



Marjan Ilić^{1,a}, Đorđe Ivković^{2,b}, Vukić Lazić^{2,c}, Dušan Arsić^{2,d}, Srblav Aleksandrović^{2,e}, Miodrag Arsić^{3,f}

TEORIJSKO-EKSPERIMENTANA OCENA ZAVARLJIVOSTI RAZNIH TIPOVA NAVARENIH ČELIKA

THEORETICAL-EXPERIMENTAL ESTIMATION OF WELDABILITY OF DIFFERENT TYPES OF STEELS BY HARD FACING

Originalni naučni rad / Original scientific 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:

April 2022.

Ključne reči: Zavarljivost, ugljenični čelik, legirani čelik, tvrdoća, mikrostruktura

Adresa autora / Author's address:

¹ Alfa Technics, Kneza Miloša 61, Svilajnac, Srbija

² Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, Kragujevac, Srbija

³ Institut IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija

E mail: ^amarjan3007@gmail.com, ^bivkovic99djordje@gmail.com, ^cvlazic@kg.ac.rs, ^ddusan.arsic@fink.rs, ^esrba@kg.ac.rs, ^fmiodrag.arsic@institutims.rs

Keywords: Weldability, carbon steel, alloyed steel, hardness, microstructure

Rezime

U ovom radu razmatra se zavarljivost ugljeničnih i legiranih čelika primenom navarivanja. U teorijskom delu rada istaknuti su načelni principi vezani za zavarljivost, spomenute su najvažnije metode ispitivanja zavarljivosti i prikazan je način procene zavarljivosti. U eksperimentalnom delu analizirana su dva ugljenična i dva legirana čelika navarena različitim dodatnim materijalima. Posle navarivanja pripremljeni su uzorci za merenje tvrdoće i analizu mikrostrukture specifičnih zona navara. Zavarljivost analiziranih čelika je određena na osnovu sprovedenih ispitivanja tvrdoće i mikrostrukture i upoređena je sa teorijskom procenom.

1. Uvod

Zavarljivost materijala je deo nauke o materijalima u kojoj se proučava najvažnije svojstvo pri projektovanju i izvođenju zavarivačkih i njima srodnih tehnologija. Pri zavarivanju dolazi do složenih pojava u materijalu, čije je poznavanje neophodno da bi se proces uspešno izveo. Zahvaljujući mnogobrojnim metodama zavarivanja danas je moguće uspešno međusobno spojiti u čvrstu neraskidivu celinu različite vrste materijala.

Zavarljivost je kompleksno svojstvo metala što je razlog da postoje više definicija zavarljivosti, ali nema uniformne i eksplicitne definicije ovog za praksu izuzetno važnog tehnološkog svojstva metala. Zavarljivost određuje relativnu sposobnost nekog metala da primenom odgovarajućeg

Abstract

In this paper, the weldability of carbon and alloy steels during surfacing was considered. The paper consists of a theoretical and experimental part. In the theoretical part of the paper, the general concepts related to weldability are pointed out, the most important methods for the assessment of weldability are described and the assessment of weldability of some carbon and alloyed steels is determined. In the experimental part, two carbon and two alloyed steels were hard faced with different filler metals. After the hard facing, on prepared samples the hardness measurement was done as well as examination of the microstructure of specific zones of welded joint. The weldability of used steels was estimated on the basis of hardness and microstructure and it was compared to theoretical results.

postupka i tehnologije može da formira spojeve zahtevanog kvaliteta. Prilikom zavarivanja određeni metali mogu imati: dobru zavarljivost, uslovnu zavarljivost i lošu zavarljivost. Ocena zavarljivosti različitih metala ima veliki značaj, kako pri izboru dodatnih materijala i metoda za izradu zavarenih konstrukcija, tako i pri izboru dodatnih materijala i metoda reparature oštećenih radnih delova. Ocena zavarljivosti na osnovu samo jedne metode je nepouzdana pa je razvijeno više tehnoloških proba. Savremen pristup oceni zavarljivosti podrazumeva: korišćenje računskih metoda koje uzimaju u obzir granične uslove; probe sa simuliranjem temperaturnih ciklusa zavarivanja (navarivanja); probe na modelima sa stvarnim parametrima



zavarivanja (navarivanja). Određivanje strukture, hemijskog sastava, tvrdoće, žilavosti osnovnog i dodatnog materijala, i zavarenog spoja kao celine je priprema za definisanje tehnologije zavarivanja. Za određivanje optimalne tehnologije neophodna je provera ponašanja navarenih radnih elementa u eksploatacionim uslovima.

Zavarljivost se može proceniti na različite načine, a izabrani način najčešće zavisi od vrste zavarivanog materijala. Ako se radi o ugljeničnim čelicima u praksi je često dovoljno izvršiti računsku proveru zavarljivosti primenom različitih izraza na bazi ekvivalentnog ugljenika CE dok se kod čelika složenijeg hemijskog sastava i načina dobijanja (legirani čelici, čelici povišene jačine i dr.) često zahteva i sprovođenje eksperimentalnih proba za ocenu zavarljivosti [1, 2].

U ovom radu prikazan je metod procene zavarljivosti na osnovu eksperimentalnih ispitivanja kod tri različite vrste čelika: konstrukcionog, srednjeugljeničnog i niskolegiranog čelika za poboljšanje.

2. Eksperiment

Kako bi se dobila što jasnija slika o ugljeničnim legiranim čelicima, koji su predmet u ovom radu sprovedena su određena eksperimentalna ispitivanja. Osnovni cilj ovog eksperimenta je, da se primenom odgovarajućeg postupka, izborom pogodnih dodatnih materijala i projektovanjem optimalne tehnologije navarivanja, izvede uspešno reparaturno ili proizvodno navarivanje različitih vrsta čelika.

Eksperimenti prikazani u ovom radu su izvedeni na uzorcima (modelima) dobijenim navarivanjem šipki od izabranih ugljeničnih i legiranih čelika. Eksperimentalna istraživanja obuhvatila su:

- Navarivanje čeličnih uzoraka,

- Pripremu navarenih uzoraka za ispitivanje i
- Određivanje tvrdoće i procenu mikrostrukture.

Za eksperimentalna istraživanja su korišćena četiri čelika. To su: S235JR, S355J2G3, C45 i 42CrMo4 (prema standardu EN 10025-1 [3]).

2.1. Osnovni materijali

Čelici S235JR i S355J2G3 pripadaju grupi opštih konstrukcionih specijalno umirenih čelika i primenjuju se za izradu odgovornih delova zavarenih konstrukcija, otkovaka i drugih jako napregnutih delova u mašingradnji (osovine, vratila, vretena, zupčasti i pužni prenosnici i dr.). Ovi čelici služe za izradu različitih konstrukcija: odbojnih ograda, nosača i dr. Čelik C45 pripada grupi ugljeničnih čelika za poboljšanje i ima široku primenu pri izradi različitih delova tehničkih sistema. Isporučuje se u različitim oblicima kao što su šipke različitih poprečnih preseka i limovi srednjih i većih debljina. Kod građevinskih mašina od ovog čelika najčešće se izrađuju noževi plugova za čišćenje snega, noževi grejdera i buldozera, sastavni delovi plugova, delovi utovarnih mašina, delovi posipača, kao i za zavrtnjeve i navrtke i dr. Čelik 42CrMo4 spada u grupu niskolegiranih poboljšanih čelika i najčešće se primenjuje za izradu visoko opterećenih delova tehničkih sistema kao što su poluosovine vozila i mašina, cilindri motora, kardanski prenosnici i dr. Kod građevinske mehanizacije, pored prethodno navedenog primenjuje se i za izradu noževa kosilica za košenje trave i noževa uređaja za čišćenje rastinja, zupčanika, obrtnih nazubljenih venaca, zupčastih letvi i dr. U tabeli 1 dat je zbirni prikaz hemijskog sastava i oblasti primene četiri analizirana čelika dok su u tabeli 2 prikazane mehaničke osobine i mikrostruktura [4].

Tabela 1. Hemijski sastav i primena ispitivanih čelika
Table 1. Chemical composition and application of tested steels

Osnovni materijal	Hemijski sastav, mas%									Namena
	C	P	S	N	Si	Mn	Cu	Mo	Cr	
S235JR	0.17	0.05	0.05	0.007	/	/	/	/	/	Za izradu odgovornih zavarenih konstrukcija, otkovaka i drugih jako napregnutih elemenata konstrukcija kod kojih ne postoji opasnost od pojave krkog loma.
S355J2G3	0.23	0.035	0.035	/	0.60	1.70	0.60	/	/	Za izradu odgovornih delova zavarenih konstrukcija, otkovaka i drugih jako napregnutih elemenata konstrukcija kod kojih ne postoji opasnost od pojave krkog loma.
C45	0.42-0.50	0.045	0.045	/	0.04	0.50-0.80	/	/	/	Za izradu konstrukcionih elemenata tehničkih sistema.
42CrMo4	0.38-0.45	0.035	0.0035	/	0.15-0.40	0.50-0.80	/	0.15-0.30	0.9-1.20	Za opterećene delove vozila i mašina koji se izrađuju postupkom plastične deformacije na toplo.

**Tabela 2. Mehanička svojstva i mikrostruktura ispitivanih čelika****Table 2. Mechanical properties and microstructure of the examined steels**

Osnovni materijal	Mehanička svojstva						Mikrostruktura
	R _m , MPa	ReH, MPa	A ₅ , %	Z, %	KV, J	Tvrdoća, HB	
S235JR	370-450	220-240	18-25	/	27	130-145	Međufazna feritno perlitna
S355J2G3	370-450	220-240	18-25	/	27	130-145	Međufazna feritno perlitna
C45	700-850	500	14	30	32	334-340	Međufazna struktura poboljšanja, pretežno trustitna
42CrMo4	1100-1300	900	10	40	34	298-305	Međufazna struktura poboljšanja, sorbit sa učešćem ferita po granicama zrna

2.2. Dodatni materijali

Za sva navarivanja pri ovim istraživanjima korišćeni su dodatni materijali proizvođača „SŽ-Elektrode Jesenice“. Pre izrade fizičkih modela izvedene su probe navarivanja različitim dodatnim materijalima na razne radne predmete. Variranjem parametara navarivanja (jačine struje, radnog napona, brzine, prečnika dodatnog materijala,

debljine radnih predmeta i dr.), došlo se do tehnoloških parametara navarivanja kojima se dobijaju navareni slojevi zadovoljavajućeg kvaliteta.

Hemijski sastav ispitivanih dodatnih materijala dati su u tabeli 3, a mehanička svojstva čistog metala navara dobijene ovim ispitivanim dodatnim materijalima dati su u tabeli 4 [4].

Tabela 3. Hemijski sastav i uporedne oznake ispitivanih dodatnih materijala**Table 3. Chemical composition and comparative marks of the tested filler materials**

Hemijski sastav, mas. %							
SŽ - Elektrode Jesenice	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo
EVB 50	0.08	0.60	1.0	-	-	-	-
E DUR 600	0.50	-	-	7.50	-	-	-
FILTUB DUR 16	0.45	0.60	1.60	5.50	-	-	0.80
VAC 60	0.08	0.90	1.50	-	-	-	-

Tabela 4. Mehanička svojstva čistog metala navara ispitivanih materijala**Table 4. Mechanical properties of the surface weld metal of the investigated materials**

Oznake D.M.	Mehanička svojstva				
	R _m , MPa	R _{eH} , MPa	A ₅ , %	KV, J	Tvrdoća, HRC
SŽ – Elektrode Jesenice					
EVB 50	510-610	>440	>24	>47	-
E DUR 600	-	-	-	-	57-62 HRC
FILTUB DUR 16	-	-	-	-	57-62 HRC
VAC 60	510-590	>410	>22	>47	-

Elektroda EVB 50 je bazična elektroda za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika i čeličnih limova do 610 MPa i za zavarivanje sitnozrnih čelika povišene čvrstoće. Zavari su žilavi i pri niskim temperaturama i otporni su na nastajanje prslina. Sadržaj vodonika, u metalu

šava, niži je od 5 ml/100g metala šava. Elektroda ima odlične zavarivačke, tehnološke osobine i stabilan luk. Nastala troska pri zavarivanju se lako uklanja.

Elektroda E DUR 600 je bazična elektroda legirana hromom pogodna za nanošenje tvrdih



navara na čelične delove od kojih se zahteva vrlo visoka otpornost na habanje. Primenjuje se za navarivanje delova drobilica, delova bagera, raonika plugova, pneumatskih alata, noževa za makaze, alata za presovanje, probijanje i kovanje, kao i drugih alata za rad u hladnom i toplom stanju. Navari su žilavi i otporni na udarna opterećenja. Ovom elektrodom se mogu navarivati čelici i čelični livovi.

Žica VAC 60 je žica za zavarivanje u zaštitnom gasu MAG postupkom. Pogodna je za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 530 MPa. Takođe koristi se za zavarivanje kotlovskih limova, cevi, čelika za brodogradnju, mikrolegiranih čelika i čeličnih limova.

Žica FILTUB DUR 16 je bazična srednjelegirana punjena žica, pogodna za navarivanje tvrdih navara na delove koji su izloženi procesima habanja visokog intenziteta. Navari su bez pora i prslina zbog čega su otporni na promenjiva dinamička i udarna opterećenja. Primenjuje se za navarivanje lopatica i obloga mešalica, zuba i drugih delova građevinske mehanizacije, delova drobilica kao što su konusni uvodnici, čeljusti, udarne grede, obloge i dr.

2.3. Proračun temperature predgrevanja i teorijska procena zavarljivosti

Tabela 5. Temperature predgrevanja ispitivanih materijala

Table 5. Preheating temperatures of the tested materials

Vrsta osnovog materijala	Način određivanja temperature predgrevanja	Temperatura predgrevanja T_p , °C	
		Računska	Usvojena
S355J2G3	Metod Seferijana	~ 107	110
C45		~ 218	220
42CrMo4		~ 269	270

Na osnovu dobijenih rezultata, budući da po metodi Seferijana temperatura predgrevanja direktno zavisi od CE, može se zaključiti da najpovoljniju zavarljivost ima konstrukcioni čelik, zatim ugljenični i na kraju niskolegirani poboljšani.

2.4. Priprema/navarivanje uzoraka

Priprema/sečenje osnovnih materijala za uzorke je izvedeno uz intenzivno hlađenje da bi se sprečila promena strukture usled zagrevanja. Priprema dodatnog materijala za izradu fizičkih modela

Povećan sadržaj ugljenika i legirajućih elemenata pogoršava zavarljivost čelika. Sadržaj ugljenika u čeliku iznad 0.25% svrstava materijal u grupu uslovno zavarljivih čelika. Zavarljivost dodatno pogoršavaju i legirajući elementi koji inače poboljšavaju neka druga svojstva čelika. Pored ugljenika i legirajućih elemenata na pogoršanje zavarljivosti čelika utiču i nečistoće (P i S), kao i niz drugih faktora. Postoji više računskih metoda za ocenu zavarljivosti različitih vrsta čelika, a ovde je korišćena metoda Seferijana. Proračun temperature predgrevanja za pojedine vrste osnovnog materijala je izveden za prečnik $d = 10$ mm, $d = 20$ mm i $d = 50$ mm. Za osnovne materijale S235JR, nije računata temperatura predgrevanja, jer je reč o materijalu dobre zavarljivosti, pa nema potrebe za predgrevanjem.

Temperatura predgrevanja računata je prema sledećim jednačinama:

$$CE = CE_h + CE_s = CE_h(1 + 0,005 \cdot s), \%$$

$$CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{17}, \%$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,025}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Proračunate i usvojene temperature predgrevanja za različite osnovne materijale date su u tabeli 5.

odnosi se na sušenje elektroda na temperaturi 350-400°C u trajanju od 2h. Svi modeli izrađeni su u istim laboratorijskim uslovima, a navarivanje je izvedeno u horizontalnom položaju. Temperatura predgrevanja kontrolisana je pomoću digitalnog termometra. Osnovni kriterijum za ocenu kvaliteta navarenih slojeva jeste da navar bude homogen bez pora, uključaka i prslina, kako u metalu navara tako i metalu osnovnog materijala (zoni uticaja toplote). Izbor optimalnih parametara navarivanja nije bio jednostavan, jer je bilo potreban veliki broj probi sa različitim parametrima navarivanja. Bez obzira na to, optimalne parametre navarivanja neophodno je odrediti, jer samo oni mogu dati navarene slojeve zahtevanog kvaliteta. Nakon probi različitih parametara navarivanja, usvojeni su optimalni parametri navarivanja koji su primenjeni pri izradi fizičkih modela. Ovi modeli su poslužili za ispitivanja navarenih slojeva u laboratorijskim uslovima. Procesni parametri navarivanja pri izradi fizičkih modela REL-om i obloženih elektroda dati su u tabeli 6, a procesni parametri pri izradi fizičkih modela MAG-om dati su u tabeli 7.

**Tabela 6.** Procesni parametri navarivanja primenom REL navarivanja**Table 6.** Process parameters of surfacing using REL welding

Oznaka elektrode SŽ – Elektrode Jesenice	Prečnik elektrodne žice d_e , mm	Struja navarivanja, I, A	Radni napon, U, V	Brzina navarivanja v_z , cm/s	Pogonska energija navarivanja q_i , J/cm
EVB 50	3.25	100-150	20-23	0.119-0.220	20168-25455
E DUR 600	3.25	100-150	20-23	0.119-0.220	20168-25455

Tabela 7. Procesni parametri navarivanja primenom MAG navarivanja**Table 7.** Process parameters of surfacing using MAG welding

Oznaka elektrode SŽ – Elektrode Jesenice	Protok zaštitnog gasa l/min	Prečnik elektrodne žice d_e , mm	Struja navarivanja, I, A	Radni napon U, V	Brzina navarivanja v_z , cm/s	Pogonska energija navarivanja q_i , J/cm
FILTUB DUR16	16-20	1.2	130-150	23-28	3.5-8.0	31875-13330
VAC 60	16-20	1.2	130-150	23-28	3.5-8.0	31875-13330

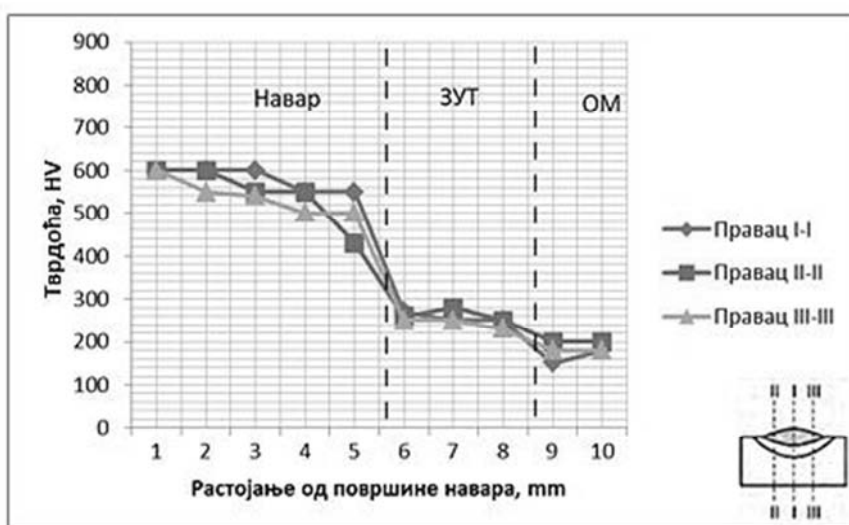
3. Rezultati i diskusija

3.1. Merenje tvrdoće

Merenje tvrdoće se može izvesti različitim eksperimentalnim metodama. Kod zavarenih i navarenih spojeva, tvrdoća se meri po Vickers metodi zbog niza prednosti, a kao glavna se izdvaja to što ova metodom ograničenja po pitanju vrednosti izmerene tvrdoće. Merenje tvrdoće za potrebe ovog rada su izvedena u akreditovanoj laboratoriji, metodom Vickers (sila utiskivanja $F \approx 100$ N) i prema odgovarajućem standardu. Dobijeni rezultati su prikazani u vidu dijagrama raspodele tvrdoće po visini navara na slikama od 1 do 10.

Tvrdoća karakterističnih zona navara meri se najčešće u tri međusobno paralelna pravca. Pravci merenja tvrdoće prikazani su za svaki konkretan slučaj, i obeleženi sa I-I, II-II, III-III.

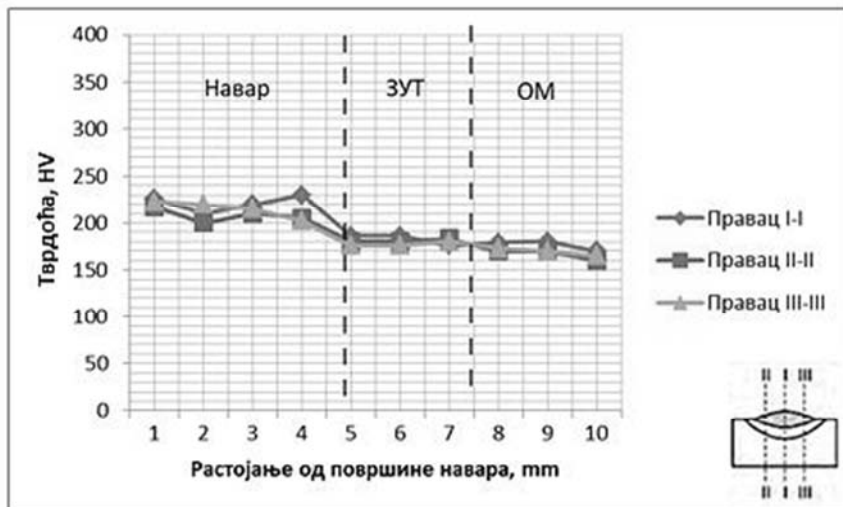
Na slici 1 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na S235JR. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara elektrodom E DUR 600. Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja.

**Slika 1.** Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.-S235JR; D.M. navara - E DUR 600**Figure 1.** Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal-S235JR; Filler metal - E DUR 600



Na slici 2 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na

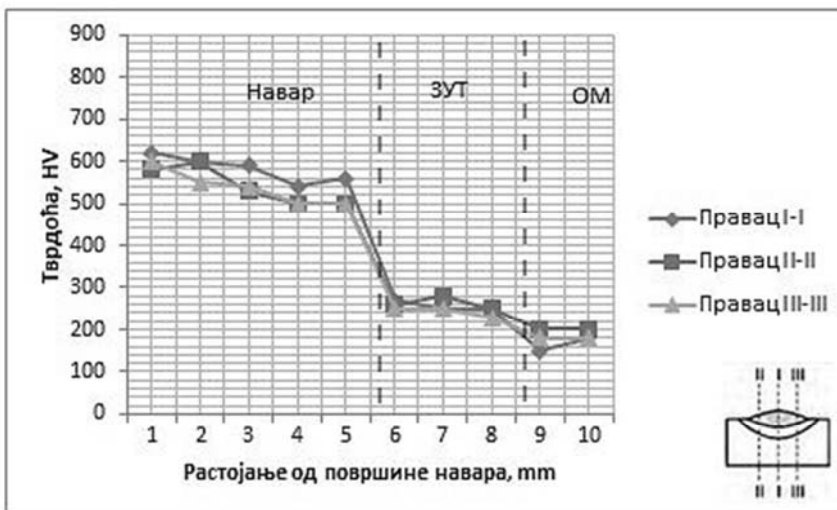
S235JR. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara elektrodom EVB 50. Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja.



Slika 2. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.-S235JR; D.M. navara – EVB 50
Figure 2. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal-S235JR; Filler metal – EVB 50

Na slici 3 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na

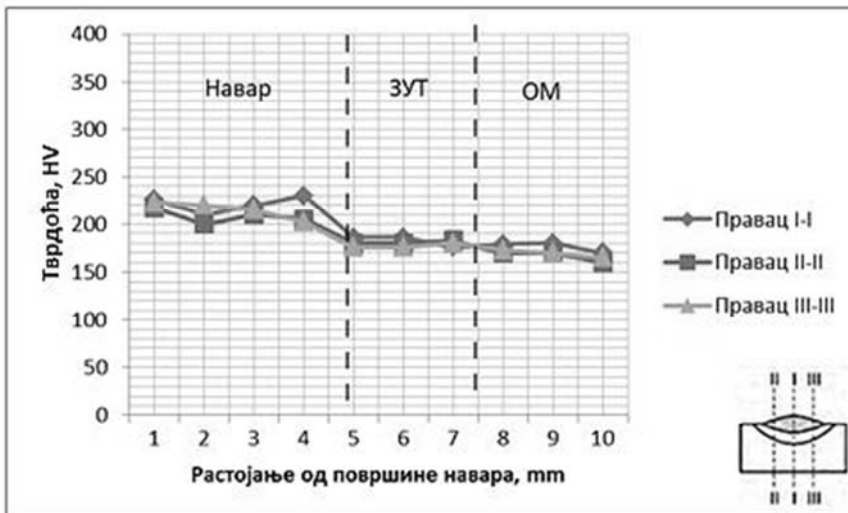
S355J2G3. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara elektrodom E DUR 600. Navarivanje je izvedeno sa predgrevanjem na 110°C.



Slika 3. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.-S355J2G3; D.M. navara - E DUR 600
Figure 3. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal -S355J2G3; Filler metal - E DUR 600

Na slici 4 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na

S355J2G3. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara elektrodom EVB 50. Navarivanje je izvedeno sa predgrevanjem na 110°C.

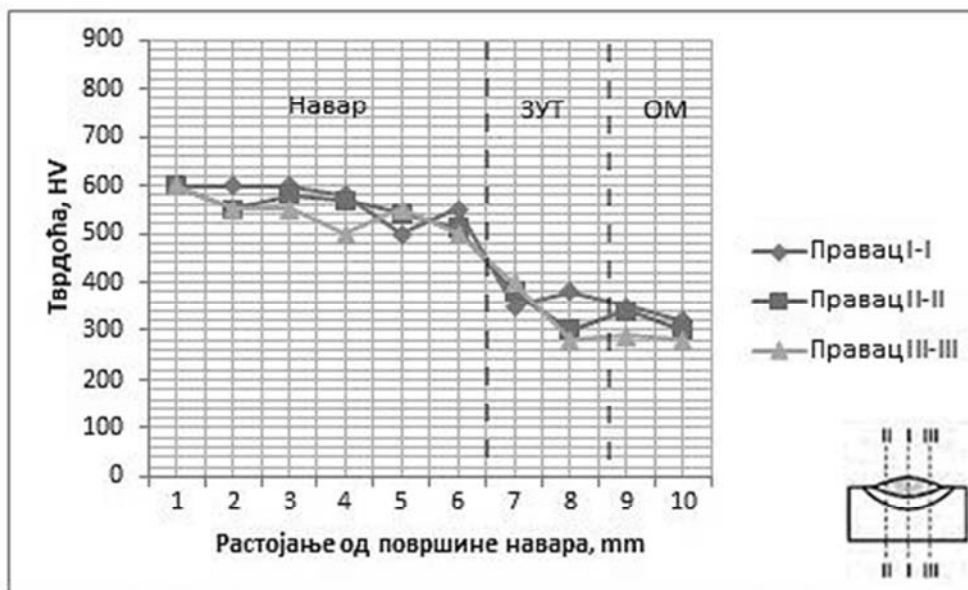


Slika 4. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.- S355J2G3; D.M. navara – EVB 50

Figure 4. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal - S355J2G3; Filler metal – EVB 50

Na slici 5 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om, elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na

C45. Navarivanje je izvedeno posle predgrevanja na 220°C, i nanošenjem navara elektrodom E DUR 600.

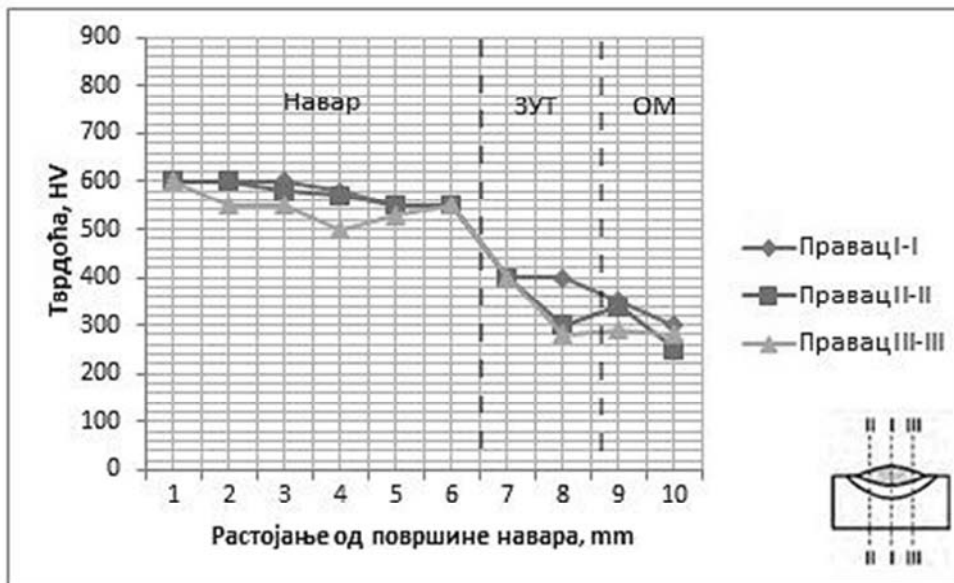


Slika 5. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M. – C45; D.M. navara – E DUR 600

Figure 5. Hardness distribution by cross-section: a) O.M. base metal – C45; Filler metal – E DUR 600

Na slici 6. prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem REL-om elektrodom prečnika $d_e = 3.25$ mm na

42CrMo4. Navarivanje je izvedeno posle predgrevanja na 280°C, i nanošenjem navara elektrodom E DUR 600.



Slika 6. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M. – 42CrMo4; D.M. navara – E DUR 600

Figure 6. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal – 42CrMo4; Filler metal – E DUR 600

Na slici 7 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem MAG-om punjenom žicom prečnika $d_z=1.2$ mm na

S235JR. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara punjenom žicom FILTUB DUR 16. Navarivanje je izvršeno bez predgrevanja.

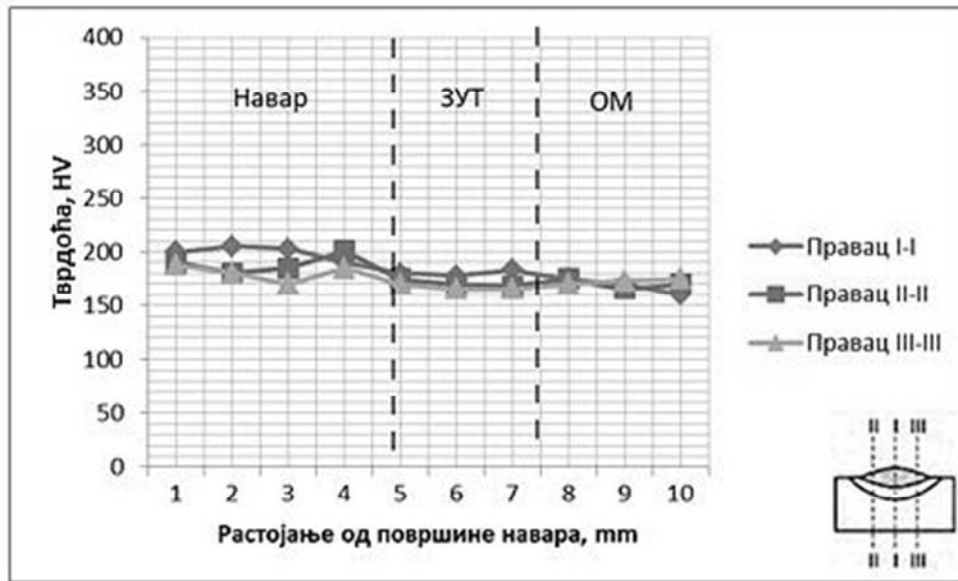


Slika 7. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M. - S235JR, D.M. navara - FILTUB DUR 16

Figure 7. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal - S235JR, Filler metal - FILTUB MAJOR 16

Na slici 8 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem MAG-om punjenom žicom prečnika $d_z=1.2$ mm na

S235JR. Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara punjenom žicom VAC 60. Navarivanje je izvedeno bez predgrevanja.



Slika 8. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.-S235JR, D.M. navara – VAC60

Figure 8. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal - S235JR, Filler metal – VAC60

Na slici 9 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem MAG-om punjenom žicom prečnika $d_z = 1.2$ mm na S355J2G3.

Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara punjenom žicom FILTUB DUR 16. Navarivanje je izvedeno sa predgrevanjem na 110°C.

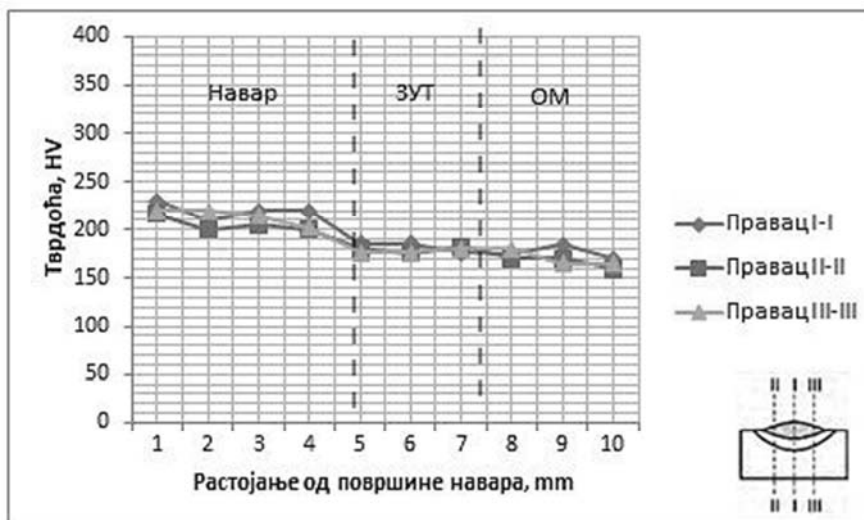


Slika 9. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M.-S355J2G3, D.M. navara - FILTUB DUR 16

Figure 9. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal - S355J2G3, Filler metal - FILTUB DUR 16

Na slici 10 prikazane su izmerene tvrdoće po zonama navarenog sloja, formiranog navarivanjem MAG-om punjenom žicom prečnika $d_z = 1.2$ mm na S355J2G3.

Navarivanje je izvedeno nanošenjem navara žicom VAC 60. Navarivanje je izvedeno sa predgrevanjem na 110°C.



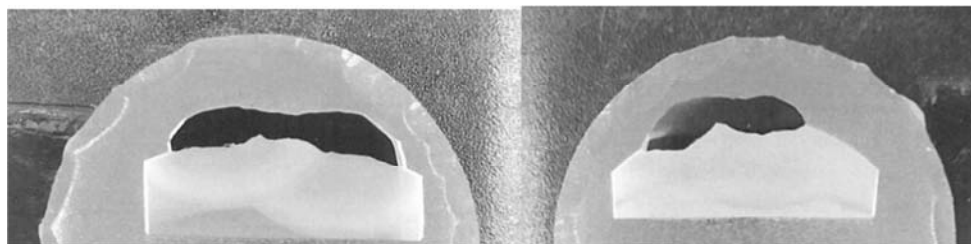
Slika 10. Raspodela tvrdoće po preseku navara: a) O.M. - S355J2G3, D.M. navara – VAC60

Figure 10. Hardness distribution by cross section: a) O.M. base metal - S355J2G3, Filler metal – VAC60

3.2. Procena mikrostrukture

U okviru sprovedenog eksperimenta navarene su šipke od različitih kvaliteta čelika (S235JR, S355J2G3, C45 i 42CrMo4) sa dva različita

određenim dodatnim materijalima (E DUR 600 i FILTUB DUR16). Metalografski izbrusci isečenih iz navarenih šipki su prikazani na slici 11.

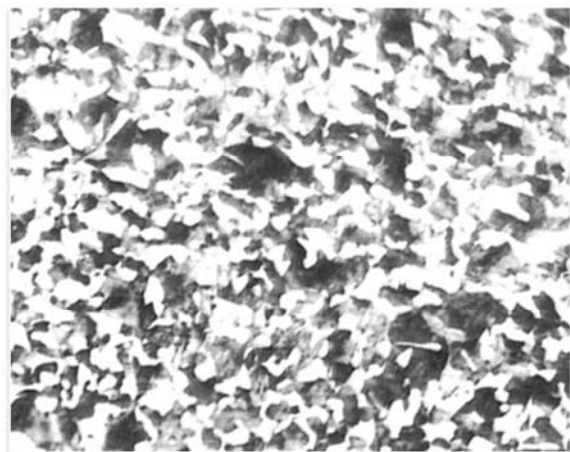


Slika 11. Izgled pripreme metalografskih izbrusaka

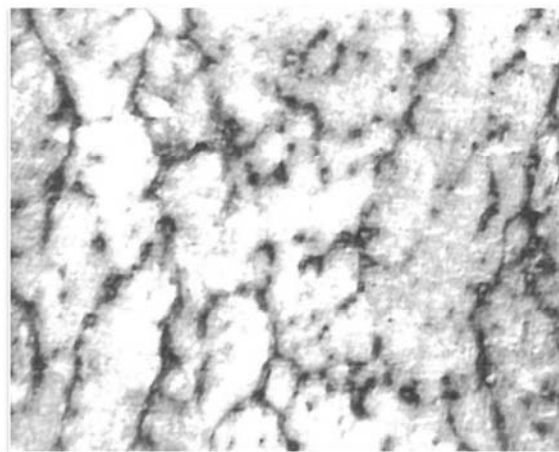
Figure 11. Appearance of preparation of metallographic samples

Zatim je na svetlosnom metalografskom mikroskopu "MCXM 500", uvećanjem do 1000 puta, izvršeno snimanje mikrostrukture svih karakterističnih zona navara (OM, MŠ i ZUT).

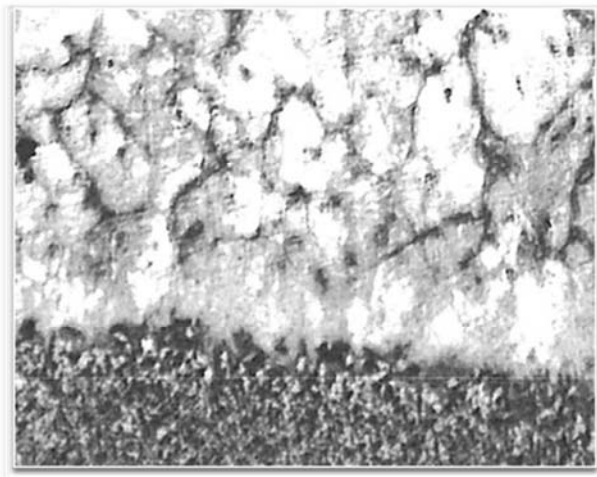
Dobijeni rezultati su prikazani na slici 12. Zbog velikog broja slika u nastavku su prikazane samo neke od dobijenih mikrostrukture.



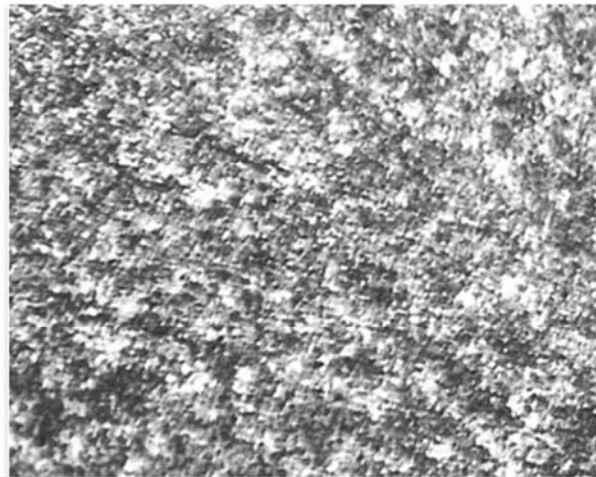
OM, Feritno-perlitna struktura, 200x



Navar, Nehomogena austenitna struktura, 200x



ZUT, Feritno-perlitna struktura, 200×



ZUT, Feritno-perlitna struktura, 200×

Slika 12. Mikrostrukture različitih zona navarenog spoja S355J2G3- E DUR 600
Figure 12. Microstructures of different zones of the surface welded joint S355J2G3- E DUR 600

Struktura ostalih navara je varirala od feritno-perlitne koja se najčešće sretala kod osnovnih materijala preko austenitne strukture najčešće navara deponovanih visokolegiranim dodatnim materijalom, pa do martenzitno-bejnitne i čisto martenzitne strukture kod navara nanetih elektrodom E DUR 600.

3.3. Komentar rezultata

Eksperimentalni deo, izveden je na fizičkim modelima, u laboratorijskim uslovima. Merenje tvrdoće pojedinih zona navara i očitavanje mikrostrukture izvedeno je na pripremljenim metalografskim izbruscima. Navarivanje je izvedeno nanošenjem sloja navara od ispitivanih dodatnih materijala na različite osnovne materijale. Od dodatnog materijala korišćene su elektrode, trgovačkog naziva E DUR 600, EVB 50, kao i žice FILTUB DUR 16, VAC 60. Od postupaka zavarivanja korišćeni su REL i MAG postupci.

Pri navarivanju čelika S235JR sa sadržajem ugljenika do 0.25% nije bilo potrebe za dodatnim merama (predgrevanje) kako bi se dobio navareni sloj zahtevanog kvaliteta, jer je osnovni materijal dobro zavarljiv.

Nasuprot tome, pri navarivanju ugljeničnih čelika sa sadržajem iznad 0.25% C i legiranih čelika koji u svom sastavu imaju i karbidotvorne legirajuće elemente, neophodna je primena dodatnih mera kako bi se poboljšala njihova zavarljivost, jer oni se svrstavaju u grupu uslovno zavarljivih čelika. Pri navarivanju ovih čelika u ZUT-u se dobijaju produkti kaljenja i tvrdoća koja je najčešće iznad dozvoljenih granica. Proces navarivanja mora se izvesti pod posebnim uslovima uz primenu predgrevanja, a

često je neophodno izvesti i neku naknadnu termičku obradu (otpuštanje, žarenje, poboljšanje i dr). Primenom prethodne ili neke naknadne termičke obrade dobijaju se povoljnije strukture manje tvrdoće, veće žilavosti, dovoljno visoke jačine i napona tečenja, što je praćeno smanjenjem nivoa sopstvenog naponsko-deformacionog stanja u materijalu. Zbog dodatnih troškova pri zavarivanju i navarivanju naknadnu termičku obradu, kad god je to moguće, treba izbegavati.

Mikrostrukturna ispitivanja su pokazala povoljne strukture za navarene uzorke, bez prslina, poroznosti, nalepljenja i drugih nepravilnosti. Osim u slučaju navarenog uzorka čelika 42CrMo4, gde se u međusloju javila minimalna poroznost. Pojava poroznosti ili pojava uključaka između navarenih slojeva može biti posledica nepravilnog zavarivanja i odstupanja od propisane tehnologije (greška zavarivača).

Ovim eksperimentalnim istraživanjem je pokazano da su konstrukcioni čelici, kvaliteta S235JR i S355J2G3, dobro zavarljivi i da za navarivanje ovih čelika nisu potrebne dodatne mere kako bi se dobio zahtevani kvalitet navarenog sloja. Nasuprot tome, čelici za poboljšanje, kvaliteta C45 i 42CrMo4, pokazuju lošiju zavarljivost i zahtevaju dodatne mere, kao što je predgrevanje pre navarivanja, a u nekim slučajevima i naknadnu termičku obradu.

Eksperimentom je pokazano i da dodatni materijal, E DUR 600 i FILTUB DUR 16, imaju veću tvrdoću navarenog sloja (~ 600 HV) i da su pogodniji za navarivanje u odnosu na dodatne materijale, EVB 50 i VAC 60, čija je tvrdoća bila približno ~250 HV.



Takođe, višeslojno navarivanje dovodi do otpuštanja materijala prethodnog sloja, što dovodi do smanjenja njegove tvrdoće i obrazovanja povoljnije strukture. Poslednji naneti sloj navara ima najveću tvrdoću, pa se kada je to neophodno, površinski deo materijala poslednjeg sloja navara odstranjuje brušenjem ili nekom drugom mašinskom obradom, što zavisi od njegove tvrdoće. Na kvalitet jednog navarenog spoja utiče više različitih faktora. Posle ovih eksperimentalnih ispitivanja mehaničkih i metalografskih svojstava navarenih slojeva, može se zaključiti da na kvalitet navarenog sloja najviše utiče primenjena

4. Zaključak

Na osnovu teorijskih i eksperimentalnih istraživanja došlo se do zaključka da je za projektovanje optimalne tehnologije, tj. modeliranje procesa, neophodna su kompleksna i dugotrajna istraživanja, zbog različitih složenih fizičko-hemijskih pojava, koje nastaju pri topljenju i kristalizaciji legura u zavarivačkoj kupki. Ova istraživanja su neophodna kako bi se dobio zahtevani kvalitet pri zavarivanju ili navarivanju.

Pri projektovanju tehnologije polazi se od svojstava osnovnog materijala, a zatim sledi izbor odgovarajućeg postupka i izbor pogodnog dodatnog materijala u zavisnosti od zahtevanih svojstava. Potom se biraju optimalni parametri zavarivanja (navarivanja) kao i prethodna, tekuća i naknadna termička obrada. Najzad se propisuje tehnika nanošenja zavara (navara) i metode procesne i završne kontrole. Kada je to neophodno predviđa se i završna mašinska obrada.

Posle analize prikazanih rezultata može se zaključiti, da se došlo do rezultata koja se mogu primeniti na tehničkim sistemima pri reparaturnom navarivanju. Međutim, da bi reparaturno navarivanje oštećenih delova tehničkih sistema bilo uspešno, mora se propisati i poštovati precizna procedura, jer samo tada se mogu očekivati pozitivni rezultati. Da bi se to postiglo neophodno je da se ovom problematikom bave stručna lica tehničke struke. Takođe, neophodne su i specijalizovane radionice sa zavarivačkim uređajima, kvalitetnim materijalima i pratećom opremom. Svaki drugi pristup ovoj problematici, neće dovesti do željenih rezultata, već može samo stvoriti dodatne probleme i nepotrebne troškove.

tehnologija navarivanja. Odnosno, pravilnim modeliranjem procesa navarivanja stvaraju se uslovi za dobijanje navarenih slojeva zahtevanog kvaliteta.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja, i provere kvaliteta nanetih navara, ukazuju da se navarivanje ovih čelika mogu izvoditi samo u pogonima koji raspolažu adekvatnom opremom i odgovarajućim stručnim kadrom.

4. Conclusion

Based on theoretical and experimental research, it was concluded that for the design of optimal technology, i.e. process modeling, complex and long-term research is necessary, due to various complex physical and chemical phenomena, which occur during the melting and crystallization of alloys in the welding bath. These studies are necessary in order to obtain the required quality when welding or surfacing.

When designing the technology, the starting point is the properties of the basic material, followed by the selection of the appropriate procedure and the selection of a suitable filler material depending on the required properties. Then the optimal parameters of welding (surfacing) as well as previous, current and subsequent heat treatment are selected. Finally, the welding technique and methods of process and final control are prescribed. When necessary, final machining is provided.

After the analysis of the presented results, it can be concluded that the obtained results can be applied to technical systems during reparative surfacing.

However, in order for reparative surface welding of damaged parts of technical systems to be successful, a precise procedure must be prescribed and followed, because only then can positive results be expected. In order to achieve this, it is necessary that this issue be dealt with by experts in the technical field. Also, specialized workshops with welding devices, quality materials and accompanying equipment are necessary. Any other approach to this problem will not lead to the desired results, but can only create additional problems and unnecessary costs.



Zahvalnica

Zahvaljujemo se kompaniji Alfa Technics d.o.o iz Svilajнца koja je obezbedila sav potreban osnovni i dodatni materijal za navarivanje, kao i materijalne i ljudske resurse neophodne za pripremu i ispitivanje uzoraka.

Literatura / References

[1] D. Arsić, V. Lazić, R. R. Nikolić, B. Hadzima, Weldability estimation of steels for hot work by the CCT diagrams, *Advances and Trends in Engineering and Technologies II*, Edited by Al Ali & Platko, CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, 2017, pp. 9-14.

[2] V. Lazić, D. Arsić, R. R. Nikolić, S. Aleksandrović, M. Đorđević, B. Hadzima, Estimate of weldability and selection of optimal welding technology for the cover of a tube girder made of the C-Mn high strength steel, XLIV International conference ZVARANIE 2016, Tatranska Lomnica, Slovakia, 9-11 November 2016, pp. 17-27.

Acknowledgment

We would like to thank the company Alfa Technics d.o.o. from Svilajnac, which provided all the necessary basic and filler material for surfacing, as well as the material and human resources necessary for the preparation and testing of samples.

[3] EN 10025 - Hot rolled products of structural steels, European Committee for Standardization, 2005.

[4] M. Ilić, Teorijsko-eksperimentalna procena zavarljivosti ugqeničnih i legiranih čelika, master rad, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2021.

32. SAVETOVANJE SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM “ZAVARIVANJE 2022”



Hotel Omorika na Tari
od 12. do 15. oktobra 2022. godine



Zahvalnica

Zahvaljujemo se kompaniji Alfa Technics d.o.o iz Svilajнца koja je obezbedila sav potreban osnovni i dodatni materijal za navarivanje, kao i materijalne i ljudske resurse neophodne za pripremu i ispitivanje uzoraka.

Literatura / References

[1] D. Arsić, V. Lazić, R. R. Nikolić, B. Hadzima, Weldability estimation of steels for hot work by the CCT diagrams, *Advances and Trends in Engineering and Technologies II*, Edited by Al Ali & Platko, CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, 2017, pp. 9-14.

[2] V. Lazić, D. Arsić, R. R. Nikolić, S. Aleksandrović, M. Đorđević, B. Hadzima, Estimate of weldability and selection of optimal welding technology for the cover of a tube girder made of the C-Mn high strength steel, *XLIV International conference ZVARANIE 2016*, Tatranska Lomnica, Slovakia, 9-11 November 2016, pp. 17-27.

Acknowledgment

We would like to thank the company Alfa Technics d.o.o. from Svilajnac, which provided all the necessary basic and filler material for surfacing, as well as the material and human resources necessary for the preparation and testing of samples.

[3] EN 10025 - Hot rolled products of structural steels, European Committee for Standardization, 2005.

[4] M. Ilić, Teorijsko-eksperimentalna procena zavarljivosti ugqeničnih i legiranih čelika, master rad, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2021.

32. SAVETOVANJE SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM “ZAVARIVANJE 2022”



Hotel Omorika na Tari
od 12. do 15. oktobra 2022. godine