



Milisav Marković<sup>1</sup>, Dragoslav Dobraš<sup>1,a</sup>, Slaviša Savić<sup>1</sup>, Jovia Ilić<sup>1</sup>

## UTICAJ TERMIČKE OBRADJE NA MEHANIČKA SVOJSTVA NAVAREN OG SPOJA NA ČELIČNOM LIVU G24Mn6

### INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF SURFACE WELD ON STEEL CASTING G24Mn6

#### Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 31. Savetovanja sa međunarodnim učešćem "Zavarivanje 2020" održanog u Kladovu, Srbija od 13. do 16. Oktobra 2021.

#### Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2021.

#### Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2022.

**Ključne reči:** Čelični odlivak, navarivanje, termička obrada, mehanička svojstva

#### Rezime

Pri livenju odlivaka izrađenih od čeličnog liva G24Mn6, zbog grešaka u tehnologiji livenja, mogu nastati nepravilnosti koje je moguće popraviti tehnologijom navarivanja. U konačnici, kvalitet popravljenog odlivka zavisi i od mehaničkih svojstava navarenog spoja. Termička obrada odlivka, koja se izvodi prije i poslije navarivanja, utiče na vrijednost mehaničkih svojstava navarenog spoja. Popravka nepravilnosti nastalih livenjem može se izvoditi kada je odlivak u normalizovanom ili poboljšanom stanju, u zavisnosti od pojave prslina poslije termičke obrade u slučaju da se odlivak navaruje u normalizovanom stanju. U radu su analizirani rezultati uticaja redosljeda izvođenja termičke obrade prije i poslije navarivanja na mehanička svojstva navarenog spoja.

#### 1. Uvod

Čelični livovi kao konstrukcioni materijali danas zauzimaju sve veću upotrebu u različitim granama industrije. S obzirom na njihovu zastupljenost u korištenju, danas se od čeličnih livova izrađuju dijelovi komplikovanog geometrijskog oblika, te je i sama složenost tehnologije livenja ovakvih odlivaka veća. Prilikom izlivanja dijelova složenog oblika, neizbježne su pojave manjih ili većih defekata, čija se popravka uglavnom, ostvaruje tehnologijom navarivanja.

#### Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup> Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Vojvode Stepe Stepanovića 71, 78000 Banja Luka, BiH

<sup>a</sup> E mail: dragoslav.dobras@mf.unibl.org

**Keywords:** Cast steel casting, surfacing, heat treatment, mechanical properties

#### Abstract

When casting casting parts made of cast steel G24Mn6, due to defects in casting technology, imperfections can occur that can be repaired by surfacing technology. Ultimately, the quality of the repaired cast part also depends on the mechanical properties of the surface weld. Heat treatment of the cast part, which is performed before and after surfacing, affects the value of the mechanical properties of the surface weld. Repair of casting imperfections can be performed when the cast part is in the normalized or quenching and tempering condition, depending on the appearance of cracks after heat treatment in case the cast part is surfacing in the normalized state. The paper analyzes the results of the influence of the order of heat treatment before and after surfacing on the mechanical properties of the surface weld.

Kod navarivanja niskolegiranih čeličnih livova, značajnu ulogu na kvalitet i vrijednosti mehaničkih svojstava navarenog spoja ima i vrsta i redosljed izvođenja termičke obrade na odlivku, prije i nakon navarivanja [1 - 3].

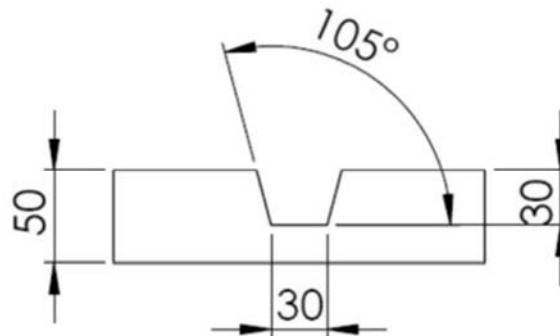
#### 2. Eksperiment

Prilikom izrade uzoraka, za eksperimentalni dio rada, izvršeno je navarivanje uzoraka od niskolegiranih čeličnih liva G24Mn6 [4] u radioničkim uslovima. Navarivanje je vršeno na dva



uzorka, na način da je na uzorcima urađen žlijeb, koji je simulirao defekt nastao obradom livenjem. Na uzorcima u obliku ploče debljine 50 mm

mašinskom obradom, bez uticaja toplote na promjenu strukture, izrađen je žlijeb dubine 30 mm, čije su dimenzije i oblik prikazane na Slici 1.

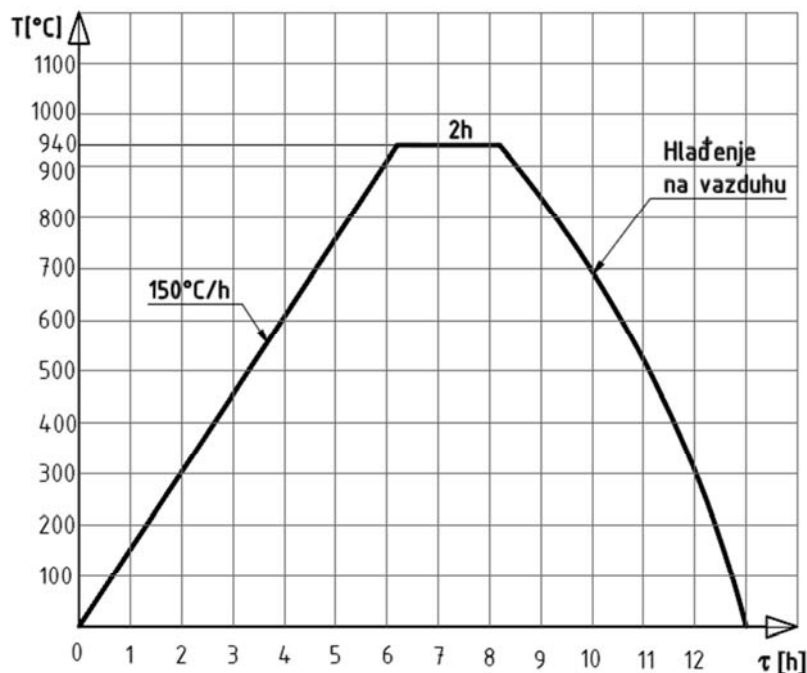


**Slika 1.** Oblik pripreme žlijeba za navarivanje

**Figure 1.** Form of groove preparation for surfacing

Prvi uzorak je navarivan u normalizovanom stanju, dok je drugi uzorka navarivan u poboljšanom stanju. Termička obrada normalizacija čeličnog odlivka G24Mn6 izvedena je na način da je odlivak zagrijan na 940 °C, brzinom zagrijavanja

150 °C/h, vrijeme zadržavanja na temperaturi 940 °C je dva sata, a zatim je uzorak hlađen na vazduhu do sobne temperature. Dijagram termičke obrade normalizacija prikazana je na Slici 2.

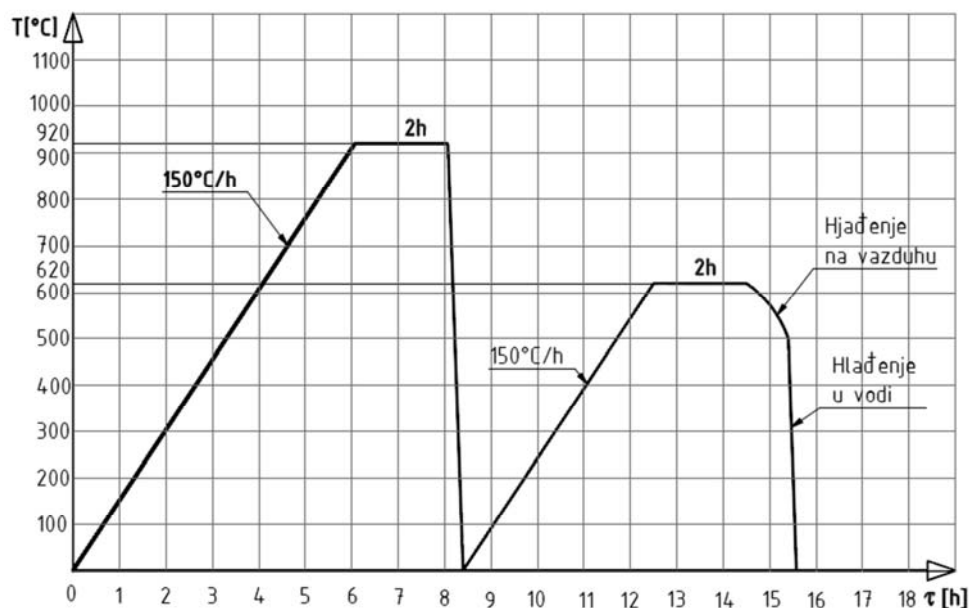


**Slika 2.** Termička obrada normalizacija

**Figure 2.** Heat treatment normalization

Na drugom uzorku od čeličnog liva G24Mn6 izvršena je termička obrada poboljšanje. Uzorak se grije na temperaturu 920 °C, brzinom zagrijavanja 150 °C/h, vrijeme zadržavanja na temperaturi 920 °C je dva sata, a zatim se vrši kaljenje u vodi do sobne temperature. Nakon kaljenje, vrši se visoko

otpuštanje na 620 °C dva sata, brzinom zagrijavanja 150 °C/h. Hlađenje uzorka od 620 °C do 500 °C se vrši na vazduhu, a od 500 °C do sobne temperature hlađenje se vrši u vodi. Dijagram termičke obrade poboljšanje prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Termička obrada poboljšanje

Figure 3. Heat treatment - quenching and tempering

Nakon izrade žlijeba i termičke obrade uzoraka izvršeno je navarivanje uzoraka MAG postupkom u PA položaju. Prije početka navarivanja uzorci su predgrijavani gasnim plamenom, a u toku navarivanja praćena je temperatura između

prolaza. Temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura su praćene IR termometrom.

Hemijaski sastav i mehanička svojstva čeličnog liva G24Mn6, su prikazani su u Tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Hemijaski sastav čeličnog liva G24Mn6 (u mas. %)

Table 1. Chemical composition of cast steel G24Mn6 (in mass. %)

Broj šarže	Oznaka	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%V	%Cu	%Fe
29489/J21	G24Mn6	0.22	0.42	1.58	0.019	0.007	0.11	0.01	0.05	0.007	0.08	ost.

Na osnovu podataka o hemijskom sastavu čeličnog odlivka, izvršen je proračun ekvivalenta ugljenika prema sljedećoj formuli:

$$CE=C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 \quad [\%] \quad (1)$$

Izračunati ekvivalent ugljenika iznosi  $CE=0.51\%$  iz čega se zaključuje da je zavarljivost čeličnog liva otežana, odnosno da je u konkretnom slučaju navarivanje moguće uz primjenu niza tehnoloških mjera.

S obzirir na navedeni ekvivalent ugljenika, potrebno je izračunati sklonost ka pojavi toplih i hladnih prslina koje mogu nastati kao posledica zagrijavanja, zateznih napona, brzine hlađenja, sklonosti materijala ka zakaljivosti i količine difundovanog vodonika.

Jedan od pokazatelja povećane krtosti usljed fazno-strukturnih preobražaja i sklonosti ka pojavi

hladnih prslina je tvrdoća čelika (HV) u zoni uticaja toplote. Smatra se da u slučaju većine niskolegiranih čeličnih materijala neće doći do formiranja krtih faza ukoliko tvrdoća ne prelazi vrijednost  $HV = 350$ . Na osnovu hemijskog sastava čeličnog liva i empirijske formule moguće je odrediti vrijednosti tvrdoće HV.

$$HV=90+1050 \times C + 47 \times Si + 75 \times Mn + 30 \times Ni + 31 \times Cr \quad (2)$$

Izračunata vrijednost  $HV=463 > 350$ , te se može zaključiti da je čelični liv G24Mn6 sklon ka pojavi hladnih prslina. Sklonost ka obrazovanju toplih prslina, može se odrediti preko empirijskog koeficijenta HCS (hot cracking sensitivity). Ako je  $HCS < 4$ , tople prsline se najvjerojatnije ne obrazuju u metalu šava čeličnih materijala sa  $R_{eH} < 700$  MPa. Mehanička svojstva čeličnog liva G24Mn6 su data u Tabeli 2.



**Tabela 2. Mehanička svojstva čeličnog liva G24Mn6 u poboljšanom stanju**

**Table 2. Mechanical properties of cast steel G24Mn6 after quenching and tempering**

Oznaka	Rp 0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	KV [J]
G18CrMo4+QT	515	657	22	≥ 32 (– 20 °C)

Izračunavanje koefficienta HCS dato je sljedećim obrascem:

$$HCS = \frac{Cx \left[ S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right] \times 10^3}{3xMn + Cr + Mo + V} \quad (3)$$

Izračunata vrijednost koefficienta je  $HCS=1.96 < 4$ , pa se može zaključiti da čelični liv G24Mn6 nije sklon ka pojavi toplih prslina.

Za procjenu opasnosti od prslina uslijed ponovnog zagrijavanja može da se koristi

parametarski izraz lta (lto):

$$P = 10 \times V + 7 \times Nb + 5 \times Ti + 2 \times Mo + Cr + Cu - 2 \quad (4)$$

S obzirom da je koefficient P manji od 0, čelični liv nije sklon pojavi prslina uslijed ponovnog zagrijavanja. Kako je ovaj čelični liv sklon ka pojavi hladnih prslina potrebno je vršiti predgrijavanje čeličnog liva. Temperatura predgrijavanja je izračunata prema metodi Sefarijana:

$$T_{p \text{ G24Mn6}} = 350 \cdot \sqrt{C_{\text{G24Mn6}} - 0.25} = 350 \cdot \sqrt{(0.638 - 0.25)} = 218 \text{ °C} \quad (5)$$

$$C_{\text{G24Mn6}} = CE \cdot (1 + 0.005 \cdot 50) = 0.51 \cdot (1 + 0.005 \cdot 50) = 0.638 \quad (6)$$

Maksimalna međuprolazna temperatura iznosi 300°C za grupu materijala 3.1 prema ISO/TR 15608 [5], u koju spada čelični liv G24Mn6.

Kao dodatni materijal korištena je puna pobakrena žica namjenjena za MAG postupak zavarivanja, prečnika Ø1.2 mm, oznake G62 4 M Mn3NiCrMo prema standardu EN 16834-A, trgovačkog naziva Carbofil MnNiMoCr, proizvođača Oerlikon. Žica je namjenjena za zavarivanje čelika povišene čvrstoće,  $R_m < 690 \text{ Mpa}$ . Hemijski sastav žice Carbofil MnNiMoCr je prikazan u Tabeli 3.

**Tabela 3. Hemijski sastav žice za zavarivanje: Carbofil MnNiMoCr (u mas. %)**

**Table 3. Chemical composition of welding wire: Carbofil MnNiMoCr (in mass. %)**

Oznaka	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Fe
Carbofil MnNiMoCr	0.08	0.6	1.5	0.5	0.25	0.54	≤ 0.015	≤ 0.018	ost.

U tabeli 4 su prikazana mehnička svojstva metala šava, koji se formira prilikom zavarivanja žicom Carbofil MnNiMoCr.

**Tabela 4. Mehnička svojstva metala šava prilikom zavarivanja žicom: Carbofil MnNiMoCr**

**Table 4. Mechanical properties of weld metal after welding with wire: Carbofil MnNiMoCr**

Oznaka	R <sub>eH</sub> [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	KV [J] (– 40 °C)
Carbofil MnNiMoCr	≥ 620	≥ 690	≥ 18	≥ 47

Za zaštitu električnog luka i kupke korišten je zaštitni gas klase M21, prema EN ISO 14175:2008, sa ostvarenim protokom od 15 l/min.

Poslije navarivanja, urađena je termička obrada navarenog spoja u peći. Na uzorku koji je navarivan u normalizovanom stanju, vršeno je termička obrada poboljšanje. Termička obrada poboljšanje

navarenog uzorka vršena je po istom režimu koji je prikazan na Slici 3. Na uzorku koji je navarivan u poboljšanom stanju nakon navarivanja izvršena je termička obrada navarenog spoja, žarenje radi uklanjanja unutrašnjih napona.

Žarenje radi uklanjanja unutrašnjih napona je izvedeno na način da je uzorak zagrijan na



temperaturu 580°C, sa zadržavanjem od 2 h na toj temperaturi, nakon toga je vršeno kontrolisano hlađenje do 300 °C, a zatim hlađenje na vazduhu do sobne temperature. Brzina zagrijavanja je 120 °C/h, dok je brzina hlađenja 100 °C/h

### 3. Rezultati i diskusija

Poslije završenog navarivanja i termičke obrade uzoraka nakon navarivanja, uzorci su podvrgnuti ispitivanju metodama bez i sa razaranjem, na osnovu kojih se kvalifikuje tehnologija navarivanja. Metode bez razaranja koje su provedene na uzorcima su: vizuelna metoda u skladu sa EN ISO 17637, metoda penetrantih tenosti u skladu sa EN ISO 3452-1 i ultrazvučno ispitivanje u skladu sa EN ISO 17640.

Metode sa razaranjem koje su primjenjene prilikom ispitivanja uzoraka su: zatezanje poprečnih uzoraka prema EN ISO 4136, savijanje zavarenih spojeva prema EN ISO 5173, ispitivanje udarom po Šarpiju prema EN ISO 148-1 i ispitivanje makrostrukture prema EN ISO 17639.

Sva provedena ispitivanja, na oba uzorka su zadovoljila uslove prihvatljivosti potrebne za kvalifikaciju navarenog spoja. Rezultati ispitivanja za mehanička i makroskopska ispitivanja su prikazani u tabelama ispod.

Kod poprečnog zatezanja, isjecane su epruvete iz ispitnih uzoraka su normalno na osu navarenog spoja.

**Tabela 5. Rezultati ispitivanja poprečnim zatezanjem, prema EN ISO 4136**

**Table 5. Transverse tensile test results, according to EN ISO 4136**

Dimenzije [mm x mm]	R <sub>m</sub> [MPa]	F <sub>m</sub> [kN]	Lokacija preloma
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u normalizovanom stanju			
10.2 x 24.8	638	159.8	Osnovni materijal
10.1x25.0	628	160.4	Osnovni materijal
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u poboljšanom stanju			
10.2 x 24.9	655	163.01	Osnovni materijal
10.0x25.1	653	163.9	Osnovni materijal

Kod ispitivanja zatezanjem poprečnih uzoraka, uočeno je da su sve epruvete, iz oba uzorka prekinute u osnovnom materijalu. Na epruvetama koje su uzete iz uzorka koji je navarivan u normalizovanom stanju, primjećen je blagi pad zatezne čvrstoće i maksimalne sile kidanja u

odnosu na epruvete koje su uzete iz uzorka koji je navarivan u poboljšanom stanju.

Epruvete za bočno savijanje su takođe isjecane iz ispitnih uzoraka, normalno na osu navarenog spoja.

**Tabela 6. Rezultati ispitivanja bočnim savijanjem, prema EN ISO 5173**

**Table 6. Side bend test test results, according to EN ISO 5173**

Dimenzije [mm x mm]	Vrsta testa	Ugao savijanja [°]	Prečnik trna [mm]	Ocjena
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u normalizovanom stanju				
10.1 x 29.5	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.1 x 29.8	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.0 x 29.7	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.0 x 30.0	Bočno	180	40	Zadovoljava
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u poboljšanom stanju				
10.1 x 30.0	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.2 x 29.9	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.0 x 30.1	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.2 x 29.8	Bočno	180	40	Zadovoljava

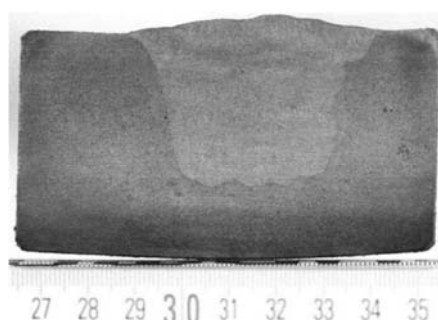


Iz prikazanih rezultata je vidljivo da su sve epruvete za savijanje iz oba uzorka zadovoljile ispitivanje na bočno savijanje navarenog spoja. Na uzorcima ispitanim savijanjem nisu uočene pukotine u zoni istezanja prilikom savijanja epruveta.

Makroskopskom analizom pripremljenih uzorka, koja je izvršena u skladu sa standardom EN ISO 17639:2013 konstatovano je da navareni spoja nema nepravilnosti u obliku gasnih mjehurova, uključaka i prslina u metalu šava, liniji stapanja i zoni uticaja toplote.



**Slika 4.** Makrosnimak uzorka navarivanog u normalizovanom stanju  
**Figure 4.** Macrostructure of the surface welded sample in the normalized condition



**Slika 5.** Makrosnimak uzorka navarivanog u poboljšanom stanju  
**Figure 5.** Macrostructure of the surface welded sample after quenching and tempering

**Tabela 7.** Rezultati ispitivanja udarom po Šarpiju, prema EN ISO 148-1

**Table 7.** Charpy impact test results, according to EN ISO 148-1

Dimenzije [mm x mm]	Položaj žljeba	Temperatura [°C]	Energija udara [J]	Srenja vrijednost energije udara [J]
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u normalizovanom stanju				
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	115	118.67
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	118	
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	123	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	110	118
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	102	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	142	
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	90	74.34
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	73	
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	60	
Rezultati ispitivanja uzoraka navarivanog u poboljšanom stanju				
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	137	131
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	124	
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	132	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	47	52
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	60	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	48	
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	67	49
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	37	
10.0 x 10.0	Linija stapanja +2	-20	43	



Rezultati ispitivanja energije udara po Šarpiju, prikazuju kod oba uzorka očekivani pad energije udara kod epruveta na kojima je žlijeb urezan na liniji stapanja i dva milimetra od linije stapanja u odnosu na epruvete kod kojih je žlijeb urađen u metalu šava.

#### 4. Zaključak

Postupak navarivanja čeličnih livova zauzima važnu ulogu u reparaciji defekata nastalih prilikom izlivanja čeličnih odlivaka. Kvalitet i mehanička svojstva navarenog spoja zavise od mnogo povezanih faktora, a jedan od tih faktora su vrsta i redoslijed izvođenja termičke obrade čeličnog odlivka prije i poslije navarivanja.

Analizom rezultata ispitivanja prikazanih u radu, dokazan je uticaj redoslijeda izvođenja termičke obrade prije i poslije navarivanja na mehanička svojstva navarenog spoja. Kroz rad je prikazano, da su tehnologije navarivanja na oba uzorka, koji su različito termički tretirani, mehanička svojstva zadovoljavajuća, te se obje tehnologije mogu koristiti u reparaturi defekata, ali da se postižu različita mehanička svojstva, u zavisnosti od redoslijeda izvođenja termičke obrade prije i nakon navarivanja.

#### Literatura / References

[1] Radica Prokić Cvetković, Olivera Popović, Metalurgija zavarivanja, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2019.

[2] Dobraš, D., Zavarivanje, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet., Banja Luka, 2016.

Kod epruveta uzetih iz uzorka koji je navarivan u poboljšanom stanju, na epruvetama kod kojih je žlijeb urezan na liniji stapanja i dva milimetra od linije stapanja, primjećen je značajan pad žilavosti u odnosu na epruvete koje su uzete na istim lokacijama iz uzorka koji je navarivan u normalizovanom stanju.

#### 4. Conclusion

The process of surface welding of steel castings, plays an important role in the repair of defects caused during the casting of steel castings. The quality and mechanical properties of the surface welded joint depend on many related factors, and one of those factors is the type and sequence of thermal treatment of the steel casting before and after surface welding.

By analyzing the test results presented in the paper, the influence of the sequence of thermal treatment before and after welding on the mechanical properties of the welded joint was proven. Through the work, it was shown that the welding technologies on both samples, which were thermally treated differently, have satisfactory mechanical properties, and both technologies can be used in the repair of defects, but that different mechanical properties are achieved, depending on the sequence of performing the thermal treatment before and after pretreating.

[3] B. Katavić i dr. Zavarivanje i zavarene konstrukcije 4, 54, 2009, 149-155

[4] Standard En10293:2015

[5] Standard ISO/TR 15608:2017

## Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2022. godinu je 3500,00 dinara

Uplatom članarine stižete pravo na beneficirane cene

pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

### Informacije

+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)

[duzs@eunet.rs](mailto:duzs@eunet.rs)  
[www.duzs.org.rs](http://www.duzs.org.rs)

