcijskih oblika sa greškom tipa prslina.

Heterogenost strukture komponenti zavarenog spoja utiče na ponašanje OM i komponenti zavarenog spoja u prisustvu greške tipa prslina u uslovima djelovanja promjenljivog opterećenja.

Dobijene vrijednosti praga zamora,  $\Delta K_{th}$ , i brzine rasta zamorne prslina,  $da/dN$ , su u direktnoj vezi sa položajem vrha zamorne prslina. Najveću otpornost prema rastu već postojeće prslina u materijalu, imaju epruvete sa vrhom zamorne prslina u ZUT-e.

## 3 LITERATURA

- [1] M.Burzić, M.Manjgo, Elobarat po projektu Eureka, Beograd- Mostar, 2017
- [2] Burzić Z., Sedmak S., Manjgo M., Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva, Integritet i vek konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001
- [3] PARIS, P.C., ERDOGAN, F., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [4] ASTM E647-95, "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above  $10^{-8}$  m/cycle", Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01, p. 714, 1995
- [5] ASTM E1152-87, for Determining J-R Curve
- [6] Burzić, Z., "Ispitivanje promenljivim opterećenjem glatkih i zarezanih epruveta", 7. Tematski zbornik radova Eksperimentalne i numeričke metode u oceni integriteta konstrukcije, V. Plana, 1997, pp.75-92
- [7] Čamagić I., Burzić Z., Cvetković S., "Primena mehanike loma u određivanju parametara rasta zamorne prslina za karakteristične oblasti zavarenog spoja", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 53, 3(2008), pp. 97-103