

**X Naučno/stručni simpozij sa međunarodnim učešćem
„METALNI I NEMETALNI MATERIJALI“ Bugojno, BiH, 24-25. april 2014.**

**ANALIZA ZAMORA ZAVARENOG SPOJA ČELIKA NN-70 U
PRISUSTVU GREŠKE TIPA PRSLINE**

**FATIGUE ANALYSIS STEEL WELDED JOINT NN-70 IN WITNESS
DEFECTS TYPE OF CRACK**

Dženana Gačo
Tehnički fakultet Bihać
Bosna i Hercegovina
dzgaco@bih.net.ba

Fadil Islamović
Tehnički fakultet Bihać
Bosna i Hercegovina
f.islam@bih.net.ba

Zijah Burzić
Vojnotehnički institut
Beograd, Srbija
zijah.burzic@vti.vs.rs

Nermin Bišćević
JU Mašinsko – saobraćajna mješovita
srednja škola Bihać
Bihać, Bosna i Hercegovina
nerminbiscevic@yahoo.com

Kategorizacija rada: Stručni rad

SAŽETAK

U ovom radu je opisano ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika NN-70 u prisustvu greške tipa prsline pri djelovanju promjenljivog opterećenja. Poznavajući uslove pod kojim će određena konstrukcija raditi, odnosno znajući tehnologiju zavarivanja istog, može se solidno proračunati i pretpostaviti preostali vijek eksploatacije. Određivanje parametara rasta zamorne prsline komponenti zavarenog spoja čelika NN – 70 predstavlja jednu od najvažnijih metoda ispitivanja koje se koriste u procjeni integriteta i preostalog vijeka bilo koje zavarene konstrukcije i čini ova istraživanja još svrsishodnijim

Ključne riječi: rast zamorne prsline, prag zamora, opseg faktora intenziteta napona, Parisova jednačina .

ABSTRACT

This paper describes the behavior of welded steel components NN-70 in the presence of defects such as cracks in the operation of variable load. Knowing the conditions under which the particular construction operates and knowing the welding technology of the same, we can solidly calculate and assume the remaining life of exploration. By assessing the growth parameters of crack lassitude the components of the welded steel joints of NN-70 represent one of the most important testing methods used in assessing the integrity and remaining life of any welded structure and makes this research more purposeful.

Keywords: fatigue crack growth, fatigue threshold, stress intensity factor range, Paris equation.

1. UVOD

Primjena mehanike loma je donijela značajne promjene u inženjerskoj praksi. Kao primjer za ilustraciju ove tvrdnje mogu da se navedu problemi sa Aljaska cjevovodima i primjena principa konstruisanja sa sigurnošću od loma. U slučaju cjevovoda od Aljaske do SAD po prvi put su kriterijumi mehanike loma prihvaćeni kao mjerodavni, umjesto previše konzervativnih standarda o dozvoljenim greškama u zavarenom spoju. Naime, kada je ispitivanjem bez razaranja utvrđen veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po tad važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje ekonomske opravdanosti, odnosno tehničke neophodnosti popravke. Stoga je nadležna savezna agencija, na zahtjev kompanije koja je postavila cjevovod zatražila pomoć od Nacionalnog biroa za standarde (National Bureau of Standards - NBS).

Detaljna analiza parametara loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha prsline, obuhvatila je s jedne strane procjenu sile rasta prsline, a s druge strane otpornost materijala na rast prsline. Rezultati ovog istraživanja su zvanično prihvaćeni, pa je obim popravke drastično smanjen, čim su izbjegnuti nepotrebni troškovi, a takođe i opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavarivanjem [1]. Ovdje je najvažnije istaći da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dopušteni izuzetak od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako takva analiza daje ubjedljivu i konzervativnu (sigurnu) procjenu integriteta konstrukcije. Drugi primjer drastične promjene u inženjerskoj praksi je prelazak sa klasičnog principa konstruisanja komponenti koje rade u uslovima zamora (tzv. safe – life princip u okviru koga se određuje preostali vijek komponente bez prsline) na princip konstruisanja sa sigurnošću od loma (tzv. fail – safe). Još izraženije nego u prvom primjeru, ovdje je od suštinskog značaja bio dostignut nivo mehanike loma kao naučne discipline, a posebno istraživanje u vezi sa zamornim rastom prsline. Drugim riječima, prikupljena saznanja o rastu zamorne prsline su omogućila da se, sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vijek komponente sa prsline i na taj način procijeni da li komponenta može da radi do sljedeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamjenjuju prije nego što se redovnim kontrolama otkriju prsline ili slične greške. Pri tome je komponenta konstruisana tako da u slučaju postojanja prsline manje od minimalne veličine koju može da otkrije primijenjena metoda ispitivanja bez razaranja, njen vijek (period rasta prsline od navedene fiktivne veličine prsline do kritične veličine za krti lom) bude veći od perioda do sljedeće kontrole [1].

Sigurnost zavarenih konstrukcija u eksploataciji, a posebno posuda pod pritiskom se mora razmotriti još u fazi projektovanja. Proučavanje otpornosti prema lomu zavarenih spojeva posuda pod pritiskom je neophodno, jer u slučaju loma mogu nastati katastrofalne posljedice sa velikim materijalnim štetama i ljudskim žrtvama, a mogući su i ekološki višegodišnji poremećaji. Radi toga treba raspolagati pouzdanim metodama za procjenu integriteta i preostalog vijeka konstrukcija, a u cilju minimiziranja opasnosti od loma.

U posljednjih 30 godina ostvaren je značajan napredak u razvoju niskolegiranih čelika povišene čvrstoće. Prednost primjene niskolegiranih čelika povišene čvrstoće (HSLA) u konstrukcijama, posebno za posude pod pritiskom, je u smanjenoj težini proizvoda i ekonomičnijoj proizvodnji. Osnovni materijal, niskolegirani čelik visoke čvrstoće, NN - 70 [2], je namijenjen za izradu opreme pod pritiskom, i projektovan za rad na niskim temperaturama. Dobro se zavaruje, uglavnom je to "over matching" gdje metal šava ima veću čvrstoću od osnovnog metala.

2. MATERIJAL

Za ponašanje komponenti zavarenog spoja u prisustvu greške tipa prsline pri djelovanju promjenljivog opterećenja, izabran je čelik NN - 70. Materijal je isporučen u obliku limova

debljine 20 mm. Hemijski sastav dostavljenih limova je dat u tabeli 1, a mehanička svojstva su data u tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika NN – 70 [2]

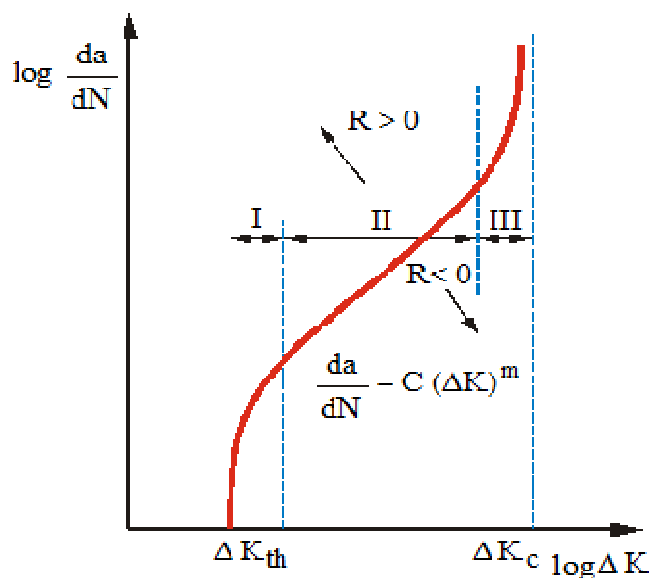
% mas.									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
0,10	0,20	0,23	0,009	0,018	1,24	3,10	0,29	0,05	0,08

Tabela 2. Mehanička svojstva čelika NN – 70 [2]

Pravac ispitivanja	Napon tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje A, %, min.
L - T	710	770	14

3. ODREĐIVANJE PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE

Osnovni napredak koji je mehanika loma napravila u području zamora materijala je u analitičkom rasčlanjivanju fenomena loma usljed zamora na period stvaranja, u kome zamorna prslina nastaje, i na period rasta ili širenja koji mu slijedi i u kome se nastala prslina povećava do kritične veličine pri kojoj dolazi do naglog loma. Time se ukupan broj ciklusa, N_u , poslje koga dolazi do loma, dijeli 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 [3] za sve metale i legure, koja dovodi u vezu brzinu rasta zamorne prsline sa opsegom faktora intenziteta napona na vrhu prsline [1,2]. Iako Parisova jednačina rasta prsline ne važi u čitavom području, između malih brzina u blizini praga zamora (ΔK_{th} na slici 1), 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.



Slika 1. Tipičan izgled krive brzine rasta zamorne prsline u funkciji od ΔK

Primjena Parisove jednačine se pokazala naročito plodonosnom u području zamora konstrukcija izrađenih od materijala povišene i visoke čvrstoće. Iz oštih koncentratora

napona će u uslovima promjenljivog opterećenja poslije 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 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 djelujućeg opterećenja. Standard ASTM E647 [4] propisuje mjerenje 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 prsline. 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, ΔK_{th} , a opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

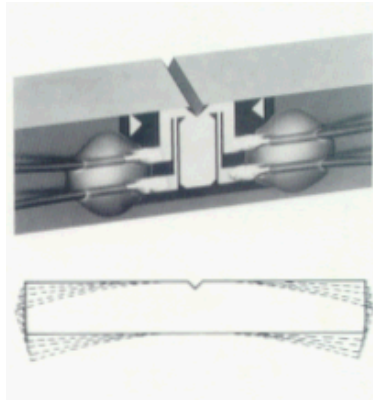
4. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE RASTA ZAMORNE PRSLINE

Ispitivanje na sobnoj temperaturi u cilju određivanja brzine rasta zamorne prsline da/dN i praga zamora ΔK_{th} izvedeno je na standardnim Šarpi epruvetama metodom savijanja epruvete u tri tačke na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru, slika 2. 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 [2].

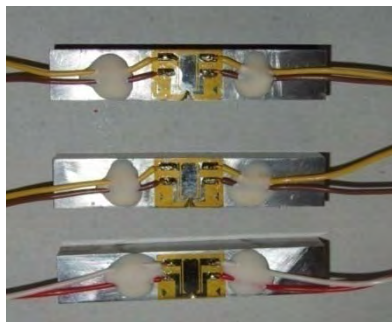


Slika 2. Savremeni sistem za dinamička ispitivanja

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 prsline prolazila kroz osnovni metal, metal šava ili zonu uticaja toplote i od veličine opterećenja. Srednje opterećenje i njegova amplituda je registrovana sa tačnošću ± 3 Ncm. Epruvete su prije ispitivanja mehanički pripremljene i na tako pripremljene epruvete su zalijepljene 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 [5]. Sistem za mjerenje priraštaja prsline, FRACTOMAT i mjerna folija su bazirani da registruju promjenu električnog otpora mjerne folije. Shema rada sistema za mjerenje priraštaja prsline FRACTOMAT - mjerna folija je prikazana na slici 3. Traka je tanka otporna mjerna folija zalijepljena na epruvetu na isti način kao i klasične mjerne trake za mjerenje deformacije. Izgled pripremljenih epruveta za ispitivanje je dat na slici 4. Kako zamorna prsline raste ispod mjerne folije, ova se cijepa prateći vrh zamorne prsline, čime se električni otpor folije mijenja linearno sa promjenom dužine prsline [5].



Slika 3. Standardna Šarpi epruveta za ispitivanje metodom savijanja u tri tačke na rezonantom visokofrekventnom pulzatoru



Slika 4. Izgled pripremljenih epruveta za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline [2]

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 promjenljive sile, $\Delta P = P_g - P_d$ [2]. Za određivanje opsega faktora intenziteta napona koristi se formula:

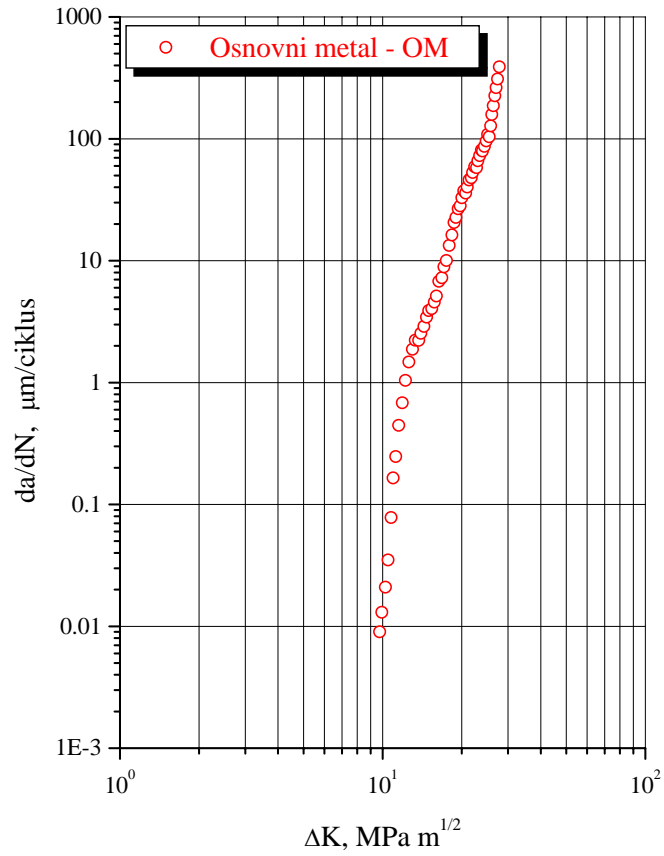
$$\Delta K = \frac{\Delta P \cdot L}{B\sqrt{W^3}} \cdot f(a/W) \quad (1)$$

gdje je:

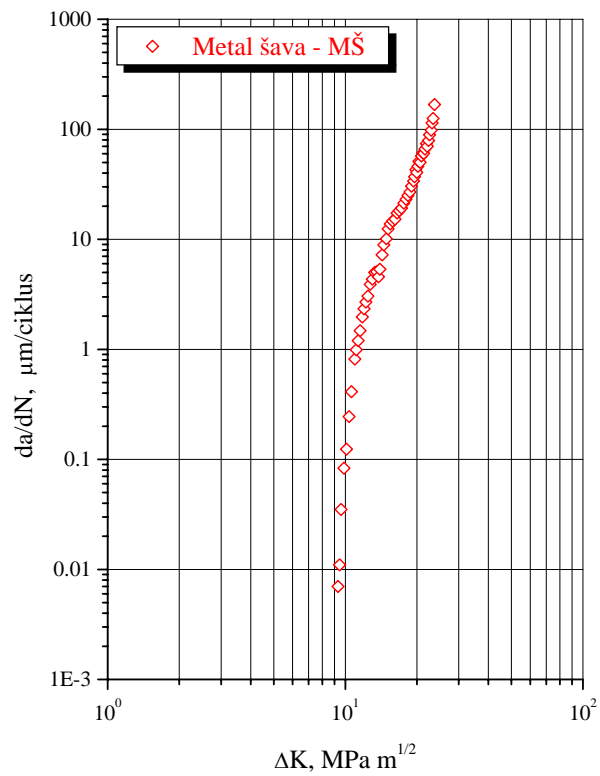
$$f(a/W) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right] \quad (2)$$

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

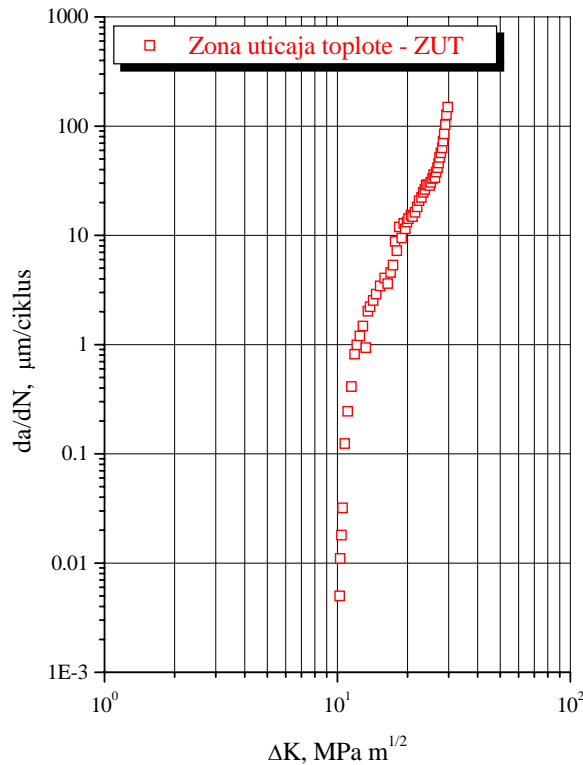
Na osnovu toka ispitivanja izračunavaju se i crtaju zavisnosti $\log da/dN = \log (\Delta K)$. Dijagrami brzina rasta zamorne prsline, da/dN - promjena opsega intenziteta napona, ΔK , za ispitivane uzorke dati su na slici 5 za epruvetu sa zarezom u OM, slici 6 za epruvetu sa zarezom u MŠ i na slici 7 za epruvetu sa zarezom u ZUT. U tabeli 3 date su vrijednosti koeficijenata C i m za epruvete sa zarezom u OM, MŠ i ZUT [2].



Slika 5. Dijagram zavisnosti $da/dN - \Delta K$ epruvete OM [2]



Slika 6. Dijagram zavisnosti $da/dN - \Delta K$ epruvete MŠ [2]



Slika 7. Dijagram zavisnosti $da/dN - \Delta K$ epruvete ZUT [2]

Tabela 3. Koeficijenti u Parisovoj jednačini za epruvetu OM [2]

Mjesto postavljanja zareza	Koeficijent C	Koeficijent m	ΔK_{th} , MPa m ^{1/2}
OM	$3.51 \cdot 10^{-12}$	3.4	9.6
MŠ	$8.16 \cdot 10^{-12}$	3.2	9.3
ZUT	$1.47 \cdot 10^{-12}$	3.1	10.1

5. ANALIZA REZULTATA

Ispitivanja su izvedena na epruvetama sa zarezom u karakterističnim zonama zavarenog spoja. U tabeli 3. su prikazane dobijene vrijednosti praga zamora za sve tretirane uzorke. Kako se vidi mjesto postavljanja zareza i inicijacije prsline ima uticaja na vrijednosti praga zamora ΔK_{th} i parametre Parisove jednačine. Žilavost zavarenog spoja treba povezati sa promjenom nagiba dijela krive u zoni važenja Parisovog zakona. Sporiji rast je potvrđen kod uzoraka sa prslinom u ZUT i OM, jer za istu brzinu rasta zahtijeva veći opseg faktora intenziteta napona. Kod većih vrijednosti K_{Ic} potrebna je veća brzina rasta zamorne prsline za prelaz u područje krtog loma. Posmatrajući zavareni spoj niskolegiranog čelika uočava se da je za metal šava brzina prelaska u krti lom nešto niža u odnosu na OM i ZUT što je i očekivano jer je u MŠ i niža vrijednost K_{Ic} . 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. Ako se vrijednost žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} unese u dijagrame na slikama od 5 do 7 mogu se procijeniti brzine rasta zamorne prsline pri kojima će proces zamora ustupiti mjesto razvoju krtog loma pri različitim nivoima opterećenja. Pri većem opterećenju će nastupiti i nepovoljnija situacija jer mala opterećenja ne mogu izazvati tolike brzine rasta zamorne prsline da se približe nivou faktora intenziteta napona koji je potreban za stvaranje krtog loma [2].

6. ZAKLJUČAK

Za eksploatacionu sigurnost konstrukcija procesne opreme 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, ΔK_{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 i OM.

7. REFERENCE

- [1] Burzić Z., Sedmak S., Manjgo M.: Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva, Integritet i vek konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.
- [2] Bišćević N.: Mogućnosti primjene koncepta integriteta konstrukcije na spremnost za upotrebu posuda pod pritiskom, Magistarski rad, Tehnički fakultet, Bihać, 2012.
- [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] PARIS P.C., HAYDEN B.R.: A New System for Fatigue Crack Growth Measurement and Control, ASTM Symposium on Fatigue Crack Growth, Pittsburg, 1989.