



Aleksandar Sedmak <sup>1,a</sup>, Snežana Kirin <sup>2,b</sup>, Tamara Golubović <sup>2,c</sup>

## OCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM PARAMETERA MEHANIKE LOMA I ANALIZE RIZIKA

### STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED JOINTS USING FRACTURE MECHANICS PARAMETERS AND RISK BASED APPROACH

#### Stručni rad / Professional paper

#### Rad primljen / Paper received

Avgust 2024.

#### Rad prihvaćen / Paper accepted

Februar 2025.

#### Adresa autora / Author's address

<sup>1</sup> Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, Srbija

<sup>2</sup> Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd, Kraljice Marije 16, Srbija

#### Email / ORCID ID

<sup>a</sup> asedmak@mas.bg.ac.rs / 0000-0002-5438-1895

<sup>b</sup> / 0000-0002-2176-3969

<sup>c</sup> / 0000-0001-8283-1104

**Ključne reči:** integritet konstrukcije, zavareni spojevi, parametri mehanike loma, matrica rizika

**Keywords:** structural integrity, welded joints, fracture mechanics parameters, risk matrix

#### Rezime

Prikazana je procena integriteta zavarenih spojeva, na osnovu proračuna parametara mehanike loma i analize rizika korišćenjem matrice rizika, sa ciljem poboljšanja bezbednosti zavarenih konstrukcija. Kao studija slučaja prikazana je posuda pod pritiskom, sa defektima tipa prsline, neprihvatljivim prema standardu. Parametar linearne elastične mehanike loma, faktor intenziteta napona,  $K_I$ , određen je konzervativnim i pojednostavljenim postupkom, dok je njegova kritična vrednost, žilavost loma, preuzeta iz prethodnih eksperimentalnih istraživanja. Plastični kolaps je takođe uzet u obzir da bi se konstruisao dijagram procene loma i procenila verovatnoća loma, tako da se matrica rizika može dobiti znajući posledice loma.

#### Abstract

Structural integrity assessment of welded joints is presented, based on calculation of fracture mechanics parameters and risk analysis by using risk matrix, with an aim to improve safety of welded structures. As a case study, pressure vessel is presented, with crack-like defects, non-acceptable according to standard. Linear elastic fracture mechanics parameter, the stress intensity factor,  $K_I$ , was determined by the conservative and simplified procedure, whereas its critical value, the fracture toughness, was taken from previous experimental investigations. Plastic collapse was also taken into account to construct the Failure Assessment Diagram and to estimate failure probability, so that risk matrix can be obtained knowing also the consequence of failure.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



## 1. Uvod

S tačke gledišta integriteta konstrukcija zavareni spojevi su suštinske važnosti za bezbedan rad zavarenih konstrukcija jer su kritična mesta sa smanjenom otpornošću na nastanak i rast prslina u odnosu na osnovni metal. Stoga se procena integriteta zavarenih konstrukcija svodi na procenu integriteta zavarenih spojeva, odnosno primenu parametara mehanike loma [1]. Postoje mnogobrojne metode primene parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija [1-4], od inženjerskih procedura, zasnovanih na jednostavnim empirijskim izrazima za određivanja parametara mehanike loma, do sofisticiranih postupaka koji uključuju i detaljnu analizu naponskog stanja komponente sa prslinom, po pravilu metodom konačnih elemenata [5].

U ovom radu će biti primenjena jednostavna inženjerska procedura, zasnovana na primeni dijagrama analize loma (Failure Analysis Diagram – FAD), koja može na konzervativan način da proceni integritet komponente jednostavne geometrije kao što je cevovod, odnosno cilindrična posuda pod pritiskom. Ova procedura je uvedena i detaljno opisana u doktorskoj disertaciji trećeg autora [6], a uz dodatnu analizu rizika, koji daje celinu potrebnu menadžmentu za donošenje odluke kada se pojavi problem grešaka u zavarenim spojevima koje su neprihvatljive po standardu, kao što je pokazano na primeru posuda za komprimovani vazduh u

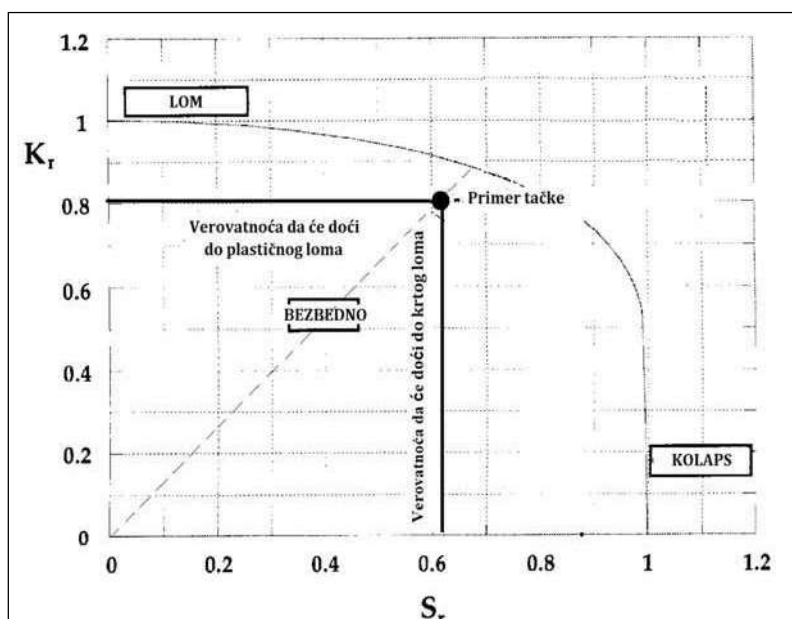
reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHE BB) [7]. U ovom radu je navedena inženjerska procedura primenjena na napojni cevovod u RHE BB, kao ilustracija mogućnosti njene upotrebe u kontroli stanja opreme pod pritiskom posle dugotrajne eksploatacije. Potreba za ovakvom analizom proističe iz činjenice da je cevovod napravljen od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće Sumiten 80P debljine 47 mm, sa smanjenim stepenom sigurnosti [2,8], što je zahtevalo procenu spremnosti za upotrebu (fitness-for-purpose) u fazi projektovanja, kao preteču procene integriteta [2].

## 2. Primena parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija i verovatnoće događaja

Dijagram analize loma se konstruiše definicijom bezdimenzionih promenljivih  $S_r = \sigma_n / \sigma_c$  i  $K_r = K_I / K_{Ic}$ , a nakon primene Dagejlovog modela tečenja trake [9] se dobija granična kriva (Slika 1):

$$K_r = S_r \left[ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left( \frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

gde  $\sigma_n$  predstavlja napon u neto preseku,  $\sigma_c$  kritični napon (obično poluzbir napona tečenja i zatezne čvrstoće),  $K_I$  faktor intenziteta napona ( $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$ , gde su  $Y$  i  $a$  poluduzina prslina i geometrijski parametar) i  $K_{Ic}$  žilavost loma.



Slika 1. Dijagram analize loma (FAD)

Figure 1. Failure analysis diagram (FAD)



Primena FAD se zasniva na određivanju koordinata radne tačke ( $S_r$ ,  $K_r$ ), pri čemu njen položaj u odnosu na graničnu krivu definiše integritet. Ako je materijal potpuno žilav, konstrukcija se lomi plastičnim kolapsom pri  $S_r \geq 1$ , dok se krti lom konstrukcije dešava pri  $K_r \geq 1$ . U ostalim slučajevima postoji međudejstvo plastičnog i krtog ponašanja materijala, tako što je integritet konstrukcije obezbeđen ukoliko je radna tačka „ispod“ granične krive. U slučaju da je radna tačka „iznad“ granične krive, moguć je mešoviti lom.

Takođe, FAD pruža mogućnost kvantifikacije verovatnoće loma, kao što je prikazano na primeru radne tačke ucrtane na Slici 1. Naime, očigledno je

da što je tačka bliže graničnoj krivoj tim je i verovatnoća loma bliža 1, tako da je njen položaj u odnosu na graničnu krivu takođe i merilo verovatnoće, što će biti korišćeno u ovom radu, a detaljnije je opisano u [5, 10].

### 3. Procena rizika

Rizik može da se jednostavno odredi na osnovu verovatnoće neželjenog događaja i njegove posledice, primenom matrice rizika [5, 11]. U Tabeli 1 je definisano kako se kvantifikuje posledica, a određivanje verovatnoće je već prikazano u prethodnom poglavlju. Primer korišćenja matrice rizika je dat u sledećem poglavlju na primeru napojnog cevovoda RHE BB.

**Tabela 1. Matrica rizika [12]**

**Table 1. Risk matrix [12]**

	Posledice				Verovatnoća događaja				
	Ljudi	Imovina	Životna sredina	Reputacija	1	2	3	4	5
					Zanemarljiva	Mala	Umerena	Srednja	Velika
0	Nema povreda	Nema gubitka	Nema oštećenja	Nema povreda					
1	Beznačajne povrede	Gubitak do 10 hiljada EUR	Malo oštećenje okoline	Beznačajne posledice. Postoji svest među zaposlenima i stanovništvu.		<b>MALI RIZIK</b>			
2	Male povrede	Gubitak 180.000 do 540.000 EUR	Umerene posledice. Manje oštećenje okoline. Manji trosak.	Male posledice. Postoji zabrinutost na lokalnom nivou.					
3	Ozbiljne povrede	Gubitak od 540.000 do 1,8 miliona EUR	Srednje posledice. Ograničeno oštećenje okoline (finansijska investicija).	Umerene posledice. Postoji zabrinutost na regionalnom nivou			<b>SREDNJI RIZIK</b>		
4	Permanentna nesposobnost	Gubitak od 1,8 do 50 miliona EUR	Velike posledice. Ozbiljne štete za okolinu. Velike investicije.	Srednje posledice. Postoji zabrinutost na nacionalnom nivou.					
5	Smrt	Gubitak preko 50 miliona EUR	Ogromne posledice. Dugotrajno i značajno oštećenje okoline. Ogroman trošak.	Ogromne. Postoji zabrinutost i reakcija na međunarodnom nivou.			<b>VELIKI RIZIK</b>		



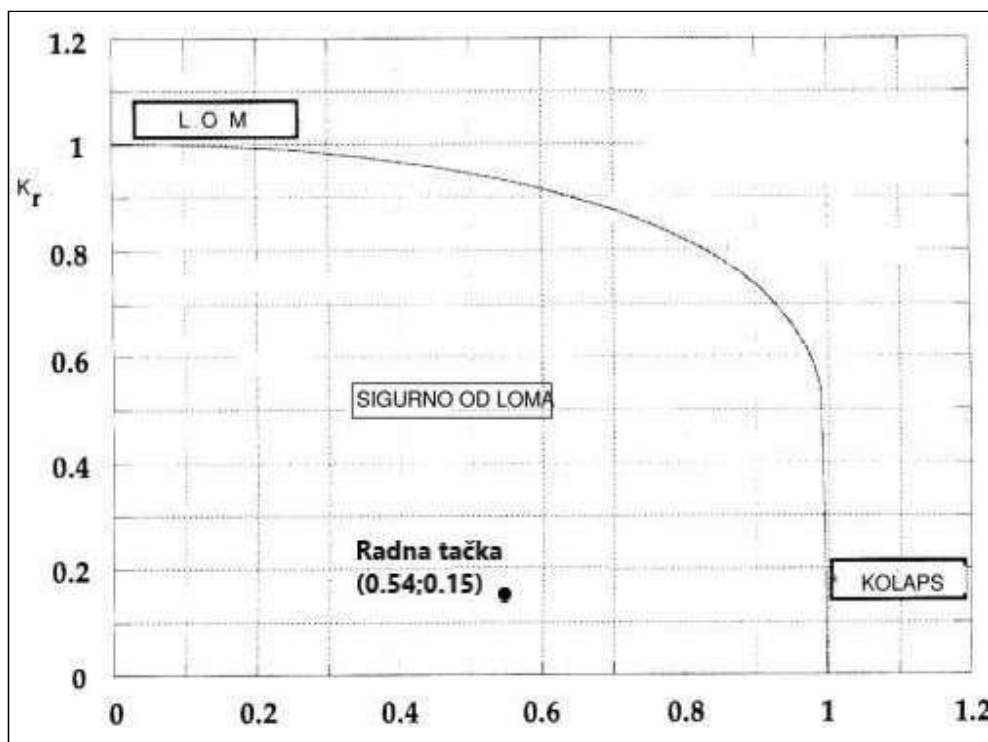
#### 4. Rezultati i diskusija

Napojni cevovod je analiziran detaljno u [2, 8], tako da se u ovom radu navode samo osnovni podaci koji su korišćeni za procenu verovatnoće i posledice.

Eventualnu posledicu je relativno jednostavno proceniti jer se svakako radi o kategoriji 5, pošto bi lom cevovoda mogao da izazove sve što je navedeno u Tabeli 1 za tu kategoriju. Za procenu verovatnoće merodavne veličine su:

- Obimski napon 402 MPa (prečnik 4200 mm, pritisak 9 MPa, debljina 47 mm), napon tečenja metala šava 700 MPa i zatezna čvrstoća 800 MPa (poluzbir 750 MPa). Ako se pretpostavi neprovar debljine 4 mm, kao tipična greška za podužne zavarene spojeve velike debljine koji se rade u nekoliko prolaza, onda se za X koordinatu dobija  $S_r = \sigma_r / \sigma_c = 402 / 750 = 0.54$ .
- $K_{Ic} = 212 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  za metal šava ( $K_{Ic} = 255 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  za osnovni metal),  $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} = 31.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ( $Y=1$  za centralnu prslinu), pa se za Y koordinatu dobija  $K_I / K_{Ic} = 0.15$ .

Radna tačka sa koordinatama (0.54, 0.15) je prikazana na sl. 2, a na osnovu čega je verovatnoća procenjena kao umerena (0.55).



Slika 2. Radna tačka u FAD

Figure 2. Assessment point in the FAD

Na osnovu podataka za verovatnoću (umerena) i posledicu (kategorija 5) napravljena je matrica rizika (Tabela 2) koja ukazuje na veliki rizik pri radu

cevovoda sa greškom tipa neprovar veličine 4 mm po celoj dužini šava.

**Tabela 2. Matrica rizika za cevovod RHE BB****Table 2. Risk matrix for RHE BB pipeline**

		Verovatnoća				
		1	2	3	4	5
		Zanemarljiva	Mala	Umerena	Srednja	Velika
Posledica	1					
	2					
	3					
	4					
	5			<b>Cevovod RHE BB</b>		

Na osnovu procenjenog rizika odluku o daljem postupku donosi menadžment vlasnika opreme, imajući u vidu i mogućnosti zamene, popravke i posledice zastoja u ta dva slučaja. U već pomenutom slučaju posuda za komprimovani vazduh u RHE BB [10], odluka je bila da se nastavi sa radom kod srednjeg rizika, a da se posebnim postupkom smanji veliki rizik na srednji, kao što je opisano u [13].

Treba naglasiti da je značaj ove procedure u pripremi potrebnih analiza za redovni remont i primenu IBR fokusiranu na greške koje mogu da budu kritične. Prikazani primer je fiktivan, dok je stvarna analiza neprihvatljivih grešaka, utvđenih na osnovu IBR ispitivanja, prikazana u slučaju posuda za komprimovani vazduh u RHE BB [14]. Ova procedura može da se primeni i u fazi projektovanja da bi se unapred znalo kakav je stvarni uticaj neprihvatljivih grešaka, imajući u vidu da je klasično projektovanje izrazito konvencionalno.

## 5. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata može da se zaključi sledeće:

- Jednostavna inženjerska procedura procene integriteta daje realne rezultate i korisne podatke ako se primeni na zavarene konstrukcija jednostavnog oblika i naponskog stanja, kao što je napojni cevovod RHE BB.
- Procena rizika daje dobru osnovu za donošenje odluka o daljem postupanju u slučaju da se metodama IBR utvrde neprihvatljive greške u zavarenim spojevima.

## 5. Conclusion

Based on the presented results, the following conclusions can be drawn:

- A simple engineering integrity assessment procedure provides realistic results and useful data when applied to welded structures with simple geometries and stress states, such as the RHE BB feed pipeline.
- Risk assessment serves as a solid foundation for decision-making regarding further actions if NDT methods identify unacceptable defects in welded joints.

**Literatura / References**

- [1] Sedmak, A. (2003), Primena mehanike loma na integritet konstrukcija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [2] Sedmak, A., Sedmak, S., Milović, Lj., (2011), Pressure Equipment Integrity Assessment by Elastic-Plastic Fracture Mechanics Methods, Society for Structural Integrity and Life, Belgrade
- [3] N. Gubelj, J. Predan, I. Rak, D. Kozak, (2009), Integrity assessment of HSLA steel welded joint with mis-matched strength, Structural Integrity and Life, 9(3), 157-164
- [4] Anderson, T.L., (2017), Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 4<sup>th</sup> Edition, CRC Press
- [5] Martić, I., (2018), Uticaj ispitivanja probnim pritiskom na nastanak i rast prslina u zavarenim spojevima opreme pod pritiskom, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [6] Golubović, T., (2018), Integracija ljudskih i organizacionih faktora u model procene rizika i integriteta opreme pod pritiskom, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija
- [7] Jovičić, R., Jeremić, L., Milošević, N., Sedmak, A., Milovanović, N., (2021), Repair welding of pressure equipment with unacceptable defects, Structural Integrity and Life, 21(2), 163-167
- [8] Jeremić, L., (2020), Procena integriteta zavarenih konstrukcija projektovanih sa smanjenim stepenom sigurnosti, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [9] Dugdale D.S., (1960), Yielding in Steel Sheets Containing Slits. J Mech Phys Solids, 8(2), 100–104
- [10] Golubović, T. et al., (2018), Novel Risk Based Assessment of Pressure Vessels Integrity, Tehnički vjesnik, 25(3), 803-807
- [11] Đorđević, P., Kirin, S., Sedmak, A., Džindo, E., (2011), Analiza rizika integriteta konstrukcija, Structural Integrity and Life, 1(2), 134-138
- [12] Vučetić, I. et al., (2018), Risk Analysis in the Case of Air Storage Tank Failure at RHPP Bajina Bašta, Structural Integrity and Life, 18(1), 3-6
- [13] Vučetić, T. et al., (2022), Stiffener as a special design solution for pressure vessel repair, Structural Integrity and Life, 22(2), 263-266
- [14] Sedmak, A. et al., (2021), How to deal with cracked welded structure – Application of Fracture Mechanics parameters to Structural Integrity Assessment, ASR International Conference "Welding 2021", Resice, Czech Republic

**Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS**

**je referenca za Vaš profesionalni status**

**Odlukom Skupštine DUZS članarina za 2025. godinu iznosi**

**5.000,00 dinara**

**Uplatom članarine stičete pravo na GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"**

**Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46**

**Informacije**

**+ 381 (11) 2420-652**

**duzs011@gmail.com**

