



B. Katavić, B. Jegdić, Z. Odanović, N. Hut, M. Mladenović, D. Jaković, M. Ristivojević

PREDVIĐANJE OPTIMALNIH PARAMETARA INTERVENTNOG REPARATURNOG ZAVARIVANJA ČELIKA 13CrMo4-5 ANALITIČKIM METODAMA

OPTIMAL PARAMETERS ESTIMATION BY THE ANALYTICAL METHODS FOR THE EMERGENCY REPAIR WELDING OF THE 13CrMo4-5 STEEL

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC: 621.791:669.14'26'28

Rad primljen / Paper received:

April 2010.

Ključne reči: reparaturno zavarivanje, čelik 13CrMo 4-5, elementi kotlova i cevi.

Izvod

Već dugi niz godina se čelik 13CrMo4-5 (~Č7400) primenjuje za izradu delova termoenergetskih postrojenja kao što su elementi kotlova i cevi. Ovaj čelik pripada grupi uslovno zavarljivih čelika, koji mogu uspešno da se zavaruju uz primenu posebnih mera, kao što su predgrevanje, termička obrada nakon zavarivanja i drugih mera predostrožnosti, a obično se koristi dodatni materijal sličnog hemijskog sastava. Obzirom na specifičnost primene, pri reparaturnom zavarivanju posebno interventnom zavarivanju, potrebno je voditi računa o parametrima procesa zavarivanja i izboru dodatnih materijala. U radu je izvedena proračunska analiza i predviđanje optimalnih parametara reparaturnog zavarivanja sa ciljem dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja sa zahtevanim mehaničkim osobinama bez naknadne termičke obrade. Pored toga izvršen je kontrolni proračun čvrstoće metala šava za dodatni materijal sličnog hemijskog sastava, a na osnovu predloženih parametara zavarivanja.

* Rad je izlagan na 26. savetovanju Zavarivanje 2010 - Tara

Adresa autora / Author's address:

B. Katavić, B. Jegdić, Institut Goša, Milana Rakića 35, Beograd, Srbija. E-mail: boris.katavic@institutgosa.rs; zoran.odanovic@institutims.rs

Z. Odanović, N. Hut, M. Mladenović, D. Jaković, IMS Institut, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija

M. Ristivojević, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd, Srbija.

Keywords: repair welding, steel 13CrMo 4-5, elements of pressure vessel and pipes.

Abstract

Over the years 13CrMo4-5 (~ Č 7400) steel is applied for production of the parts as pressure vessels and pipes in the thermo energetic plants. Steel 13CrMo4-5 is conditionally weldable and it could be successfully welded and weld repaired with the special care and if preheating and post weld heat treating (PWHT) procedure are applied. It is usually welded with similar filler material. In consideration to specific application of the 13CrMo4-5 steel, in the case of breakdown and emergency repair welding, special care have to be taken to defining welding process parameters and selection of the filler materials. In this investigation a results of the calculations and estimations for the repair welding parameters is based on the analytical equations. Analysis is performed to obtaining optimal parameters for sound welded joint with optimal quality and mechanical properties without PWHT of the joint. Also, calculations of the weld metal strength are performed on the base of previously defined welding parameters for the filler metal similar to base metal.

UVOD

Produženje radnog veka delova termoenergetskih postrojenja u odnosu na projektovani, zbog ograničenja koja su uslovljena sigurnosnim zahtevima, predstavlja veliku prednost sa ekonomskog stanovišta. U toku eksploatacije ovih postrojenja, koja konstantno rade u uslovima povišenih i visokih temperatura, može doći do oštećenja i lomova homogenih materijala i zavarenih spojeva, kao posledica puzanja, zamora i oksidacije. Jedan od najekonomičnijih načina revitalizacije delova termoenergetskih postrojenja je reparaturno zavarivanje [1-4]. Danas su u primeni raznovrsne tehnologije reparaturnog zavarivanja, od kojih se neke tzv. "klasične" intenzivno primenjuju u održavanju delova termoenergetskih postrojenja godinama unazad.

Nove tehnologije reparaturnog zavarivanja čelika za povišene temperature kao i vatrootpornih i vatropostojanih čelika, popularano nazvane "reparaturno zavarivanje na hladno", za razliku od klasičnih tehnologija, izvode se bez predgrevanja i/ili termičke obrade posle zavarivanja. Ove tehnologije omogućavaju da se, bez potpunog zaustavljanja postrojenja, a uzimajući u obzir ograničenja koja se odnose na složenost uslova rada i neophodna ispitivanja kvaliteta obavljenih radova, izvrše na licu mesta u toku rada postrojenja [5, 6].

U ovom radu, koji predstavlja deo istraživanja obuhvaćenih projektom "Osvajanje novih tehnologija reparaturnog zavarivanja za interventne remonte termoenergetskih postrojenja" su prikazani rezultati



analitičke procena zavarljivosti osnovnog materijala čelika 13CrMo4-5 [7], predviđanja optimalnih parametara reparaturnog zavarivanja ručnim elektrolučnim postupkom sa ciljem sprečavanja pojave hladnih prslina i dobijanja spoja sa zahtevanim mehaničkim osobinama bez naknadne termičke obrade.

Pored toga izvršen je kontrolni proračun čvrstoće metala šava za dodatni materijal sličnog hemijskog sastava, a na osnovu predloženih parametara zavarivanja [8, 9]. Celokupna analiza obavljena je na osnovu analitičkih metoda zasnovanih na numeričkim jednačinama prikazanim u literaturi [7, 9]. Proračun se zasniva na promenljivim parametrima (l , U , v , T_p) i konstantnim parametrima (δ , i , η).

EKSPERIMENT

Osnovni materijal

Analiza hemijskog sastava uzorka čelika 13CrMo 4-5, u obliku lima debljine 10 mm, određena je spektrofotometrijskom metodom i data je u tabeli 1. Hemijski sastav čelika odgovara zahtevima standarda SRPS EN 10028-2/2003. Ispitivane mehaničke osobine čelika i prema standardu SRPS EN 10028-2/2003 su prikazane u tabeli 2.

Dodatni materijal

Izbor dodatnog materijala izvršen je na osnovu kvaliteta i analitičke procene zavarljivosti osnovnog materijala koji su prikazani u radu [7] i tehnološkog postupka.

Predviđeno je da se u slučaju konvencionalne tehnologije i tehnologije sa kontrolisanim unosom

toplote primeni ručni elektrolučni postupak (E) i dodatni materijal hemijskog sastava sličnog osnovnom materijalu, oznake Castolin 71D čije su osobine date u tabelama 3 i 4.

REZULTATI I DISKUSIJA

Čelik 13CrMo 4-5 pripada grupi niskolegiranih konstrukcionih čelika za rad na povišenim temperaturama. Primenjuje se na temperaturama do 600°C, gde se zahteva relativno visoka čvrstoća, koja se ostvaruje feritno perlitnom mikrostrukturom sa dispergovanim talozima karbida Mo, koji daju čvrstoću na visokim temperaturama i karbidima Cr koji povećavaju otpornost ka oksidaciji [3, 5, 6].

Dijagram kontinuiranog hlađenja (KH) za čelik 13CrMo 4-5 [3] ukazuje da je pri većim brzinama hlađenja u strukturi prisutan martenzit i beinit. Većinu delova izradjenih od čelika 13CrMo 4-5 karakteriše feritno perlitna i/ili feritno beinitna mikrostruktura. U slučaju zavarivanja, pri čemu se ostvaruju i veće brzine hlađenja, kod ovog čelika je prisutna martenzitno - beinitna mikrostruktura i pri hlađenju na vazduhu, što ukazuje na sklonost ka pojavi krutih struktura i prslina u ZUT-u [4-6].

Rezultati analitičke procene zavarljivosti, transformacionog ponašanja i temperature predgrevanja, prikazanih u radu [7], ukazuju da je ispitivani čelik zavarljiv primenom konvencionalnih postupaka zavarivanja, ali uz primenu odgovarajućih mera predostrožnosti. To znači da je u toku zavarivanja potrebno voditi računa o temperaturi predgrevanja, brzini zagrevanja, hlađenja i temperaturi međuprolaza, odnosno o termičkom ciklusu zavarivanja.

Tabela 1: Hemijski sastav čelika 13CrMo 4-5 (mas.%)

Vrsta analize	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
SRPS EN 10028-2	0,08-0,18	0,15-0,35	0,4-1,0	max. 0,025	max. 0,030	0,7-1,15	0,40-0,60
ispitivani čelik	0,17	0,28	0,59	0,009	0,013	1,07	0,42

Tabela 2: Mehaničke osobine čelika 13CrMo 4-5

Vrsta analize	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %	Kv, J
SRPS EN 10028-2	min. 300	450-600	min. 20	min. 31
ispitivani čelik	436	540	35	83,5

Tabela 3: Hemijski sastav čistog metala šava (mas.%)

Standard/Oznaka		Hemijski sastav, mas.%						
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
DIN 8575	E CrMo1 R 25, (Castolin 71D)	0,06	0,30	0,50	1,09	0,49	/	ostalo

Tabela 4: Mehaničke osobine čistog metala šava [8]

Standard / Oznaka		Mehaničke osobine				
		R _m , MPa	R _{p0,2} min, MPa	A ₅ min, %	Kv min., J	HB
DIN 8575	E CrMo1 R 25, (Castolin 71D)	490-590	380	22	55	~310



U tom cilju izvedena je proračunska analiza, korišćenjem softvera japanskog instituta za zavarivanje pod nazivom "weld simulator" [9], i predviđanje optimalnih parametara reparaturnog zavarivanja sa ciljem sprečavanja pojave hladnih prslina i dobijanja spoja sa zahtevanim mehaničkim osobinama bez naknadne termičke obrade.

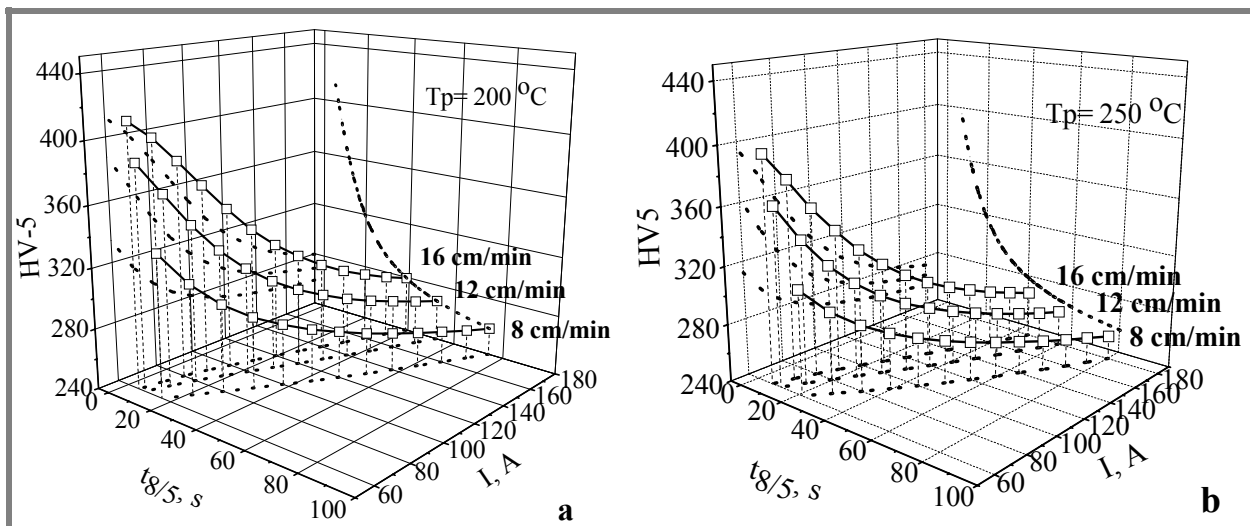
Analiza je izvedena za zavarivanje čelika 13CrMo 4-5 u obliku lima debljine 10 mm, čije su osobine prikazane u tabelama 1 i 2, REL (E) postupkom sa dodatnim materijalom sličnog hemijskog sastava osnovnom materijalu, oznake Castolin 71D [8], prečnika elektroda $\varnothing 2.5$ mm, $\varnothing 3.25$ mm $\varnothing 4.0$ mm.

Hemijski sastav i mehaničke osobine dodatnog materijala prikazane su u tabelama 3 i 4. Predloženi uslovi zavarivanja su: $I = 60 - 180$ A; $U = 22 - 28$ V; $v = 8, 12$ i 16 cm/min; $\eta = 0.8$.

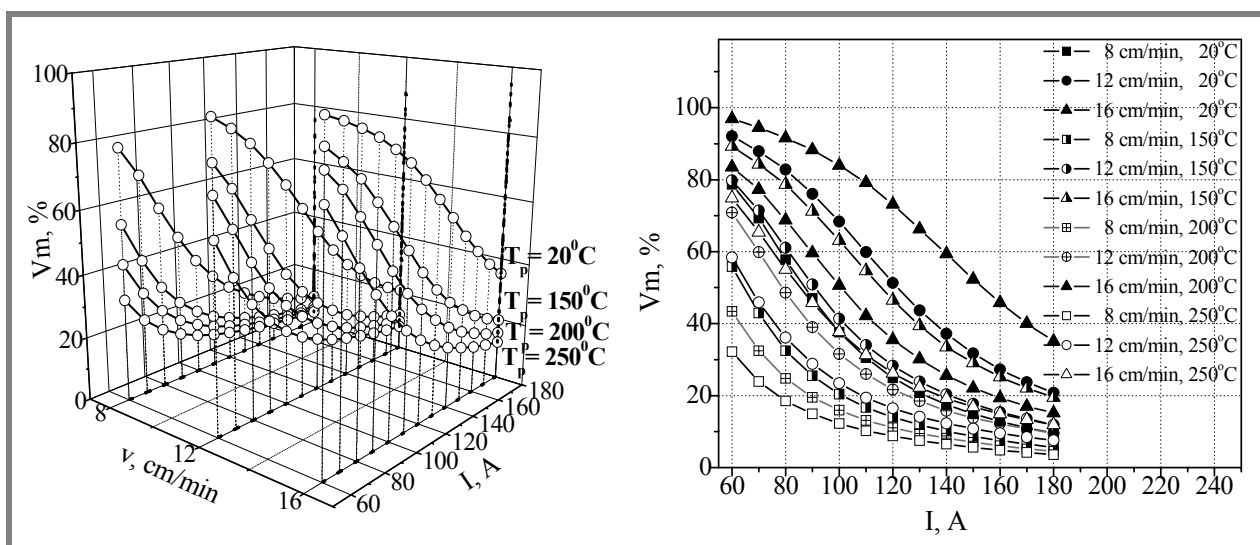
Temperature predgrevanja, koje su definisane na osnovu prethodnih analiza [7] su $T_p = 150^\circ\text{C}$, 200°C i 250°C . Pored toga, izvedena je i analiza bez predgrevanja ($T_p = 20^\circ\text{C}$).

Na slikama od 1 do 4 prikazane su je zavisnosti predloženih parametara zavarivanja (I - struja zavarivanja, U - napon zavarivanja, v - brzina zavarivanja, T_p - temperatura predgrevanja, E_p - unešena energija) i parametara kao što su: $t_{8/5}$ - vreme hlađenja (sec); HV5 - tvrdoća i V_m - udeo martenzita (%) u ZUT-u zavarenog spoja.

Na osnovu rezultata prikazanih na slikama 1, 3 i 4 generalno se može reći da analiza predloženih uslova zavarivanja ukazuje da se tvrdoća u ZUT-u manja od 350 HV dobija pri nižim brzinama zavarivanja i/ili višim strujama zavarivanja iz ispitivanog opsega. Isto se može konstatovati i za više energije zavarivanja i više temperature predgrevanja iz ispitivanog opsega.



Slika 1: Zavisnost tvrdoće (HV5) i vremena hlađenja ($t_{8/5}$) u ZUT-u od struje (I) i brzine zavarivanja (v) pri temperaturi predgrevanja T_p : a) 200°C i b) 250°C .



Slika 2: Zavisnost udela martenzita V_m od struje zavarivanja I , brzine zavarivanja v , pri temperaturama predgrevanja $T_p = 150^\circ\text{C}$, 200°C , 250°C i bez predgrevanja $T_p = 20^\circ\text{C}$.

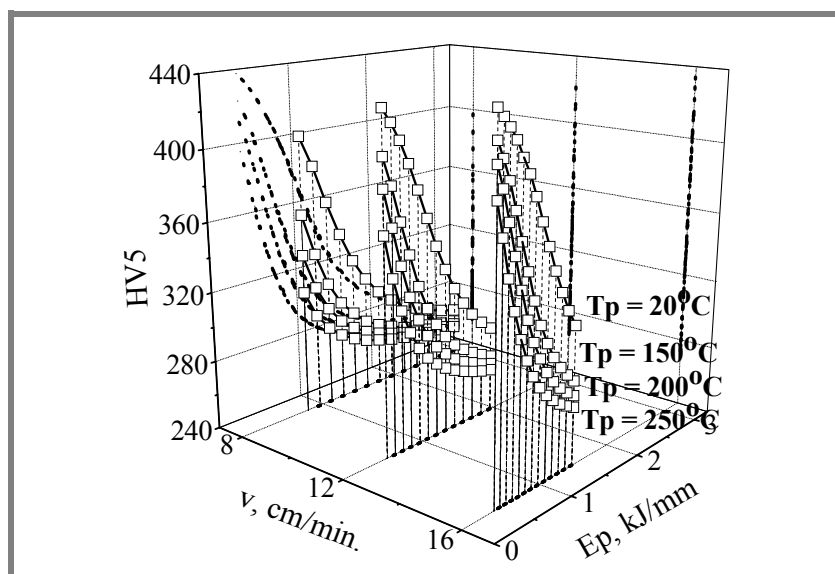


Tačnije, najmanje tvrdoće u ZUT-u (< 350 HV) dobijaju se porastom struje zavarivanja u intervalu od 60 - 180 A, unešene energije (linijske energije) u intervalu od 0.8-2.9 kJ/mm i temperature predgrevanja od 200°C i 250°C , pri najmanjoj brzini zavarivanja od 8 cm/min. (slika 4b). Pored toga, očigledno je sa slike 2 da se i najmanji udeo martenzita (Vm), kao i tvrdoća ZUT-a (HV), prikazano na slici 1 i sl. 4b, postiže pri navedenim uslovima zavarivanja.

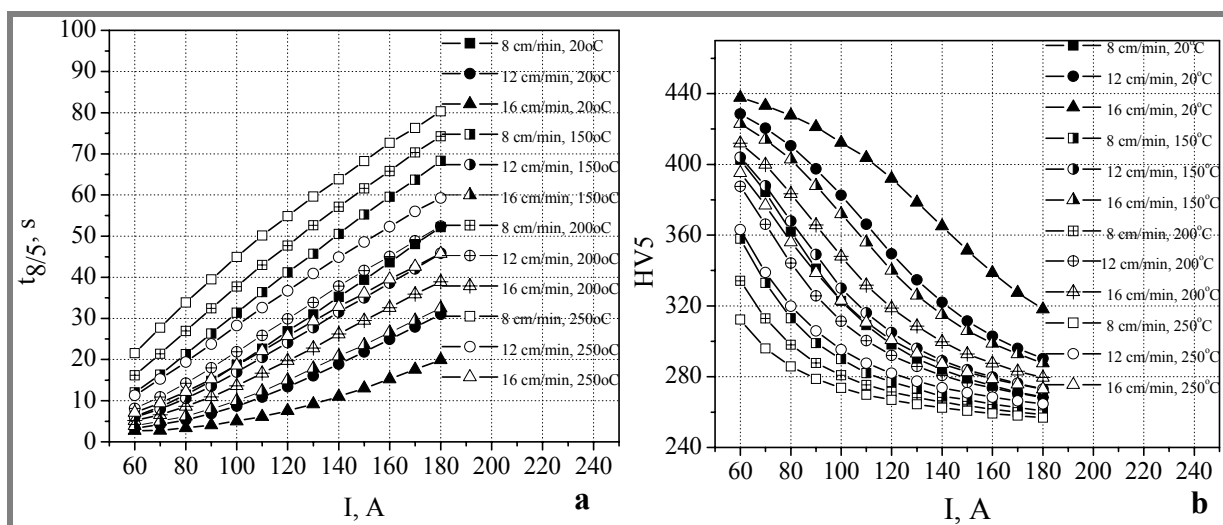
U istim uslovima zavarivanja, dobija se i najduže vreme hlađenja (sl. 4a), koje pri temperaturi predgrevanja $T_p = 200^{\circ}\text{C}$ iznosi $t_{8/5} = 16 - 74$ sec, odnosno pri $T_p = 250^{\circ}\text{C}$ iznosi $t_{8/5} = 22 - 80$ sec. Analiza rezultata pokazuje da pri porastu temperature predgrevanja od $T_p = 20$ do 250°C pri konstantnoj brzini zavarivanja, opada

potrebna struja zavarivanja od 90 do 60A ($v = 8$ cm/min.), od 130 do 70A ($v = 12$ cm/min.) i od 160 do 90A ($v = 16$ cm/min.). Istovremeno energija zavarivanja opada u istom intervalu od 1.3 do 0.64 kJ/mm, za navedene brzine zavarivanja. Minimalno vreme hlađenja u svim uslovima je jednako i iznosi $t_{8/5} > 15$ sec.

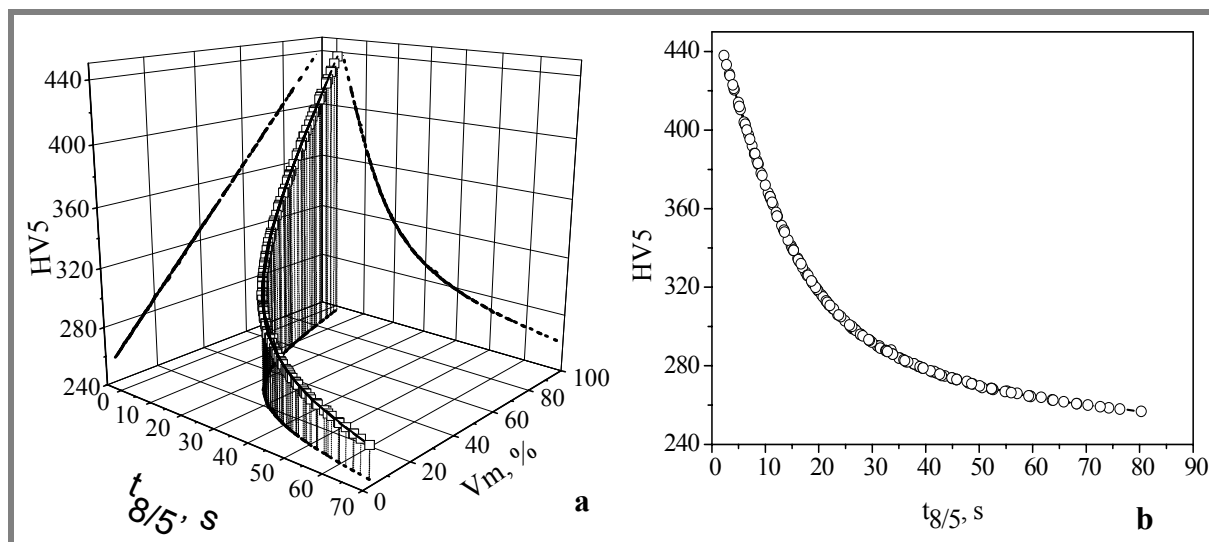
Na slici 5 u obliku trojnog (sl. 5a) i dvojnog (sl. 5b) dijagrama prikazana je međuzavisnost tvrdoće, vremena hlađenja i udela martenzita za navedene uslove zavarivanja ($I = 60 - 180$ A; $U = 22,4 - 27,2$ V; $v = 8, 12$ i 16 cm/min; $\eta = 0.8$) čeličnog lima 13CrMo4-5 debljine $\delta = 10$ mm. Očigledan je pad tvrdoće ispod 350 HV pri produženju vremena hlađenja $t_{8/5} > 15$ sec, za navedene uslove zavarivanja.



Slika 3: Zavisnost tvrdoće (HV5) ZUT-a od unešene energije zavarivanja (E_p) i brzine zavarivanja (v) pri temperaturi predgrevanja $T_p = 150^{\circ}\text{C}$, 200°C i 250°C i bez predgrevanja $T_p = 20^{\circ}\text{C}$.



Slika 4: Zavisnost (a) vremena hlađenja ($t_{8/5}$) i (b) tvrdoće (HV5) ZUT-a od struje zavarivanja (I), pri temperaturi predgrevanja $T_p = 150^{\circ}\text{C}$, 200°C i 250°C i bez predgrevanja $T_p = 20^{\circ}\text{C}$ i brzini zavarivanja $v = 8$ cm/min, 12 cm/min i 16 cm/min.



Slika 5: Trojni dijagram zavisnosti (a) tvrdoće HV5 i udela martenzita V_m od vremena hlađenja $t_{8/5}$ i (b) dvojni dijagram zavisnosti tvrdoće HV5 od vremena hlađenja $t_{8/5}$, za temperature predgrevanja $T_p = 150^\circ\text{C}$, 200°C i 250°C i bez predgrevanja $T_p = 20^\circ\text{C}$ i brzini zavarivanja $v = 8$ cm/min, 12 cm/min i 16 cm/min.

Izbor dodatnog materijala izvršen je na osnovu kvaliteta i analitičke procene zavarljivosti osnovnog materijala kao i vrste tehnologije zavarivanja [7].

U slučaju konvencionalne tehnologije i tehnologije sa kontrolisanim unosom toplote upotrebljen je dodatni materijal oznake Castolin 71D (tabele 3 i 4). U cilju dobijanja spoja sa zahtevanim mehaničkim osobinama bez naknadne termičke obrade, izvršen je kontrolni proračun čvrstoće metala šava prema metodi japanskih autora a na osnovu predloženih uslova zavarivanja.

Ova metoda N. Yurioka po IIW Doc IX-2058-03 zasniiva se prvo na proračunu tvrdoće metala šava na osnovu hemiskog sastava dodatnog materijala i vremena hlađenja ($t_{8/5}$), a potom na konvertovanju tvrdoće u čvrstoću metala šava[9].

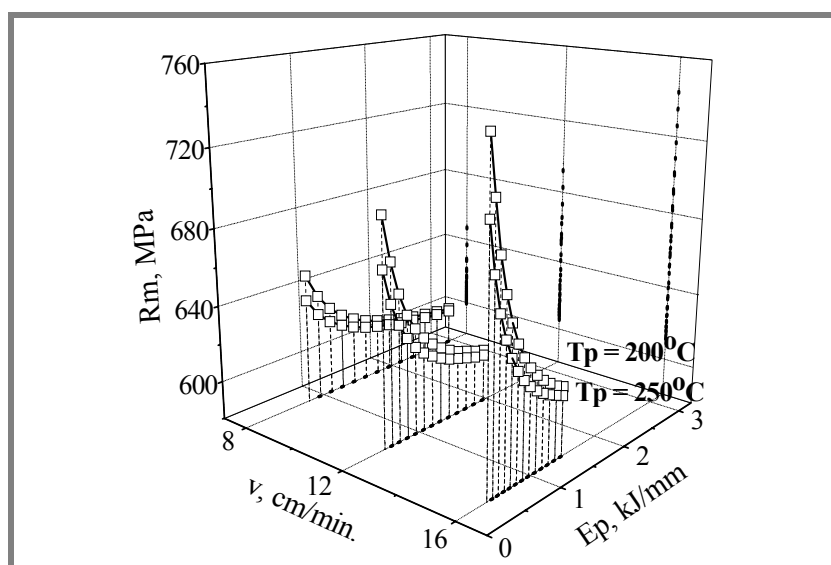
Na slici 6 prikazana je zavisnost čvrstoće metala šava od struje zavarivanja I i vremena hlađenja $t_{8/5}$, pri

brzinama zavarivanja $v = 8, 12$ i 16 cm/min. i temperaturi predgrevanja $T_p = 250^\circ\text{C}$.

Zavisnost čvrstoće metala šava R_m od linijske energije E_p i brzine zavarivanja, pri temperaturama predgrevanja $T_p = 200^\circ\text{C}$ i 250°C prikazana je na sl. 7.

Ako se usvoji da čvrstoća metala šava ne treba da bude veća od standardom propisane max. čvrstoće osnovnog metala (tabela 2), odnosno da je $R_m \leq 600$ MPa, zavarivanje treba izvesti sa najmanjom brzinom zavarivanja $v = 8$ cm/min, temperaturom predgrevanja $T_p = 200^\circ\text{C}$ do 250°C , unešenom energijom > 2.1 kJ/mm i temperaturom međuprolaza $250^\circ\text{C} \leq T_m \leq 350^\circ\text{C}$.

U navedenim uslovima zavarivanja proračunato vreme hlađenja $t_{8/5}$ je veće od 60 sec.



Slika 7: Zavisnost čvrstoće metala šava R_m od unešene energije zavarivanja (E_p) i brzine zavarivanja (v) pri temperaturi predgrevanja $T_p = 200^\circ\text{C}$ i 250°C .



Analiza rezultati proračuna pokazuje da bi se pri standardnoj proceduri zavarivanja najoptimalnija čvrstoća zavarenog spoja mogla dobiti pri parametrima zavarivanja koji su niži od prethodno navedenih ali uz obavezno predgrevanje i termičku obradu nakon zavarivanja u intervalu od 700-740°C/1h.

Međutim, u slučajevima interventnog reparaturnog zavarivanja, gde se reparatura mora obaviti za kratko vreme i bez termičke obradu nakon zavarivanja, primena konvencionalnog postupka ne može dati kvalitetan zavareni spoj.

Nasuprot tome, proračuni u ovom radu su pokazali da je reparaturno zavarivanje uz primenu dodatnog materijala sličnog hemijskog sastava sa osnovnim materijalom, moguće uz primenu tehnologije sa kontrolisanim unosom toplote, odnosno sa predgrevanjem i bez naknadne termičke obrade ali uz ogovarajući plan zavarivanja.

U tom slučaju odgovarajući način polaganja zavara i održavanja predviđene temperature međuprolaza kao i mala brzina hlađenja, omogućili bi dobijanje zavarenog spoja zahtevanih mehaničkih osobina. Navedena predviđanja termičkog ciklusa su korišćena u definisanju tehnologije reparaturnog zavarivanja primenjene u daljim istraživanjima.

ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati analitičkog predviđanja optimalnih parametara reparaturnog zavarivanja ručnim elektrolučnim postupkom, a u cilju definisanja tehnologije sa kontrolisanim unosom toplote, kod koje bi, za razliku od klasične tehnologije, bilo izostavljeno predgrevanje i/ili termička obrada posle zavarivanja. Pored toga izvršen je kontrolni proračun čvrstoće metala šava za dodatni materijal sličnog hemijskog sastava osnovnom materijalu (Castolin 71D), a na osnovu predloženih parametara zavarivanja.

Rezultati analitičke procene, primenom softvera japanskog instituta za zavarivanje pod nazivom "weld simulator" [9], su ukazali da je moguće interventno reparaturno zavarivanje bez predgrevanja i/ili naknadne

termičke obrade, sa dodatnim materijalom sličnog hemijskog sastava osnovnom materijalu. Parametri zavarivanja definisani na ovaj način primenjeni su u eksperimentalnom delu istraživanja.

ZAHVALNOST

Rad je uradjen u okviru realizacije projekta 19023 "Osvajanje novih tehnologija reparaturnog zavarivanja za interventne remonte termoenergetskih postrojenja", koji je sufinansiran od strane Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Srbije.

LITERATURA

- [1] Klenk A., Issler S., Shibli I. A., Williams J. A, Some Characteristics of Weld Repair for Creep Applications, OMMI, 2, Issue 1, (2003), pp. 1-32
- [2] Pecha J., Hakl J., Vlasák T., Zavarivanje opreme za energetiku – sadašnjost i budućnost, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 53 (2008), 2, pp. 51-60.
- [3] Budzakova E., Dune D., Law M, The performance of an emergency cold weld repair on a 2.25Cr-1Mo longitudinally seam welded pressure vessel, Materials Forum, 27, (2004), pp. 45-53.
- [4] Grabulov V., Odanović Z., Katavić B., Momčilović S., Tasić B, Reparaturno zavarivanje diska radnog kola mlina za uglj od Cr-Mo čelika, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 53, (2008), 4, pp 147-157.
- [5] Silva C., de Albuquerque V., Moura C., Evaluation of AISI 4140 steel repair without PWHT, Journal of Materials Engineering and Performance, 18 (2009), 3, pp. 324-331.
- [6] Gandy D., The Grades 11 and 12 Low Alloy Steel Handbook: 1¼Cr½Mo, 1Cr½Mo 13CrMo44, 620/621, STPA 22/23., EPRI, Palo Alto, CA: 2007, pp. 2.1-4.9.
- [7] Katavić B., Jegdić B., Odanović Z., Đurđević M., Hut N., Mladenović M., Jaković D., Analitička procena mogućnosti primene interventnog reparaturnog zavarivanja čelika 13CrMo 4-5", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 53, (2009), 4, pp. 149-155.
- [8] Katalog Castolin Eutectic (www.castolin.rs)
- [9] www.it.jwes.or.jp/weld_simulator