



Mirza Manjgo<sup>1,a</sup>, Luka Ferlič<sup>1,b</sup>, Nenad Gubelj<sup>1,c</sup>, Tomaž Vuherer<sup>1,d</sup>

# PROCENA I POREĐENJE NOSIVOSTI ZAVARENOG SPOJA SA POLUELIPTIČNOM PUKOTINOM ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE ZAVARENOG RAZLIČITIM TEHNOLOGIJAMA ZAVARIVANJA

## ASSESSMENT AND COMPARISON OF THE BEARING CAPACITY OF A WELDED JOINT WITH A SEMI-ELLIPTICAL CRACK OF HIGH-STRENGTH STEEL WELDED USING DIFFERENT WELDING TECHNOLOGIES

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

**Rad primljen / Paper received**

Avgust 2024.

**Rad prihvaćen / Paper accepted**

Februar 2025.

**Adresa autora / Author's address**

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17. 2000 Maribor, Slovenija

**Email / ORCID ID**

<sup>a</sup> / 0009-0009-2944-0820

<sup>b</sup> / 0000-0002-3985-4711

<sup>c</sup> / 0000-0002-3276-8431

<sup>d</sup> tomaz.vuherer@um.si / 000-0002-1866-8266

**Ključne reči:** S960MC, mehaničke karakteristike,  $K_{JIC}$ , SINTAP, FAD.

**Keywords:** S960MC, mechanical properties,  $K_{JIC}$ , SINTAP, FAD.

### Rezime

Procena nosivosti zavarenog spoja (svih njegovih zona) čelika visoke čvrstoće ima važnu ulogu za sigurno upotrebu zavarene konstrukcije. Zavareni spoj predstavlja ključni problem zbog heterogenosti, mehaničkih i eksploatacijskih karakteristika, kao i prisustvo greške tipa prsline. Ponašanje zavarenog spoja sa prslinom je nepredvidljivo zbog djelovanja mnogih faktora na njega. Sa ciljem boljeg definisanja ponašanja osnovnog materijala i njegovog zavarenog spoja, potrebno je izvesti odgovarajuća ispitivanja. U ovom radu predstavljeno je određivanje nosivosti zavarene ploče (S960MC) sa polueliptičnom prslinom u zoni uticaja toplote (ZUT) pri čemu su upoređivane dve tehnologije zavarivanja: elektronski i laserski snop. Ekperimentalno je izmerena tvrdoća materijala, nakon čega su određene mehaničke karakteristike materijala primenom korelacijskih jednačina. Korišćenjem standarda ASTM E1820 za savijanje epruvete u tri tačke, dobijeni su rezultati žilavosti materijala. Na kraju, koristeći sve proračune, metodom SINTAP su analitički određene kritične sile, pri kojima bi došlo do pojave loma konstrukcije.

### Abstract

Assessment of the bearing capacity of the welded joint (all its zones) of high-strength steel has an important role for the safe use of the welded structure. The welded joint represents a key problem due to heterogeneity, mechanical, and operational properties, as well as the presence of a crack-type defects. The behaviour of a welded joint with a crack is unpredictable due to the influence of many factors. To better understand the behaviour of the base material and its welded joint, it is necessary to carry out appropriate tests. This study presents the determination of the bearing capacity of a welded plate (S960MC) with a semi-elliptical crack in the heat affected zone (HAZ), comparing two welding technologies: electron and laser beam. The hardness of the material was measured experimentally and the mechanical properties of the material were determined using correlation equations. Then, as per ASTM E1820 standard for bending the test specimens in three points, the results of the material toughness were obtained. Finally, using all the calculations, the SINTAP method was used to analytically determine the critical forces that would cause the structure to break.

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

Procena nosivosti zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće ima važnu ulogu za sigurnu upotrebu zavarene konstrukcije. Primena S960MC čelika visoke čvrstoće se odnosi na pouzdane konstrukcije proizvedene tehnologijom zavarivanja poput delova šasije i karoserije železničkih vozila, delova građevinskih strojeva, kranova itd. Zavareni spoj kao najveći koncentrator napona predstavlja ključni problem zbog heterogenosti strukturnih, mehaničkih i eksploatacijskih karakteristika, kao i prisustva grešaka tipa prslina. Dosadašnja iskustva ukazuju da je ponašanje zavarenog spoja sa prslinom nepredvidljivo, s obzirom na delovanje brojnih uticajnih faktora: zaostali naponi pri zavarivanju, geometrijska odstupanja, mikrostrukturna heterogenost i veličina prsline. Prema tome, procena nosivosti zavarene čelične konstrukcije u mnogome zavisi od sveobuhvatne analize zavarenog spoja kao najkritičnijeg mesta u svakoj konstrukciji [1-3]. Cilj ovog rada je procena nosivosti zavarenih spojeva s polueliptičnom prslinom u ZUT-u proizvedenih sa dve različite tehnologije zavarivanja: elektronski i laserski snop (na dijagramima u radu, plava boja će označavati laserski snop, a crvena boja uzorke elektronskog snopa).

■ L – laserski snop      ■ E – elektronski snop

Jedna od metoda za procenu nosivosti konstrukcije je SINTAP metoda, odnosno dobijanje FAD dijagrama iz kojeg se procenjuje vrednost kritične sile pri kojoj bi trebalo da se dostigne lom konstrukcije. Procenjena vrednost sile se upoređuje sa eksperimentalom vrednošću sile pri kojoj je došlo do loma, a koja je utvrđena primenom testa na jednoosno zatezanje. Da bi se primenila SINTAP metoda odnosno konstruisao FAD dijagram potrebni su ulazni podaci dobijeni eksperimentalnim putem. Potrebni podaci sumehanička svojstva  $R_{p0.2}$  (napon tečenja),  $R_m$  (zatezna čvrstoća),  $K_{JIC}$  (žilavost loma) i geometrija prsline u zavarenom poju.

Pomenuti čelik S960MC spada u grupu čelika visoke čvrstoće sa visokim  $R_{p0.2}$  (700-1300 MPa), zbog čega se mogu opteretiti znatno većim opterećenjima ili se presek profila može smanjiti u odnosu na obične konstruktivne čelike.

## 2. Eksperimentalni deo

### 2.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten za eksperiment je termomehanički obrađen čelik S960MC, a njegov hemijski sastav i mehanička svojstva su prikazani u Tabeli 1 [4-6].

**Tabela 1.** Hemijski sastav (mas. %) i mehanička svojstva čelika S960MC [6]

**Table 1.** Chemical composition (wt.%) and mechanical properties of S960MC steel [6]

Čelik S960MC	C	Si	Mn	P	Al	Nb	V	Ti	B	S
Hemijski Sastav	0.091	0.06	1.11	0.011	0.034	0.002	0.011	0.019	0.005	0.001
	Cu	Cr	Ni	Mo	N					
	0.012	1.1	0.05	0.123	0.005					
Mehaničke karakteristike	Smer valjanja		$R_{p0.2}$ [MPa]		$R_m$ [MPa]		Izduženje preloma (%)		Udarna žilavost na 20°C [J]	
	Uzdužni		≥960		980-1250		≥7		40	
	Poprečni		988		1014		10,9		74	

### 2.2. Izračunavanje mehaničkih svojstava materijala iz korelacijskih jednačina za merenje tvrdoće

U poslednjim decenijama uloženo je dosta napora da se korelira odnos između izmerene tvrdoće i čvrstoće materijala. Engleski naučnik David Tabor je predložio složen odnos između krajnje sile zatezanja  $\sigma_B$  i mikrotvrdoće H, uzimajući u obzir koeficijent deformacijskog stvrdnjavanja n. Tako su postavljene korelacijske jednačine kojima se na osnovu izmerene tvrdoće može dobiti napon

tečenja  $\sigma_s$  ( $R_{p0.2}$ ) prema jednačini 2.1 i zatezna čvrstoća  $\sigma_B$  ( $R_m$ ) prema jednačini 2.2. Challenger i Moteff su dali empirijski izraz za određivanje koeficijenta deformacijskog stvrdnjavanja (jednačina 2.3), uzimajući u obzir veličine subzrna koja iznosi  $\lambda=30 \mu\text{m}$ . Vrednost mikrotvrdoće H se računa preko izmerenih vrednosti tvrdoće HV po jednačini 2.4, dok je vrijednost k konstanta i iznosi 0.2 [7, 8].



$$\sigma_s = \left(\frac{H}{3}\right) \cdot (0.1)^n \quad (2.1)$$

$$\sigma_B = \frac{H}{2.9} \cdot \left(\frac{n}{0.217}\right)^n \quad (2.2)$$

$$n \cdot \lambda = k \quad (2.3)$$

$$H = HV \cdot \frac{9.81}{1000} \quad (2.4)$$

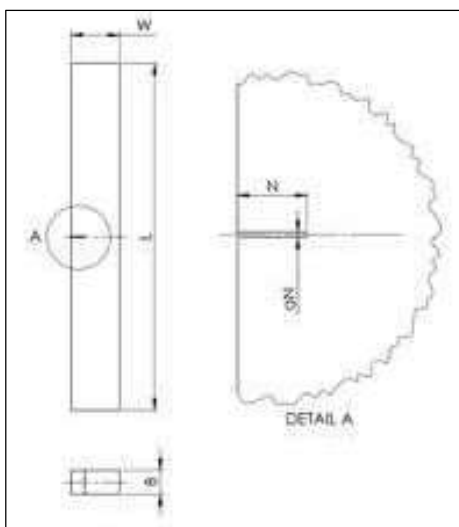
### 2.3. Određivanje žilavosti materijala prema standardu ASTM E1820

Za procenu integriteta zavarene konstrukcije u eksploataciji potrebno je poznavanje karakteristika loma koji se određuju eksperimentalno, primenom elasto-plastične mehanike loma. Standard ASTM E1820 [9] daje smernice za ispitivanje žilavosti loma savijanjem u tri tačke materijala sa iniciranom pukotinom. Prema odabranoj normalizacijskoj metodi iz pomenutog standarda izrađeni su uzorci (Slika 1, Tabela 2) iz zavarenih ploča sa urezanim zarezom u zoni ZUT-a, kao što je prikazano na Slici 2.

**Tabela 2.** Dimenzije uzoraka za savijanje u tri tačke

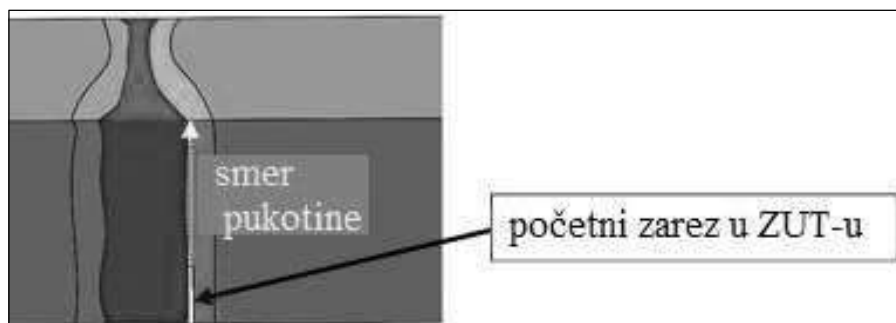
**Table 2.** Dimensions of three-point bending test specimens

Uzorak	Širina $W$ [mm]	Debljina $B$ [mm]	Dužina $L$ [mm]	Dužina zareza $N$ [mm]	Širina zareza $a_N$ [mm]
EMH	14.09	6.49	100	3.73	0.26
LMH	14.14	7.03	100	4.05	0.27



**Slika 1.** Crtež SEB uzorka

**Figure 1.** SEB specimen drawing



**Slika 2.** Prikaz mesta urezivanja zareza

**Figure 2.** Notch placement illustration

Normalizacijska metoda procenjuje dužinu pukotine usporedbom izmerenih i normaliziranih  $F$ - $CMOD$  podataka korištenjem analitičke normalizacijske funkcije. Svaka vrednost opterećenja do  $P_i$ , isključujući maksimalno opterećenje, se normalizira. Sila koja inicira širenje prsline se meri kao funkcija stabilnog rasta prsline, što rezultira  $J$ - $R$  i  $\delta$ - $R$  krivama otpornosti [10].

### 2.4. Određivanje najveće nosivosti konstrukcije s pukotinom

Predviđanje ponašanja konstrukcije na osnovu parametara mehanike loma može se oceniti na temelju dva kriterija: potpuni lom i plastični kolaps. Jedna od procedura koja primenjuje opisane metode je tzv. SINTAP metoda (eng. Structural Integrity Assessment Procedures for European



Industry). Prema SINTAP Metodi, analiza se može zasnovati na dijagramu procene otkaza – FAD (eng. Failure Assessment Diagram). Parametri loma i kolapsa su  $K_r$  i  $L_r$ . Parametar  $K_r$  (formula 2.5) je omer linearno-elastičnog napreznja faktora intenziteta prema žilavosti loma korištenog materijala. Parametar  $L_r$  (formula 2.6) je mera učinka plastičnosti koja meri bliskost s plastičnim popuštanjem konstrukcije. Neophodan kriterijum prihvatljivosti je da se tačka od interesa za procenu nalazi unutar područja omeđenog osama dijagrama procene loma [2, 11, 12]. FAD postupak je izveden po prvom analitičkom nivou za kojeg su poznati granica plastičnosti i zatezna čvrsoća. Prema tome, za proračun funkcije normiranog opterećenja se mogu primeniti jednačine 2.7-2.9.

$$K_r = \frac{K_1}{K_{mat}} \quad (2.5)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (2.6)$$

$$f(L_r) = f(L_r = 1) \times L_r^{\frac{(N-1)}{2N}} \quad (2.7)$$

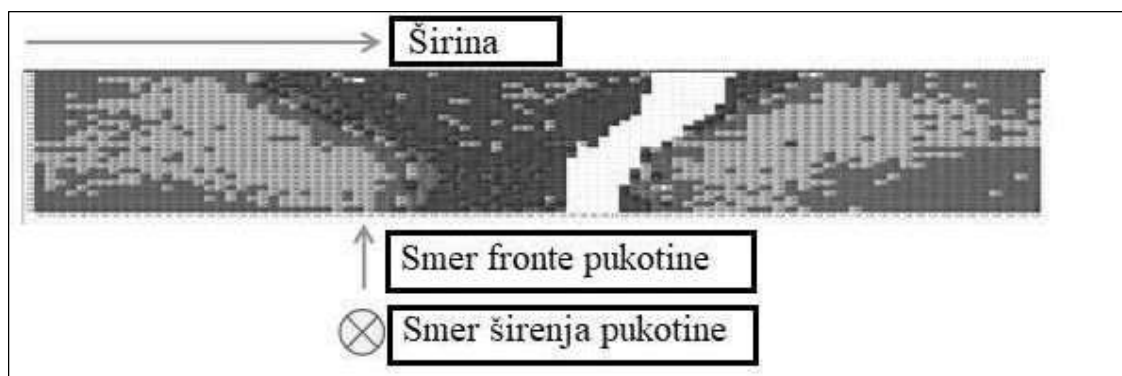
$$N = 0.3 \left[ 1 - \frac{R_{p0.2}}{R_m} \right] \quad (2.8)$$

$$L_{rmax} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{p0.2} + R_m}{R_{p0.2}} \right] \quad (2.9)$$

### 3. Rezultati

#### 3.1. Mehanička svojstva materijala dobijenih primenom korelacijskih jednačina nakon merenja tvrdoće

Merenje tvrdoće dato je u dva smera za uzorke LMB6, LMB8, LMB9, EMB4 i EMB5. Na taj način dobijene su vrednosti tvrdoće na površini materijala kao što je prikazano na Slici 3 za uzorak LMB9, na kojoj je osnovni materijal prikazan zelenom bojom, zona ZUT-a plavom bojom i metal šava crvenom bojom. Računom prema jednačinama 2.1-2.4 dobijene su osnovna mehanička svojstva materijala  $R_{p0.2}$  i  $R_m$ . Rezultati prikazani u Tabeli 3 su prosečne vrednosti svih merenja izvedenih u svakoj zoni posebno.



Slika 3. Rezultati merenja tvrdoće za uzorak LMB9

Figure 3. Hardness measurement results for the LMB9 specimen

Tabela 3. Mehanička svojstva dobijeni na osnovu merenja tvrdoće

Table 3. Mechanical properties obtained from hardness measurements

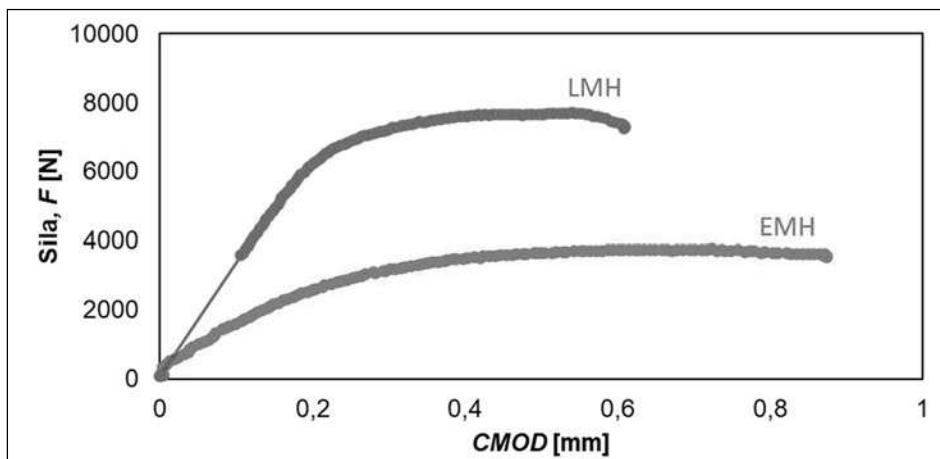
Uzorak	Tvrdoća [HV]			$R_{p0.2}$ [MPa]			$R_m$ [MPa]		
	OM	ZUT	MŠ	OM	ZUT	MŠ	OM	ZUT	MŠ
LMB6	334	388	373	990	1151	1102	1055	1228	1175
LMB8	320	382	363	948	1134	1075	1011	1207	1145
LMB9	320	375	364	949	1108	1079	1011	1191	1149
EMB4	328	388	376	973	1153	1115	1036	1229	1183
EMB5	329	386	377	976	1143	1114	1039	1219	1186



### 3.2. Rezultati žilavosti loma i krive otpornosti

Prema standardu ASTM E1820 [8], na SEB uzorcima eksperimentalno je izmeren zapis F-

CMOD za uzorke LMH i LMH (Slika 4). Eksperiment je izveden na mašini Instron 1255.

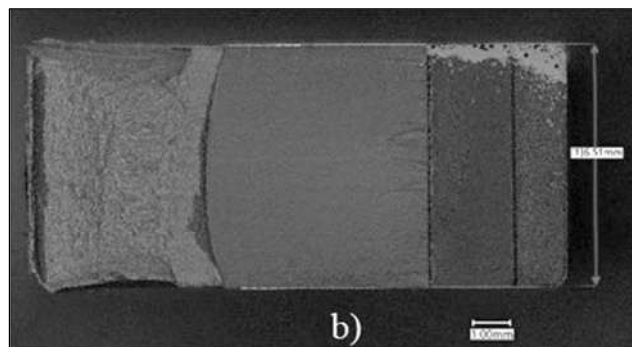
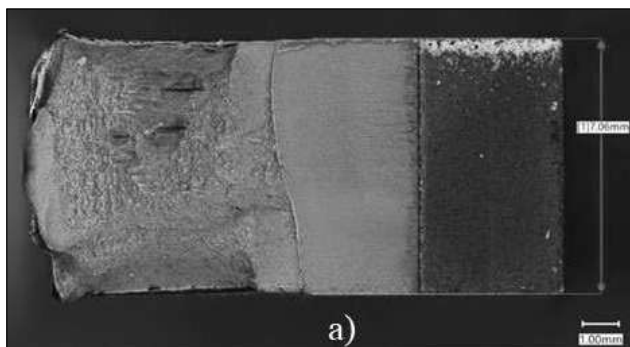


**Slika 4.** F-CMOD dijagram

**Figure 4.** F-CMOD diagram

Nakon loma uzoraka, elektronskim mikroskopom slikane su prelomne površine (strane A) uzoraka prikazane na Slici 5, dok su izmerene vrednosti

prirasta prsline prikazane u Tabeli 4, gde su  $a_0$  – početna dužina prsline i  $a_f$  – inkrement prsline.



**Slika 5.** Prelomne površine SEB uzoraka (strana A): (a) LMH i (b) EMH

**Figure 5.** Fractured surfaces of SEB specimens (side A): (a) LMH and (b) EMH

**Tabela 4.** Vrednosti  $a_0$  i  $a_f$

**Table 4.** Values of  $a_0$  and  $a_f$

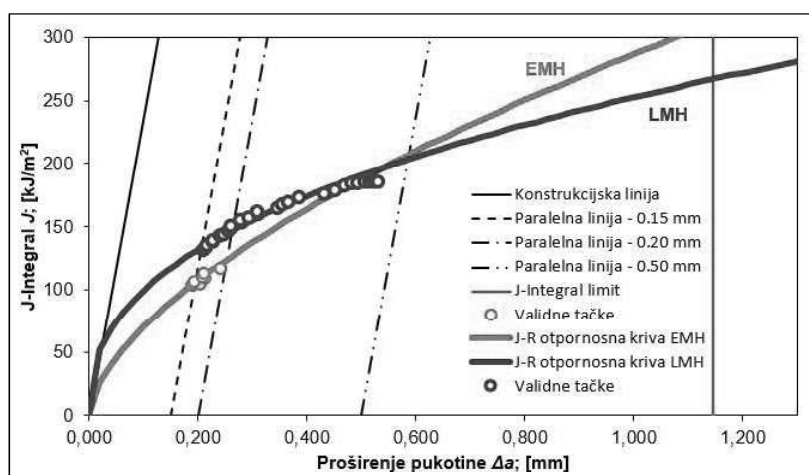
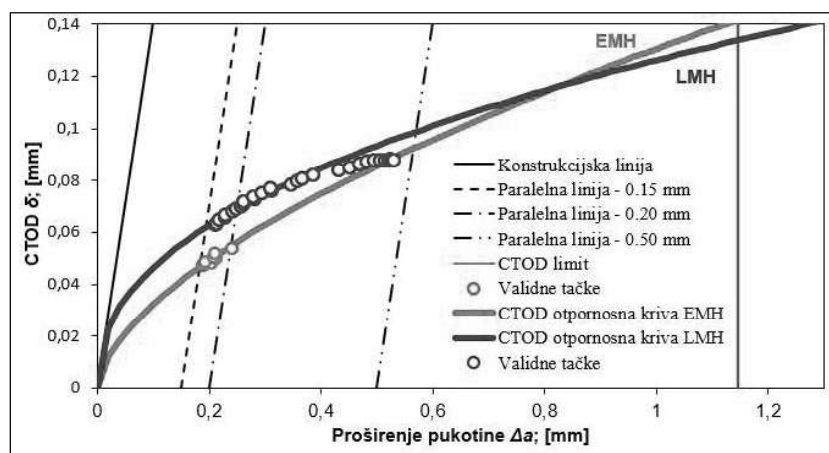
Uzorak	$a_0$	$a_f$
LMH	7.623	8.182
EMH	9.466	9.682

Zatim su računom određeni parametri mehanike loma prikazani u Tabeli 5 i formirane krive

otpornosti  $J-\Delta a$  i  $\delta-\Delta a$  (Slike 6 i 7) za oba postupka zavarivanja.

**Tabela 5.** Vredosti parametara mehanike loma**Table 5.** Values of fracture mechanics parameters

Uzorak:	$J_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\delta_{IC}$ [mm]	$K_{JIC}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	$J_{max}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\delta_{max}$ [mm]
EMH	123,58	0,0548	170,65	208,49	0,0956
LMH	146,7	0,069	185,93	185,23	0,0881

**Slika 6.** J- $\Delta a$  krive otpornosti**Figure 6.** J- $\Delta a$  resistance curves**Slika 7.**  $\delta$ - $\Delta a$  krive otpornosti**Figure 7.**  $\delta$ - $\Delta a$  resistance curves

### 3.3. Odrađivanje nosivosti zavarene ploče

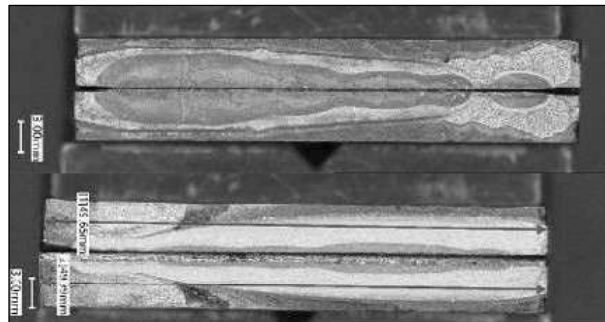
Ploče preseka 50×5 mm (W×B) zavarene su sa različitim postupcima zavarivanja EMC-elektornskim snopom i LMC-laserskim snopom, koje u području ZUT-a sadrže površinsku polueliptičnu prslinu proizvedenu cikličkim zamorom ploče savijanjem u četiri tačke (Slika 8).

Nastale prsline u ispitivanim uzorcima su prikazane na Slici 9, dok je na Slici 10 predstavljena geometrija polueliptične prsline potrebne za proračun po SINTAP metodi. Dimenzije prsline izmerene su mikroskopski i iznosile su

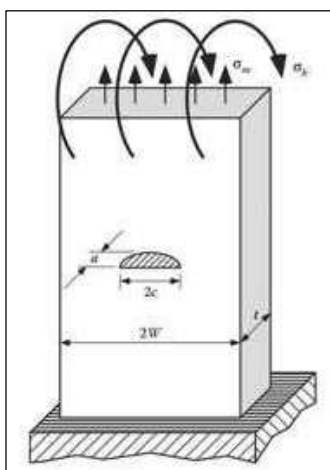
- Za EMC: c=23.79, a=3.69
- Za LMC: c=23.53, a=3.70



**Slika 8.** Ciklični zamor ploča savijanjem u četiri tačke  
**Figure 8.** Cyclic fatigue of plates under four-point bending



**Slika 9.** Zamorna polueliptična pukotina za EMC-gore i LMC-dole  
**Figure 9.** Fatigue semi-elliptical crack for EMC(top) and LMC (bottom)



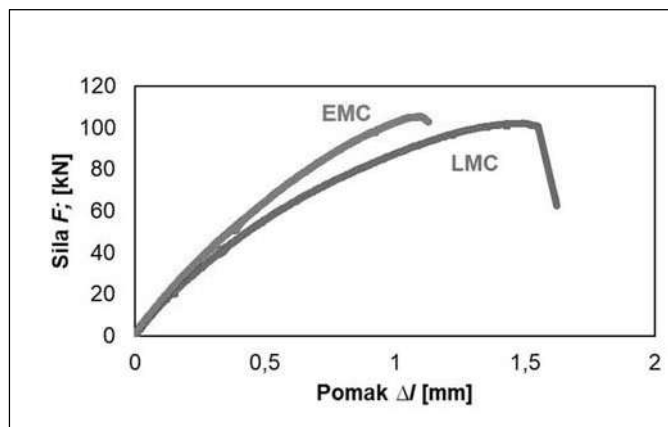
**Slika 10.** Geometrija polueliptične prsline  
**Figure 10.** Geometry of semi-elliptical crack

Ekperimentalnim ispitivanjem na zatezanje na uzorku sa polueliptičnom prslinom snimano je Aramis sistemom kako bi usporedili silu pri kojoj dolazi do loma sa kritičnom silom koja će se dobiti FAD dijagramom. Ispitivanje EMC uzorka na

zatezanje prikazano je na Slici 11. Rezultati ispitivanja na zatezanje predstavljeni su dijagramom na Slici 12, dok su rezultati dati u Tabeli 6.



**Slika 11.** Ispitivanje na zatezanje  
**Figure 11.** Tensile testing



**Slika 12.** Krive zatezanja  
**Figure 12.** Tensile curves

**Tabela 6.** Rezultati ispitivanja na zatezanje**Table 6.** Tensile testing results

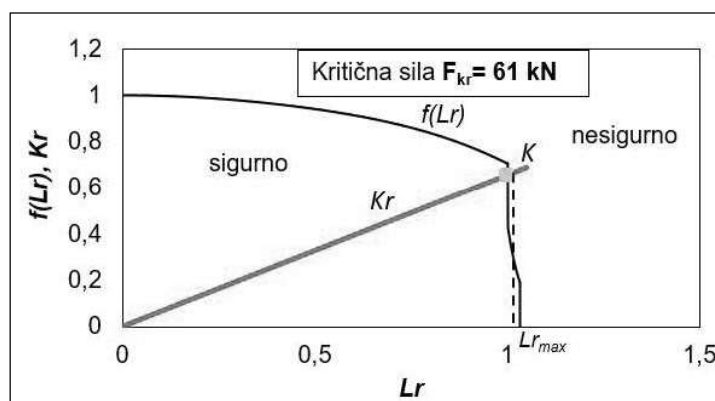
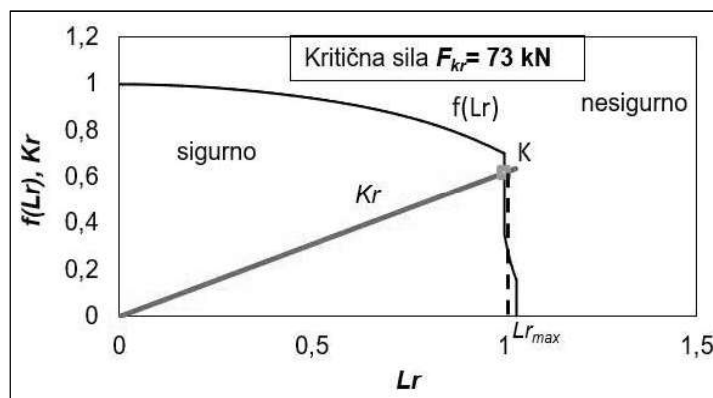
Uzorak	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$F_{max}$ [kN]
EMC	973	1036	105
LMC	990	1055	102

Za proračun kritične sile odnosno konstrukcije FAD dijagrama prema formulama 2.5-2.9, korišćeni su svi prethodno dobijeni rezultati. Vrijednost  $R_{p0,2}$  i  $R_m$  su dobijeni iz merenja tvrdoće u području ZUT-a. Dimenzije polueliptične prsline smo dobili

mikroskopskim merenjem, dok je žilavost loma materijala ( $K_{mat}=K_{JIC}$ ) dobijena iz proračuna u poglavlju 3.2. Podaci uzeti za proračun su prikazani u Tabeli 7, a FAD dijagrami sa dobijenom kritičnom silom su prikazani na Slikama 13 i 14.

**Tabela 7.** Podaci korišćeni za proračun FAD dijagrama**Table 7.** Data used for FAD diagram calculation

Uzorak	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$a$ [mm]	$c$ [mm]	$K_{mat}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	$E$ [GPa]
EMC	1151	1228	23.79	23.79	170.65	210
LMC	1153	1229	23.535	23.535	185.93	210

**Slika 13.** FAD dijagram za EMC**Figure 13.** FAD diagram for EMC**Slika 14.** FAD dijagram za LMC**Figure 14.** FAD diagram for LMC



#### 4. Zaključak

Za procenu nosivosti konstrukcije potrebno je raspolagati sa dovoljno pouzdanim podacima o materijalu. U ovom radu razmatrano je poređenje zone ZUT-a zavarenog spoja između dva procesa zavarivanja: E-elektronski snop i L-laserski snop. Iz niza eksperimenata koju su bili potrebni za dobijane određenih karakteristika materijala vidno je da su bolji rezultati i ocene kod zavarenog spoja L-laserskim snopom.

Na osnovu vrijednosti iz Tabele 3 vidljivo je da su mehaničke osobine,  $R_{p0.2}$  i  $R_m$  dobivene iz korelacijskih jednačina iz izmerene tvrdoće, bolje na uzorcima LMB (zavareno laserskim snopom) u području ZUT-a i metala šava.

Na osnovu dijagrama  $F$ - $CMOD$  (Slika 4), vidljivo je da je kod LMH uzorka (var laserskim snopom) potrebna veća sila (približno dva puta veća sila) za otvaranje pukotine nego kod EMH uzorka (var elektronskim snopom).

Normalizacionim postupkom dobijeni parametri mehanike loma u zoni ZUT-a:  $J_{IC}$ ,  $K_{JIC}$ ,  $\delta_{IC}$  (Tabela 5) su bolji kod uzorka LMH.

Provedenom SINTAP metodom, koja se zasniva na dobijanju FAD dijagrama za procenu otkaza konstrukcije (Slike 13 i 14), dobijena je veća kritična sila na LMC ploči, dok su rezultati dobijeni zateznim eksperimentom (Slika 12) približno jednaki. Takođe, eksperimentalni rezultati su veći od predviđenih vrednosti, što ukazuje na sigurnost procena, tj. da konstrukcija neće da popusti, što je bio i glavni cilj istraživanja.

#### Literatura / References

[1] Jovanović, A., Bakić, G., Golubović, T., Kirin, S., Sedmak, A., (2023), Integrity and risk assessment of reconstructed steam line, *Structural integrity and life*, 23, 3, 367–371

[2] Elkhodbia, M., Barsoum, I., Negi, A., AIFantazi, A., (2024), Machine Learning Augmentation of the Failure Assessment Diagram Methodology for Enhanced Tubular Structures Integrity Evaluation, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 307, 22 August 2024, 110318.

[3] Mijatović, T., Manjgo, M., Burzić, M., Čolić, K., Burzić, Z., Vuherer, T., (2019), Structural integrity assessment from the aspect of fracture

#### 4. Conclusion

To assess the load-bearing capacity of a structure, it is essential to have reliable material data. This study compared the HAZ of welded joints produced using two different welding processes: E – electron beam welding and L – laser beam welding. Based on a series of experiments conducted to determine specific material properties, it was evident that laser beam welding (L) resulted in superior performance and evaluations of the welded joint.

According to the values presented in Table 3, the mechanical properties  $R_{p0.2}$  and  $R_m$ , derived from correlation equations based on hardness measurements, are higher in LMB specimens (laser beam welded) within the HAZ and weld metal.

From the  $F$ - $CMOD$  diagram (Figure 4), it is evident that LMH specimens (laser beam welded) required approximately twice the force to initiate crack opening compared to EMH specimens (electron beam welded).

The normalized fracture mechanics parameters obtained for the HAZ,  $J_{IC}$ ,  $K_{JIC}$ , and  $\delta_{IC}$  (Table 5) indicated superior performance in the LMH specimen.

Using the SINTAP method, which relies on Failure Assessment Diagram (FAD) calculations to evaluate structural failure (Figures 13 and 14), a higher critical force was obtained for the LMC plate, while the results from tensile testing (Figure 12) were comparable. Additionally, the experimental results exceeded the predicted values, confirming the reliability of the assessments and ensuring that the structure will not fail, which was the primary objective of this research.

[4] *mechanics, Structural integrity and life*, 19, 2, 121–124

[5] Keränen, L., Keskitalo, O. N. M., Javaheri, V., Niskanen, J., Kaijalainen, A., Kurvinen, E., (2022), Mechanical properties of welded ultrahigh-strength S960 steel at low and elevated temperatures, *Journal of constructional steel research*, 198, Nov. 2022, 107517

[6] Hrivnjak, I. (1982), *Zavraljivost čelika*, IRO Građevinska knjiga, Beograd

[7] Steimbregger, C., Gubelj, N., Vuherer, T., Enzinger, N., Ernst, W., Chapetti, M., (2022), Effect of Welding Procedure on the Fatigue Behaviour of High-Strength Steel Butt-Welded joints, *Engineering fracture mechanics*, 275, Nov. 2022, 108845



[8] Zhu, M. L., Kuan, F. Z., (2010), Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels, *Materials Science and Engineering A* 527(16-17):4035–4042-527(16-17):4035–4042,

[9] Naib, S., Stefane, P., De Waele, W., Gubelj, N., Hertelé, S., (2018), Calibration of Hardness Transfer Functions Based on Micro Tensile and All Weld Metal Tensile Tests of Heterogeneous Welds, 18th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM18), Brussels, Belgium, 1–5 July 2018. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05372MIG/MAG> – developments in low heat input transfer modes, TWI, dostupno na <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133> (25.08.2022.)

[10] A. S. f. Testing and Materials, ASTM E1820-20ae1: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM, 2020.

[11] Menezes, J. T. O., Ipina, J. E. P., Castrodeza, E. M., (2018), Normalization method for J-R curve determination using SENT specimens, *Engineering fracture mechanics*, 199, Aug. 2018, 658-671

[12] Gubelj, N., *Celovitost konstrukcij*, Maribor 2006

[13] Aboalriha, W., (2021), Application of Failure Assessment Diagram (FAD) for Steel Welded Connection Based on BS7910 and DNV-RP-108, *EJERS, European journal of engineering and technology research*, Aug. 2021 ISSN: 2736-576X, Vol. 6 , Issue 5

## ISPITIVANJE MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA



[www.sigmalab.rs](http://www.sigmalab.rs)



064 2142 473