



Dragoslav Dobraš^{1,a}, Milisav Marković¹, Slaviša Savić¹

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA ČELIČNOG LIVA G18CrMo4+QT SA KONSTRUKCIONIM ČELIKOM S355J2+N

WELDING TECHNOLOGY OF STEEL CAST G18CrMo4 + QT WITH STRUCTURAL STEEL S355J2+N

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:

Septembar 2021.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2022.

Ključne reči: Čelični liv, konstrukcioni čelik, tehnologija zavarivanja

Rezime

Tehnologija zavarivanja čeličnog liva G18CrMo4+QT sa konstrukcionim čelikom S355J2+N je tehnologija zavarivanja raznorodnih materijala. Problematiku zavarivanja čeličnog liva G18CrMo4+QT predstavlja pojava otvrdnjavanja strukture zbog prisustva neotpuštenog martenzita, što za posledicu ima sniženje žilavosti i nastanak hladnih prslina. S druge strane, konstrukcioni čelik S355J2+N, u zavisnosti od debljine materijala, takođe je sklon pojavi hladnih prslina. Radi sprječavanja nastanka prslina i otklanjanja zaostalih napona potrebno je vršiti predgrijavanje i termičku obradu nakon zavarivanja. U radu su predstavljene tehnologije zavarivanja i naknadne termičke obrade spoja čeličnog liva G18CrMo4+QT sa konstrukcionim čelikom S355J2+N, uz prikaz rezultata ispitivanja provedenih na zavarenom uzorku lima debljine 12 mm, sa V pripremom spoja, zavarenog MAG postupkom u PA položaju zavarivanja.

1. Uvod

Složenost uslova rada i tehnologije izrade pojedinih pozicija uslovlila je primjenu raznorodnih materijala koji se spajaju ili razdvojom vezom ili zavarivanjem. Zavarljivost raznorodnih materijala može biti značajno različita, što bitno usložnjava tehnologiju zavarivanja [1].

Područje primjene čeličnog liva G18CrMo4+QT je na mašinskim pozicijama kao što su na primjer: zupčanici, vijci, čaure, vratila, bregaste osovine, koje trebaju biti otporne na habanje, a izložene su promjenljivom opterećenju, tj. treba da imaju čvrsto i žilavo jezgro uz veliku površinsku tvrdoću. Za razliku od čeličnog liva, konstrukcioni čelik

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Vojvode Stepe Stepanovića 71, Banja Luka, BiH

^aE mail: dragoslav.dobras@mf.unibl.org

Keywords: Steel cast, structural steel, welding technology

Abstract

Welding technology of cast steel G18CrMo4+QT with structural steel S355J2+N is a welding of dissimilar steels. The problem of welding cast iron G18CrMo4+QT is the phenomenon of hardening of the structure due to the presence of unreleased martensite, which results in lower toughness and the formation of cold cracks. On the other hand, structural steel S355J2+N, depending on the thickness of the material, is also prone to the appearance of cold cracks. In order to prevent the formation of cracks and eliminate residuals stresses, it is necessary to perform preheating and heat treatment after welding. The paper presents welding technologies and subsequent heat treatment of G18CrMo4+QT cast iron joint with S355J2 + N structural steel with presentation of test results performed on a 12 mm thick welded sample, with V preparation of the joint, welded by MAG process in PA welding position.

S355J2+N pogodan je za izradu različitih konstrukcija u mašinskom, građevinskom, tehnološkom i inženjeringu transportnih sredstava, opterećenih na statička i dinamička opterećenja, ali bez izrazite otpornosti na habanje [2-3].

U skladu sa standardom ISO/TR 15608:2017 čelik S355J2+N pripada grupi 1.2, a čelični liv G18CrMo4+QT grupi 5.1 [4].

Problem pri zavarivanju čeličnog liva G18CrMo4+QT sa konstrukcionim čelikom S355J2+N predstavlja mogućnost pojave hladnih prslina, jer su oba materijala sklona istoj pojavi, ali iz različitih razloga.



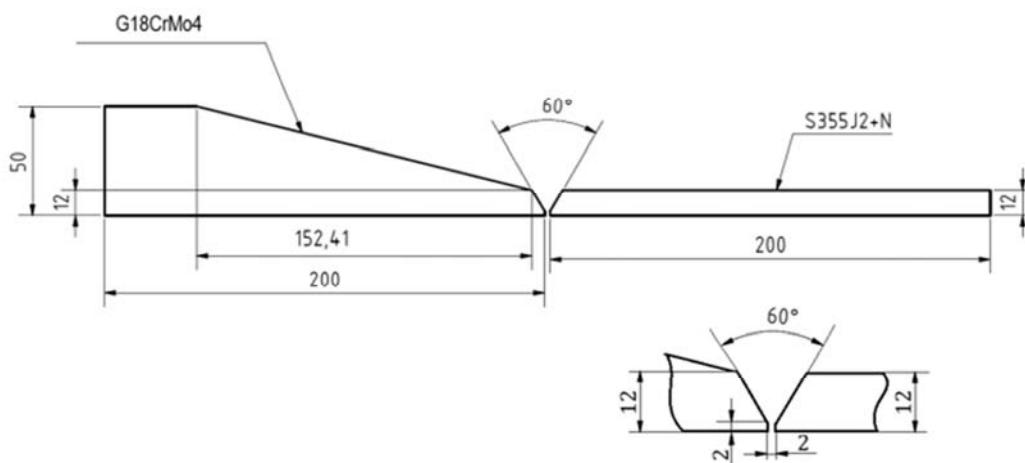
Generalno, hladne prsline pri zavarivanju sitnozrnih čelika i čeličnih livova mogu biti izazvane usljed nastanka grubog zrna, zakaljivanja ili izlučivanja u ZUT-u, te difundovanim vodonikom u metalu šava. Zakaljivanje predstavlja glavni problem kod zavarivanja čeličnog liva G18CrMo4+QT zbog njegove struktura, jer posjeduje jedan dio neotpuštenog martenzita. Da bi termički ciklus zavarivanja bio kontrolisan i umanjio efekat zakaljivanja potrebno je vršiti predgrijavanje i pratiti međuslojnu temperaturu. Nakon zavarivanja potrebno je izvršiti žarenje za smanjenja napona [5-7].

Za razliku od čeličnog liva G18CrMo4+QT kojeg odlikuje nepovoljna struktura za zavarivanje, čelik S355J2+N je pogodan za zavarivanje sa aspekta strukture. Međutim, takođe je sklon pojavi hladnih prsline u zavisnosti od debljine. Da bi se to izbjeglo, potrebno je vršiti predgrijavanje. Kada je u pitanju čelik S355J2+N naknadna termička obrada nije

potrebna, jer zavarivanje istog po strukturi ne predstavlja problem, što nije slučaj kod čeličnog liva G18CrMo4+QT.

2. Eksperiment

Eksperimentalni dio rada proveden je u realnim, radioničkim uslovima zavarivanja, dok su sva ispitivanja provedena u akreditovanim laboratorijama. Za izradu tehnologije zavarivanja korišten je ispitni uzorak sastavljen od priprema od čeličnog liva G18CrMo4+QT i čelika S355J2+N, koji su za zavarivanje pripremljeni prema Slici 1. Priprema sučeonog V žljeba izvršena je mašinskom obradom, bez uticaja toplote nastale pri obradi. Predgrijavanje je vršeno gasnim gorionikom uz primjenu neutralnog plamena, dok su temperatura predgrijavanja i međuslojna temperatura praćene IC termomentrom. Zavarivanje ispitnog uzorka izvedeno je MAG postupkom u PA položaju. Debljina osnovnih materijala na mjestu spoja je 12 mm.



Slika 1. Oblik pripreme sučeonog V spoja

Figure 1. Form of preparation of butt V joint

Hemijski sastav za oba osnovna materijala dat je u Tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnih materijala [u %]

Table 1. Chemical composition of the parent materials [in %]

Broj šarže	Oznaka	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Fe
29489	G18CrMo4+QT	0.18	0.39	0.89	0.017	0.007	0.83	0.26	0.29	0.007	0.07	ostatak
21EP004009	S355J2+N	0.18	0.2	1.48	0.013	0.006	0.04	0.005	0.02	0.05	0.03	ostatak

Na osnovu hemijskog sastava izračunat je ekvivalent ugljenika za oba materijala, a dobijene vrijednosti su: CE = 0.44 za čelik S355J2+N i CE = 0.55 za čelični liv G18CrMo4+QT. Na osnovu

razlike u vrijednosti ekvivalenta ugljenika potvrđena je otežana i različita zavarljivost ovih materijala.

Mehanička svojstva osnovnog materijala data su u Tabeli 2.

**Tabela 2. Mehanička svojstva osnovnog materijala****Table 2. Mechanical properties of the parent materials**

Oznaka	Rp _{0.2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	KV [J]
G18CrMo4+QT	632	755	19.6	≥ 24 (-20 °C)
S355J2+N	422	571	28.0	≥ 27 (-20 °C)

Analizom mehaničkih svojstava vidi se da čelični liv ima za 49,8% veći napon na granici tečenja i za 43% manju duktilnost u odnosu na čelik S355J2+N, što takođe ukazuje na razliku u osjetljivosti na lokalni unos toplote i veću osjetljivost čeličnog liva na pojavu unutrašnjih napona.

Kao dodatni materijal korištena je elektrodna žica za MAG postupak zavarivanja oznake G69 4 M Mn3Ni1CrMo, prema standardu EN ISO 16834:2008, trgovačkog naziva EZ-SG 100, prečnika 1.2 mm. Dodatni materijal je legiran sa Mn, Ni, Cr i Mo (Tabela 3) i namijenjen za zavarivanje sitnozrnih čelika čiji napon tečenja ne prelazi 690 MPa (Tabela 4).

Tabela 3. Orjentacioni hemijski sastav dodatnog materijala – elektrodna žica: EZ-SG 100 [u %]**Table 3. Approximate chemical composition of the filler material - filler wire: EZ-SG 100 [in %]**

Oznaka	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Fe
EZ – SG 100	0.12	0.4 – 0.7	1.3 – 1.8	0.2 – 0.4	0.2 – 0.3	1.2 – 1.6	0.05 – 0.13	≤ 0.03	ostatak

Tabela 4. Mehanička svojstva čistog metala šava - dodatni materijal – elektrodna žica: EZ-SG 100**Table 4. Mechanical properties of pure weld metal - filler material - filler wire: EZ-SG 100**

Oznaka	Rp _{0.2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	KV [J]
EZ – SG 100	> 690	750 - 940	> 20	≥ 47 (-40 °C)

Za zaštitu električnog luka i kupke korišten je zaštitni gas klase M21, prema standardu EN ISO 14175:2008, trgovačkog naziva ArC-18 sa ostvarenim protokom od 14 l/min.

Predgrijavanje je vršeno na oba osnovna materijala. Temperatura predgrijavanja čeličnog liva, izračunata prema formuli Seferian-a, iznosi 200 °C.

$$T_{p\ G18CrMo4+QT} = 350 \cdot \sqrt{C_{G18CrMo4+QT} - 0.25} = 350 \cdot \sqrt{0.583 - 0.25} = 201.971\ ^\circ\text{C}$$

$$C_{G18CrMo4+QT} = CE \cdot (1 + 0.005 \cdot t) = 0.55 \cdot (1 + 0.005 \cdot 12) = 0.583$$

Prema istoj formuli, temperatura predgrijavanja čelika S355J2+N iznosi 75 °C, međutim zbog osjetljivosti čeličnog liva na zakaljivost, temperatura predgrijavanja čeličnog liva takođe je vršena na 200 °C.

Prilikom višeprolaznog zavarivanja, praćena je međuprolazna temperatura koja ne smije biti manja od temperature predgrijavanja, odnosno 200 °C, a ne smije preći 300 °C.

Parametri zavarivanja za svih 6 prolaza prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Parametri zavarivanja**Table 5. Welding parameters**

Zavar	Jačina struje [A]	Napon [V]	Vrsta struje / polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]	Unos toplote [kJ/mm]
1	160	26.4	DC+	4.2	18.2	1.184
2	200	28.0	DC+	4.7	22.4	1.275
3	210	28.4	DC+	4.9	23.5	1.294
4	195	27.8	DC+	4.8	21.5	1.286
5	205	28.2	DC+	5.0	23.5	1.255
6	190	27.6	DC+	4.6	24.1	1.110



Nakon zavarivanja izvršeno je žarenje na 580°C, sa zadržavanjem od 1 h, i međužarenje na 450 °C sa zadržavanjem 0.5 h. Brzina zagrijavanja 120°C/h, dok je brzina hlađenja 100°C/h uz kontrolisano hlađenje do 300°C, a zatim hlađenje na vazduhu.

3. Rezultati i diskusija

Nakon zavarivanja i termičke obrade, ispitni uzorak je podvrgnut ispitivanjima bez razaranja i sa razaranjem kojima se potvrđuje kvalitet tehnologije zavarivanja.

Provedenim ispitivanjima bez razaranja: vizuelno u skladu sa standardom EN ISO 17637, penetrantima u skladu sa standardom EN ISO 3452-1 i ultrazvučno u skladu sa standardom EN ISO 17640. Konstatovano je da zavareni ispitni uzorak zadovoljava relevantne zahtjeve prihvatljivosti.

Takođe, i ispitivanja sa razaranjem zadovoljila su pripadajuće zahtjeve prihvatljivosti. Rezultati ispitivanja prikazani su: bočnim savijanjem u Tabeli 6, ispitivanjem energije udara po metodi Šarpi u Tabeli 7, a poprečnim zatezanjem zavarenih epruveta u Tabeli 8.

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

Table 6. Bending test results, according to standard EN ISO 5173

Dimenzije [mm x mm]	Vrsta testa	Ugao savijanja [°]	Prečnik trna [mm]	Ocjena
10.0 x 12.0	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.1 x 12.0	Bočno	180	40	Zadovoljava
10.0 x 12.3	Bočno	180	40	Zadovoljava
9.8 x 12.1	Bočno	180	40	Zadovoljava

Tabela 7. Rezultati ispitivanja energija udara po Šarpiju, prema standardu EN ISO 148-1

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

Dimenzije [mm x mm]	Položaj žljeba	Temperatura [°C]	Energija udara [J]	Srenja vrijednost energije udara [J]
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	85	66.34
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	53	
10.0 x 10.0	Metal šava	-20	61	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	43	42.67
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	40	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1	-20	45	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2	-20	99	63.67
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2	-20	40	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2	-20	52	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1+2	-20	51	72.34
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1+2	-20	89	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 1+2	-20	77	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2+2	-20	132	125
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2+2	-20	112	
10.0 x 10.0	Linija stapanja 2+2	-20	131	



U Tabeli 7, položaj žljeba označen sa „Linija stapanja 1“ predstavlja na ispitnoj epruveti za ispitivanje energije udara urezan žljeb na liniji stapanja metala šava sa čeličnim livom G18CrMo4QT, a „Linija stapanja 2“ sa S355J2+N,

dok „Linija stapanja 1+2“ predstavlja položaj žljeba 2 mm od linije stapanja u zoni uticaja toplote u čeličnom livu G18CrMo4QT, a „Linija stapanja 2+2“ predstavlja položaj žljeba 2 mm od linije stapanja u zoni uticaja toplote u čeliku S355J2+N.

Tabela 8. Rezultati ispitivanja poprečnim zatezanjem, prema standardu EN ISO 4136

Table 8. Results of the transverse tensile test, according to standard EN ISO 4136

Dimenzije [mm x mm]	R _m [MPa]	F _m [kN]	Lokacija preloma
12.0 x 25.2	588	177.8	Osnovni materijal S355J2+N
12.4 x 25.1	555	171.4	Osnovni materijal S355J2+N

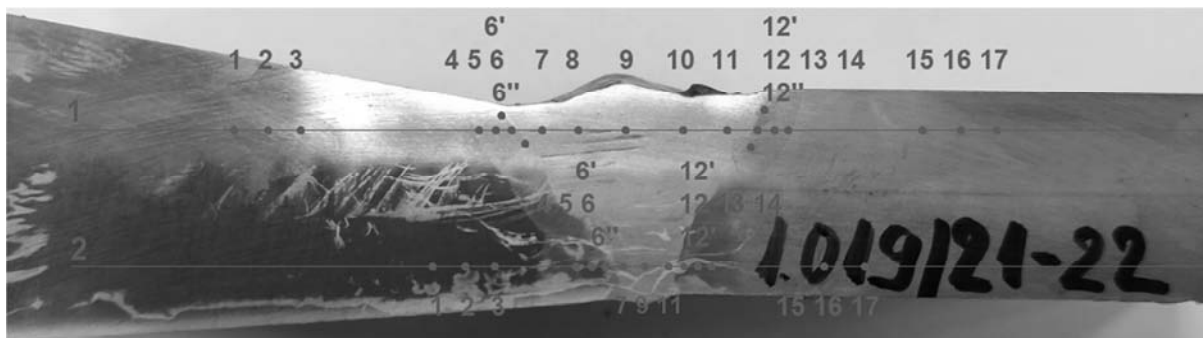
Rezultati ispitivanja tvrdoće na ispitnom uzorku izvršenom u skladu sa standardom EN ISO 9015-1:2011, po metodi HV₁₀, dati su u Tabeli 9, položaj

mjernih tačaka na Slici 2, a dijagram raspodjele tvrdoće na Slici 3.

Tabela 9. Rezultati ispitivanja tvrdoće, prema standardu BAS EN ISO 9015

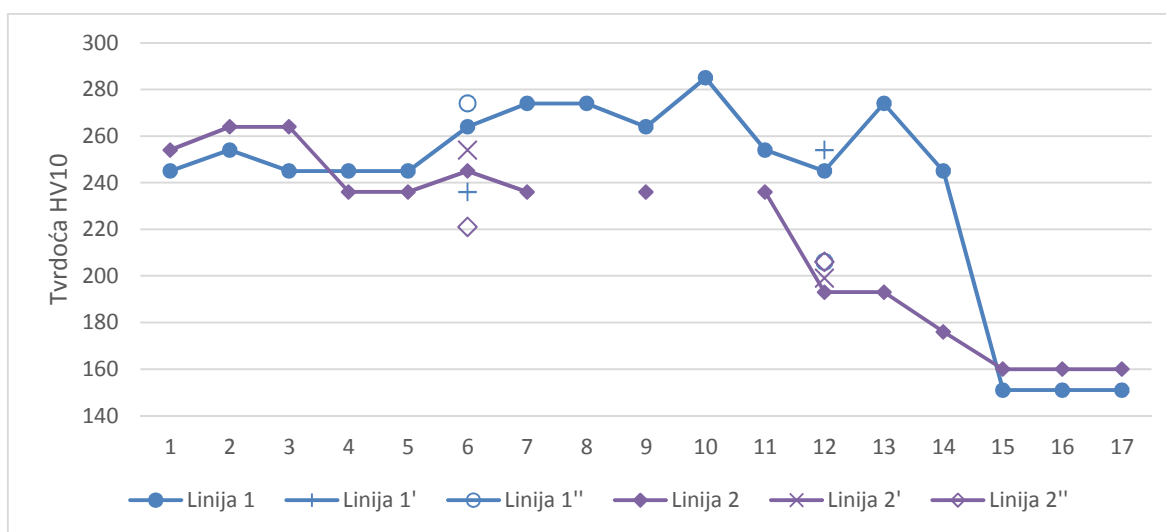
Table 9. Hardness test results, according to standard BAS EN ISO 9015

Materijal	Ispitna tačka	Mjerna linija	
		1	2
G18CrMo4+QT	1	245	254
	2	254	264
	3	245	264
Zona uticaja toplote	4	245	236
	5	245	236
	6	264	245
	6'	236	254
Metal šava	6"	274	221
	7	274	236
	8	274	
	9	264	236
	10	285	
Zona uticaja toplote	11	254	236
	12	245	193
	12'	254	199
	12"	206	206
	13	274	193
S355J2+N	14	245	176
	15	151	160
	16	151	160
	17	151	160



Slika 2. Položaj mjernih tačaka pri ispitivanju tvrdoće zavarenog spoja

Figure 2. Position of measuring points in the hardness testing of a welded joint

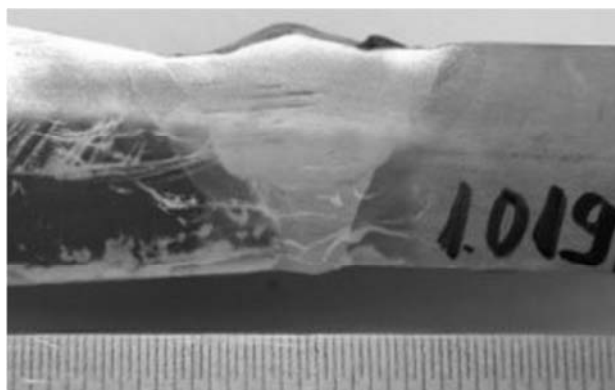


Slika 3. Dijagram raspodjele tvrdoće zavarenog spoja

Figure 3. Diagram of the hardness distribution of the welded joint

Analizom dijagrama raspodjele tvrdoće vidi se da je, nakon termičke obrade zavarenog uzorka, tvrdoća ujednačenija sa strane čeličnog liva u: osnovnom materijalu, zoni uticaja toplote i metalu šava uz zadovoljen uslov da je $HV_{10} < 300$, u odnosu na stranu čelika S355J2+N koja takođe zadovoljava kriterijum prihvatljivosti $HV_{10} < 300$.

Makroskopskom analizom pripremljenog uzorka, koja je izvršena u skladu sa standardom EN ISO 17639:2013 konstatovano je da zavareni spoj zadovoljava u pogledu geometrije, da je bez nesavršenosti na linijama stapanja i po dubini penetracije, uz ujednačenu širinu zone uticaja toplote u oba osnovna materijala.



Slika 4. Makroskopski snimak zavarenog spoja

Figure 4. Macroscopic image of the welded joint



4. Zaključak

Na kvalitet zavarenog spoja utiče niz faktora čiji uticaji mogu biti uzajamno povezani i međusobno zavisni. Pri zavarivanju raznorodnih materijala bitan uticaj na kvalitet zavarenog spoja imaju: izbor dodatnog materijala, parametri zavarivanja, kao i režimi predgrijavanja, održavanja međuprolazne temperature i naknadne termičke obrade.

Analizom prikazanih rezultata ispitivanja, vidljivo je da su izborom dodatnog materijala EZ-SG 100 i režima zavarivanja i termičke obrade, dobijene karakteristike metala šava sa svojstvima sličnijim čeličnom liva G18CrMo4+QT.

Mehanička svojstva ZUT-a sa strane čeličnog liva imaju ujednačena svojstva, uz blagi pad žilavosti na granici stapanja. U ZUT-u na strani čelika S355J2+N u površinskom sloju došlo do ojačanja materijala uz istovremeni porast i tvrdoće i žilavosti, dok svojstva u korjenom prolazu odgovaraju prelaznim vrijednostima između svojstava metala šava i čelika S355J2+N.

Kroz ispitivanja prikazana u radu dokazano je da je izborom dodatnog materijala oznake EZ-SG 100, uz primjenu prikazanih parametara: zavarivanja, predgrijavanja i naknadne termičke obrade, ostvaren zavareni spoj čeličnog liva G18CrMo4+QT i konstrukcionog čelika S355J2+N koji zadovoljava kriterijume prihvatljivosti.

Kroz naredne eksperimente bilo bi zanimljivo uporedi rezultate ispitivanja zavarenog uzorka pri čemu bi se koristio dodatni materijal iste klase ali od drugog proizvođača.

Literatura / References

- [1] Dobraš, D., (2016), Zavarivanje, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka.
- [2] <https://www.slideshare.net/SafeMetal/alloy-data-sheet-g18crmo4>, (8.4.2021.).
- [3] https://medium.com/@palak_69848/en-10025-s355j2-n-steel-plate-characteristics-and-al-2386248eb188, (8.4.2021.).
- [4] Standard ISO/TR 15608:2017 (2017)

4. Conclusion

The quality of the welded joint is influenced by a number of factors whose influences can be interconnected and interdependent. In welding dissimilar materials, the following have a significant impact on the quality of the welded joint: the selection of filler material, welding parameters, as well as preheating mode, maintenance of interpass temperature and post weld heat treatment.

Analysis of the presented test results it is evident that the selection of filler material EZ-SG 100 and the applied mode of welding and heat treatment, the characteristics of the weld metal with properties similar to cast iron G18CrMo4 + QT were obtained

The mechanical properties of HAZ on the steel casting side have uniform properties, with a slight decrease in toughness at the fusion line. In HAZ on the side of steel S355J2 + N in the surface layer there was a strengthening of the material with a simultaneous increase in hardness and toughness, while the properties of the root pass correspond to the transition values between the properties of weld metal and steel S355J2 + N.

Based on the tests results presented in the paper, it was proved that the selection of filler material marked as EZ-SG 100, using the applied parameters: welding, preheating and post heat treatment, it is obtained a welded joint of cast steel G18CrMo4 + QT and structural steel S355J2 + N that meets the acceptance criteria.

Through the further experiments, it would be interesting to compare the test results of a welded sample using filler material of the same class but from a different manufacturer.

- [5] Dobraš, D., Bukejlović, N., (2015), HARDOX 450 - Prilog ocjeni zavarljivosti, Proceedings DEMI 2015, 12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 29 - 30th May 2015, 181 – 187.
- [6] Smiljanić, M., (2006), Zavarljivi finozrni čelici – sposobnost zavarivanja i zavrivanje, Zavarivanje i zavarene konstrukcije 51,4, 155-164.
- [7] Mišina, N., Oršulić, M., Polajnar, I., (2003), Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji, Brodogradnja i strojarstvo, 50, 5-6, 174 – 180.