



Miloš Pavlović^{1,a}, Vladan Jeremić^{1,b}, Nenad Rajić^{1,c}

PONAŠANJE MATERIJALA X10CrMoVNb9-1 PRILIKOM PONOVLJENOG TERMIČKOG TRETMANA TOKOM MONTAŽE

BEHAVIOR OF X10CrMoVNb9-1 MATERIAL DURING REPETED THERMAL TREATMENT DURING INSTALLATION

Stručni rad / Professional paper

Adresa autora / Author's address:

¹Zavod za zavarivanje D.O.O., Grčića Milenka 67, 11107 Beograd, Srbija

email: ^amilospavlovic@zzz.co.rs; ^bvladanjeremic@zzz.co.rs; ^cnenadrajic@zzz.co.rs

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Decembar 2022.

Ključne reči: X10CrMoVNb9-1, termička obrada, mehaničke osobine, mikrostruktura.

Keywords: X10CrMoVNb9-1, heat treatment, mechanical properties, microstructure.

Rezime

U radu su prikazani uporedni rezultati ispitivanja uzoraka kolektora od čelika X10CrMoVNb9-1. Ispitivan je uticaj ponovljene termičke obrade na osobine materijala, pri čemu su uzorci prošli različit broj termičkih ciklusa. Ovaj materijal se najčešće koristi za cevi i cevne priključke otporne na visoke pritiske i temperature. Čelik se odlikuje visokim svojstvima termičke čvrstoće, zbog čega se koristi u termoelektranama za cevi pregrejača, kolektora kao i za cevi parovoda visokog pritiska. Ima primenu i pri visokim temperaturama čak do 600°C. Cilj ovog rada je ponašanje materijala prilikom ponovljene termičke obrade koja se tokom montaže cevovoda često dešava, a uzrokovana je popravkom grešaka u zavarenom spoju, pogrešnom montažom cevovoda i sličnim postupcima.

Abstract

The paper presents comparative test results of X10CrMoVNb9-1 steel collector samples. The influence of repeated heat treatment on the properties of the material was investigated, and the samples underwent a different number of thermal cycles. This material is most often used for pipes and pipe connections resistant to high pressures and temperatures. Steel is characterized by high thermal strength properties, which is why it is used in thermal power plants for superheater pipes, collectors as well as for high pressure steam pipes. It can be used even at high temperatures up to 600°C. The aim of this paper is the behaviour of the material during repeated heat treatment, which often occurs during the installation of the pipeline, and is caused by the repair of defects in the welded joint, incorrect installation of the pipeline and similar procedures.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine.



1. Uvod

Materijal X10CrMoVNb9-1 spada u grupu visokolegiranih čelika sa utvrđenim osobinama na povišenim temperaturama. Čelik je razvijen 1974 godine u OAK RIDGE NL u SAD sa oznakom P91/T91, a njegova primena u termoelektranama je počela početkom 90-tih godina prošlog veka. Ovaj materijal se najčešće koristi za cevi i cevne

priključke otporne na visoke pritiske i temperature. Čelik se odlikuje visokim svojstvima termičke čvrstoće, zbog čega se koristi u termoelektranama za cevi pregrejača, kolektora kao i za cevi parovoda visokog pritiska. Ima primenu i pri visokim temperaturama čak do 600°C. Hemijski sastav i mehaničke osobine [1] prikazani su u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Hemijski sastav X10CrMoVNb9-1 prema SRPS EN ISO 10216-2 [1]

Table 1. Chemical composition of the X10CrMoVNb9-1 according to SRPS EN ISO 10216-2 [1]

Zahtev SRPS EN ISO 10216-2	SADRŽAJ ELEMENATA (%)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0.08 do 0.12	0.30 do 0.60	0.20 do 0.50	max 0.020	max 0.010	8.0 do 9.5	0.85 do 1.05	≤0.40	≤0.04 0
	Cu	Nb	V	N	Fe				
	≤0.30	0.06 do 0.10	0.18 do 0.25	0.030 do 0.070	ostatak				

Tabela 2. Mehaničke osobine X10CrMoVNb9-1 prema SRPS EN ISO 10216-2 [1]

Table 2. Mechanical properties of the X10CrMoVNb9-1 according to SRPS EN ISO 10216-2 [1]

Zahtev SRPS EN ISO 10216-2	Temperatura	Napon tečenja Re _H /Rp _{0.2}	Zatezna čvrstoća Rm	Izduženje A	Energija loma KV
	(°C)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(J)
	20	min 450	630-830	min 19	27
	600	min 215	/	/	/

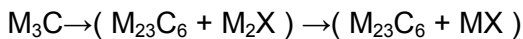
Uticaj legirajućih elemenata na osobine materijala je višestruk. Hrom kao glavni legirajući element povećava prokaljivost, korozionu otpornost i otpornost na oksidaciju usled dejstva pregrejane pare. Kako je Cr karbidotvorni element, prisutan je u sastavu karbida tipa M₂₃C₆, koji se izdvajaju iz metalne matrice tokom termičke obrade. Molibden povećava prokaljivost i ulazi u sastav čvrstog rastora i na taj način podiže čvrstoću materijala. V i Nb su veoma važni zbog toga što imaju visok afinitet prema C i N, i tokom termičke obrade se izdvajaju u obliku fino dispergovanih čestica tipa MX koje povećavaju otpornost na puzanje usled toga što predstavljaju prepreke za kretanje dislokacija. Azot preko čvrstog rastvora podiže čvrstoću materijala i bitna je komponenta za formiranje karbonitrida sa V i Nb koji povećavaju otpornost na puzanje. Kao austenitizator, N usporava nastanak δ-ferita tokom procesa termičke obrade. Kako Ni snižava Ac₁ temperaturu, a iznad sadržaja 0,6 % snižava i otpornost na puzanje,

potrebno je njegov sadržaj smanjiti na max 0,3 % [2].

Što se tiče termičke obrade, manje debljine materijala se isporučuju kao +NT (normalizacija i otpuštanje), dok se veće debljine materijala (debljine iznad 10 mm) isporučuju u stanju +QT (kaljenje i otpuštanje) [1]. Optimalna temperatura sa koje se radi normalizacija ili kaljenje je u opsegu od 1060°C do 1080°C. Na nižim temperaturama ne dolazi do potpunog rastvaranja karbida i karbonitrida i prelaska svih elemenata u γ-čvrsti rastvor, dok su više temperature nepoželjne zbog velikog rasta zrna i nastanka δ-ferita. Tokom hlađenja na vazduhu ili u ulju, sa pomenute temperature, dolazi do austenitno – martenzitne transformacije i formiranja presičenog čvrstog rastvora. Žarenjem u temperaturnom opsegu od 730°C do 780°C [3, 4] i kasnijim kontrolisanim hlađenjem, dolazi do otpuštanja mikrostrukture i izdvajanja precipitata unutar i po granicama zrna.



Mehanizam izdvajanja precipitata je šematski prikazan [2]:



Kako su u pitanju difuzioni procesi na koje utiču temperatura i vreme, prečnik izdvojenih čestica se računa prema sledećoj formuli:

$$d = \alpha(t \cdot D_0 \exp(-Q/RT))^{0.5}$$

α – koeficijent koji je u funkciji hemijskog sastava matrice

t – vreme (s)

D_0 – konstanta (m^2/s)

Q – energija aktivacije difuzije (J/mol)

R – univerzalna gasna konstanta (8,31 J/mol K)

T – temperatura (K)

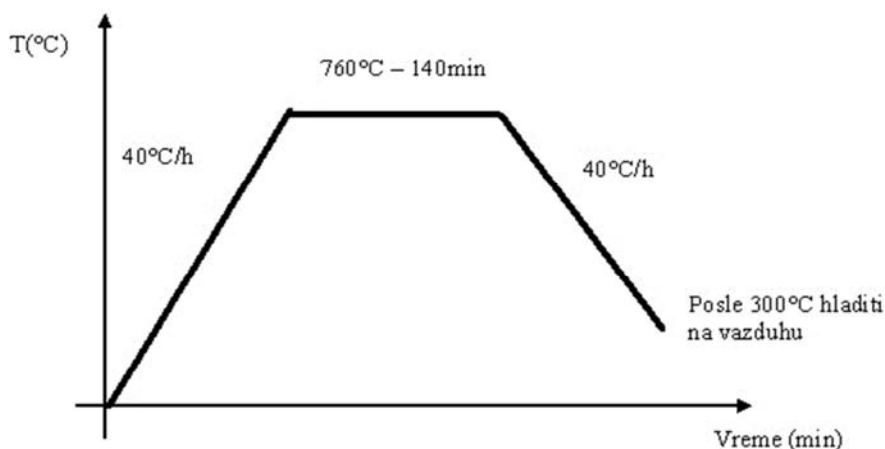
Čestice tipa $M_{23}C_6$ se izdvajaju po granicama primarnih austenitnih zrna, dok se čestice tipa MX fino disperguju unutar metalne matrice. Preporučeno vreme držanja na temperaturi žarenja je 2,5 min/mm [3, 4, 5]. Žarenje u temperaturnom intervalu između Ac_1 i Ac_3 može dovesti do pojave neotpuštenog martenzita u mikrostrukturi, a

produženo vreme držanja dovodi do koalescencije karbida i karbonitrida i smanjenja otpornosti na puzanje.

Mikrostruktura nakon pravilno izvedene termičke obrade je otpušteni martenzit sa fino izdvojenim česticama tipa $M_{23}C_6$ po granicama zrna i subzrna i česticama tipa MX koje su fino dispergovane u metalnoj matrici. Ova mikrostruktura obezbeđuje najbolji odnos između čvrstoće i žilavosti, kao i najveću otpornost na puzanje [2, 6, 7].

2. Eksperiment

Cilj ovog rada je ispitivanje ponašanja materijala prilikom ponovljene termičke obrade, koja se tokom montaže cevovoda često dešava, a uzrokovana je popravkom grešaka u zavarenom spoju, pogrešnom montažom cevovoda i sličnim postupcima. U tu svrhu, deo kolektora, $\varnothing 508 \times 55$ mm, je isečen na tri jednaka dela koji su podvrgnuti termičkom tretmanu, jedan, dva i tri puta sukcesivno. Režim termičke obrada uzoraka je prikazana na dijagramu (slika 1) i istovetan je sa termičkom obradom koja se sprovodi na terenu prilikom montaže cevovoda prema standardu [3, 4].



Slika 1. Dijagram termičkog tretmana X10CrMoVNb9-1 korišćen u eksperimentu

Figure 1. Heat treatment diagram of X10CrMoVNb9-1 used in the experiment



Slika 2. Peć ST-01 korišćena u eksperimentu

Figure 2. Furnace ST-01 used in the experiment



Termička obrada je izvedena u peći, proizvođača ST Elektrik, marka ST-01 sa 6-kanalnim pisačem, koja je prikazana na slici 2.

Nakon završetka termičke obrade, iz uzoraka su isečene epruvete i pripremljeni za mehaničko-metalografska ispitivanja. Epruvete su isečene transferzalno u odnosu na osu kolektora.

3. Rezultati i diskusija

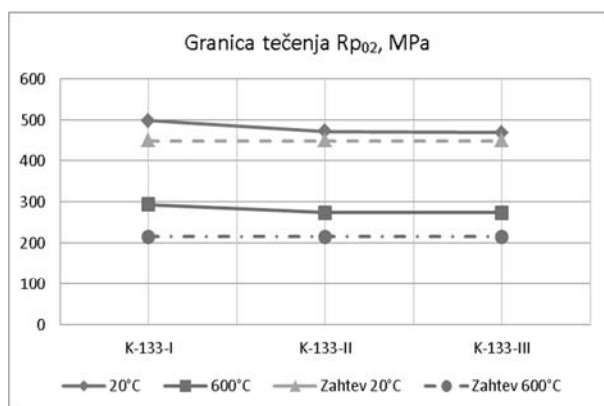
Kako bi se procenio uticaj ponovljene termičke obrade na materijal X10CrMoVNb9-1, epruvete koje su isečene iz uzoraka kolektora su ispitane na

zatezanje na sobnoj temperaturi i na 600°C [8, 9]. Ispitivanje na zatezanje je izvršeno na univerzalnoj mašini za ispitivanje, model FR-B 295/25M, opsega opterećenja 250 KN, klase 0,5. Za ispitivanje na sobnoj temperaturi, korišćen je ekstenziometar dugačkog hoda, tip MFX 500 – B, dok je za ispitivanje zatezanjem na 600°C korišćen ekstenziometar za ispitivanje na povišenim temperaturama, tip MFHT 5, i peć za ispitivanje na povišenim temperaturama, tip KD 200, opsega od 200°C do 900°C. Rezultati ispitivanja zatezanjem su prikazani u tabeli 3 i slikama 3, 4 i 5.

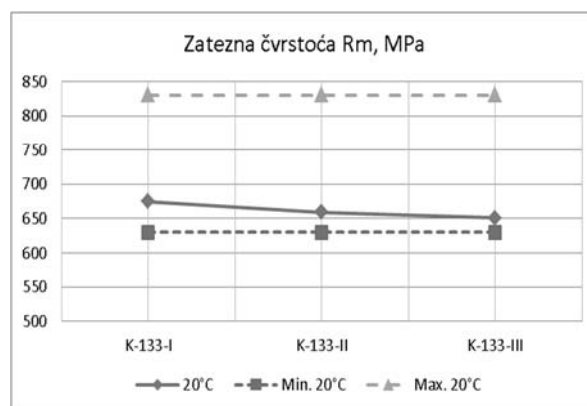
Tabela 3. Rezultati ispitivanja zatezanjem uzoraka kolektora koji su prošli različit broj termičkih tretmana

Table 3. Tensile test results of collector samples that underwent different number of thermal treatments

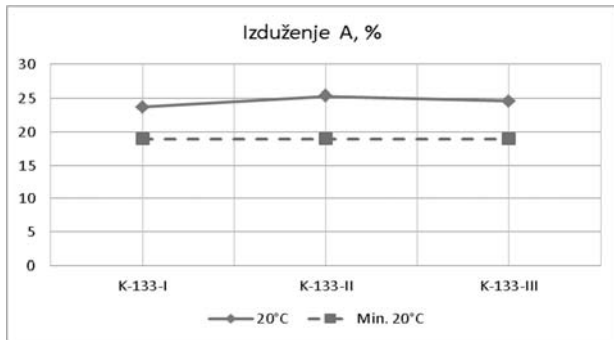
Ispitivanje zatezanjem					
Metoda: SRPS EN ISO 6892-1; 2020 [7]; SRPS EN ISO 6892-2: 2018, metoda B [8]					
Uređaj: univerzalna kidalica: Fore Test, FR-B 295/25M					
Uzorak br.	Mere epruvete (mm)	Temperatur a (°C)	Napon tečenja $Re_H/Rp_{0,2}$ (N/mm ²)	Zatezna čvrstoća Rm (N/mm ²)	Izduženje A (%)
K-133-I	Ø 9,99	20	496	675	24,44
	Ø 10,00	20	502	674	22,92
	Ø 7,99	600	284	/	/
	Ø 8,00	600	302	/	/
K-133-II	Ø 9,99	20	475	660	24,71
	Ø 10,00	20	468	658	25,88
	Ø 8,01	600	271	/	/
	Ø 7,99	600	277	/	/
K-133-III	Ø 10,01	20	471	653	24,68
	Ø 10,00	20	466	649	24,46
	Ø 8,01	600	274	/	/
	Ø 8,02	600	273	/	/
Zahtev SRPS EN ISO 10216-2		20	min 450	630-830	min 19
		600	min 215	/	/



Slika 3. Rezultati ispitivanja zatezanjem, $Rp_{0,2}$, MPa
Figure 3. Tensile test results, $Rp_{0,2}$, MPa

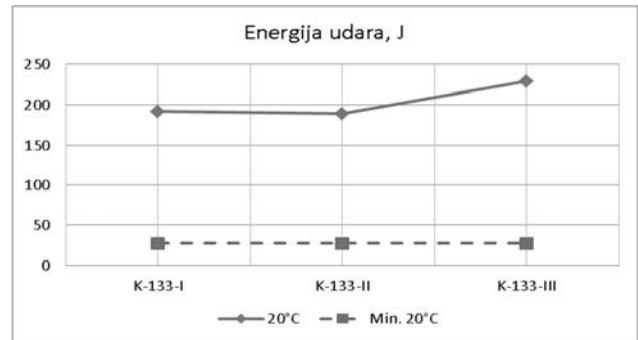


Slika 4. Rezultati ispitivanja zatezanjem, Rm, MPa
Figure 4. Tensile test results, Rm, MPa



Slika 5. Rezultati ispitivanja zatezanjem, izduženje A, %

Figure 5. Tensile test results, elongation A, %



Slika 6. Rezultati ispitivanja energije udara

Figure 6. Impact energy test results

Rezultati ispitivanja zatezanjem na sobnoj temperaturi su zadovoljili zahteve standarda SRPS EN ISO 10216-2 za sve ispitane epruvete. Primetno je da sa povećanjem broja termičkih tretmana blago opadaju vrednosti mehaničkih osobina ($R_{p0,2}$, R_m), dok se vrednosti prekidnog izduženja (A) povećavaju, što je karakteristika duktilnosti materijala. Trend pada granice tečenja na 600°C sa povećanjem broja termičkih tretmana

je takođe uočljiv, iako su sve izmerene vrednosti iznad kriterijuma propisanih standardom.

Ispitivanje energije udara je sprovedeno na Šarpi klatnu VEB PS 30 na standardnim epruvetama sa zarezom „2V” na sobnoj temperaturi u skladu sa standardom SRPS EN ISO 148-1: 2017 [10]. Rezultati ispitivanja energije udara su prikazani u tabeli 4 i na slici 5.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja energije udara uzoraka kolektora koji su prošli različit broj termičkih tretmana

Table 4. Impact energy test results of collector samples that have undergone different thermal treatments

Ispitivanje udarom				
Metoda: SRPS EN ISO 148 – 1: 2017 [10]			Uređaj: Šarpijevo klatno VEB PS 30	
Uzorak br.	Mere epruvete (mm)	Temperatura (°C)	Energija udara KV „2V” (J)	Srednja vrednost (J)
K-133-I	9,97 x 9,96 x 54,60	24	208	192
	10,09 x 10,01 x 54,97	24	187	
	10,05 x 10,04 x 54,87	24	181	
K-133-II	9,9 x 9,98 x 54,65	24	176	189
	9,98 x 9,99 x 55,08	24	180	
	9,98 x 9,98 x 55,2	24	212	
K-133-III	10,03 x 10,00 x 55,09	24	273	229
	10,09 x 10,00 x 55,25	24	209	
	10,03 x 10,02 x 55,17	24	207	
Zahtev SRPS EN ISO 10216-2		20	27	

Srednja vrednost energije udara tri epruvete je približno jednaka za uzorke koji su jedanput i dva puta prošli termički tretman, dok je za uzorak koji je tri puta termički tretiran vrednost energije udara nešto viša.

Karakteristika svih ispitanih epruveta je duktilan izgled loma, slike 7, 8 i 9. Sve izmerene vrednosti energije udara su značajno iznad minimalno propisane vrednosti za čelik X10CrMoVNb9-1 prema SRPS EN ISO 10216-2.



Slika 7. Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-I.

Slika 8. Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-II.

Slika 7. Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-I. (fali prevod)

Slika 8. Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-II. (fali prevod)



Slika 9. Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-III.

Slika 9: Izgled preloma epruveta iz uzorka kolektora koji je jedanput termički tretiran prema dijagramu termičke obrade, K-133-III. (fali prevod)

Tvrdoća je izmerena po poprečnom preseku uzoraka, na uređaju za merenje makro tvrdoće WILSON VH1150. Korišćena je metoda merenja

tvrdoće po Vikersu [11, 12], sa opterećenjem 98,1 N (HV10). Rezultati ispitivanja tvrdoće su prikazani u tabeli 5 i na slici 10.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka kolektora koji su prošli različit broj termičkih tretmana

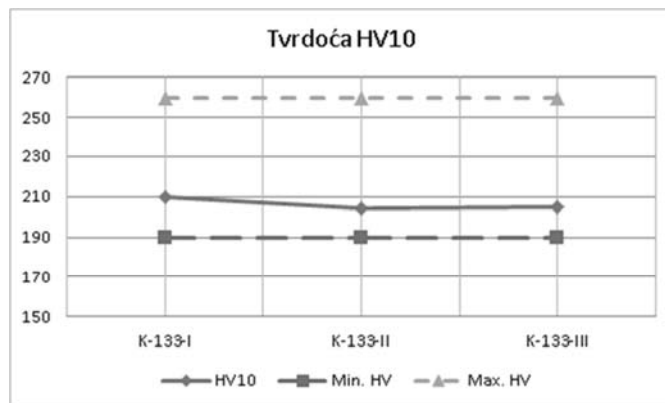
Table 5. Test results of the hardness of collector samples that underwent different number of thermal treatments

Ispitivanje tvrdoće											
Metoda: SRPS EN ISO 6507 – 1: 2018 [11]						Uređaj: WILSON VH1150					
Uzorak br.	Broj merenja										Srednja vrednost
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K-133-I	206	211	209	212	215	212	215	215	206	205	210 HV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K-133-II	206	205	212	209	211	209	206	198	195	197	204 HV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K-133-III	197	201	201	209	209	214	211	209	204	197	205 HV
Zahtev VGB – R 508L [12]	190 HV ÷ 260HV										



Izmerene vrednosti tvrdoća su najviše na uzorku koji je prošao jedan termički tretman, dok su na preostalim uzorcima, koji su termički tretirani, dva i tri puta, te vrednosti malo niže. Kako standardom SRPS EN ISO 10216-2 [1] nisu propisane vrednosti tvrdoća za materijal X10CrMoVNb9-1, kao

kriterijum prihvatljivosti su uzete vrednosti 190 HV ± 260HV prema VGB – R 508L [13]. Može se uočiti da su srednje vrednosti tvrdoća, za sva tri uzorka zadovoljila zadati kriterijum. Minimalno propisana vrednost tvrdoće od 190 HV, obezbeđuje da u strukturi nema nepoželjnog ferita.



Slika 10. Dijagram tvrdoće HV10 ispitivanih uzoraka.

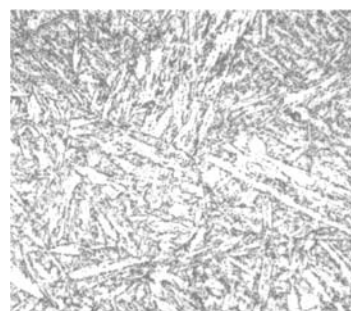
Figure 10. HV10 hardness diagram of the tested samples.

Metalografska mikrostrukturalna ispitivanja su izvršena na pripremcima koji su isečeni iz uzoraka kolektora koji su podvrgnuti različitom broju termičkih tretmana. Pre ispitivanja je urađena priprema na poluautomatskom uređaju za pripremu metalografskih uzoraka, tip ECOMET 30 Grinder&Polisher, single semi-automatic i pripremcima su nagriženi u reagensu za razvijanje mikrostrukture poboljšanih čelika, kojima pripada i čelik X10CrMoVNb9-1.

Kao reagens je korišćena pikrinsko-sona kiselina [14]. Ocena mikrostrukture je izvedena uz pomoć optičkog mikroskopa AXIO SCOPE A1 sa digitalnom kamerom, AXIO CAM lcc1 i softverom Axiovision lite. Za posmatranje mikrostrukture, korišćena su uvećanja 200x, 500x i 1000x. Karakteristične mikrostrukture prikazane su na slikama 11, 12 i 13.



a) OM, 200:1



b) OM, 500:1



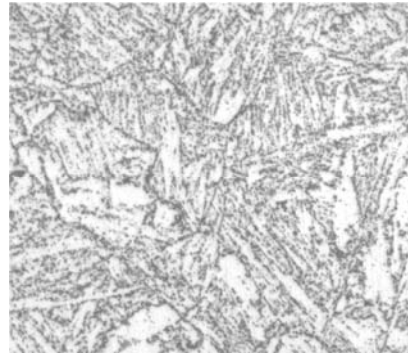
c) OM, 1000:1

Slika 11. Mikrostruktura uzorka K-133-I koji je jedanput termički tretiran

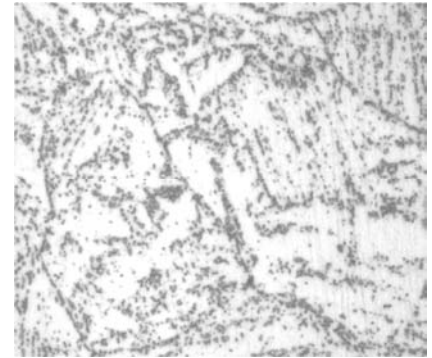
Figure 11. Microstructure of the K-133-I sample that was thermally treated once



a) OM, 200:1



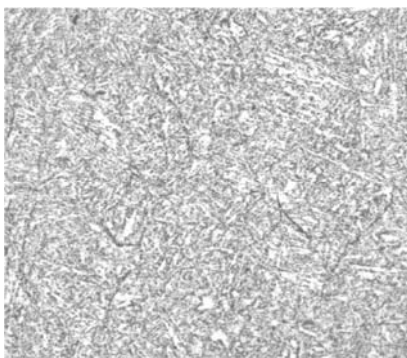
b) OM, 500:1



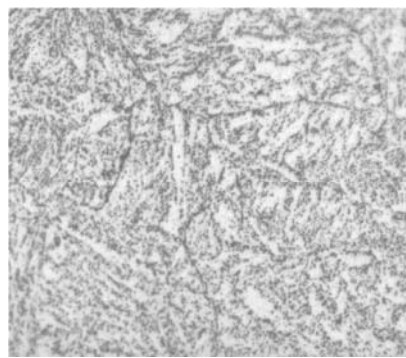
c) OM, 1000:1

Slika 12. Mikrostruktura uzorka K-133-II koji je dva puta termički tretiran

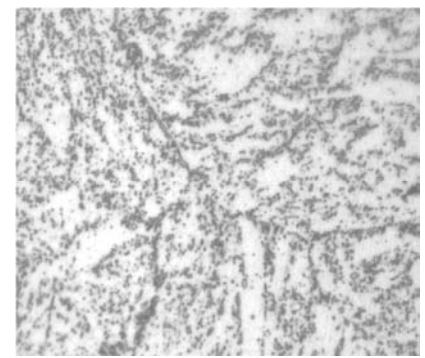
Figure 12. Microstructure of sample K-133-II that was thermally treated twice



a) OM, 200:1



b) OM, 500:1



c) OM, 1000:1

Slika 13. Mikrostruktura uzorka K-133-III koji je tri puta termički tretiran

Figure 13. Microstructure of the K-133-III sample that was thermally treated three times

Mikrostrukturu ispitanih uzoraka kolektora čini otpušteni martenzit sa precipitatima koji su izdvojeni unutar i po granicama primarnih austenitnih zrna i mala količina zaostalog austenita, što predstavlja poželjnu mikrostrukturu [6]. Bitno je napomenuti da se korišćenom optičkom mikroskopijom ne može utvrditi tačan sastav izdvojenih čestica, već je pretpostavka da se po granicama zrna nalaze karbidne čestice tipa $M_{23}C_6$, gde M predstavlja Cr, dok su unutar zrna fino dispergovane čestice tipa MX, gde M predstavljaju

elementi V i Nb, dok je X zamenjen sa C i N, što znači da su u pitanju precipitati karbonitrida. Za potpuniju analizu potrebno je uključiti i neku od tehnika elektronske mikroskopije (SEM, TEM). Poređenjem mikrostruktura uzoraka koji su prošli različit broj termičkih tretmana, zapaža se da je sa povećanjem broja termičkih tretmana došlo do manje koalescencije izdvojenih čestica, naročito onih koje su izdvojene po granicama zrna, tako da najdisperzniju mikrostrukturu ima uzorak koji je prošao jedan termički ciklus.

4. Zaključak

U radu su prikazani uporedni rezultati ispitivanja uzoraka kolektora od čelika X10CrMoVNb9-1. Ispitivan je uticaj ponovljene termičke obrade na osobine materijala, pri čemu su uzorci prošli različit broj termičkih ciklusa. Uočen je trend, da sa povećanjem broja termičkih ciklusa mehaničke osobine (granica tečenja, zatezna čvrstoća i tvrdoća) opadaju, dok vrednosti koje su pokazatelj duktilnosti materijala (energija udara i izduženje) rastu. Taj pad mehaničkih osobina nije veliki i može se objasniti činjenicom da sa povećanjem broja

4. Conclusion

The paper presents the comparative results of testing collector samples made of steel X10CrMoVNb9-1. The influence of repeated heat treatment on the properties of the material was investigated, with the samples undergoing different number of thermal cycles. A trend was observed, that with an increase in the number of thermal cycles, the mechanical properties (yield strength, tensile strength and hardness) decrease, while the values that are an indicator of the material's ductility (impact energy and elongation) increase. The drop



termičkih tretmana dolazi do male promene u veličini i disperziji karbidnih i karbonitridnih precipitata [12], što je metalografski delimično i potvrđeno, korišćenjem tehnike optičke mikroskopije. Uprkos tome što je konstatovan mali pad mehaničkih osobina, sve izmerene vrednosti su u granicama propisanim standardom SRPS EN ISO 10216-2 za čelik X10CrMoVNb9-1, što upućuje na zaključak da je na pomenutom materijalu moguće izvoditi termičku obradu veći broj puta, striktno se pridržavajući zadatih parametara.

U ovom radu je ispitan uticaj ponovljene termičke obrade na osobine osnovnog materijala. Kako se tokom montaže cevovoda javlja potreba za korišćenjem zavarivanja, interesantno bi bilo istražiti uticaj ponovljenog termičkog ciklusa i na delove zavarenog spoja koji nisu bili obuhvaćeni ovim radom (zona uticaja toplote i metal šava).

Literatura / References

[1] SRPS EN ISO 10216-2: (2020): Bešavne čelične cevi za opremu pod pritiskom – Tehnički zahtevi za isporuku - Deo 2: Cevi od nelegiranog i legiranog čelika sa osobinama utvrđenim za povišenu temperaturu - standard.

[2] Stefano Caminada, Bruno Lefebvre, (2011): Grade P91 materials - Tubes, Pipes, Fabrication&Processing of grade 91 material, Tiruchirappalli, India, 25-26 February 2011, pp 4-80 – međunarodna konferencija.

[3] SRPS EN 12952-5: (2022): Kotlovi sa vodogrejnim cevima i pomoćna oprema - Deo 5: Izrada i konstruisanje delova pod pritiskom za kotao - standard.

[4] SRPS EN 13480-4: (2017): Industrijski metalni cevovodi - Deo 4: Izrada i montaža - standard.

[5] GUIDELINES FOR HEAT TREATMENT, CHAPTER – 1 HEAT TREATMENT PROCEDURE – BOILER AND AUXILIARIES, 3.0 PROCEDURE, 3.2.8 Soaking time, smernice.

[6] A.Zielinski, J.Dobrzanski (2013): Characteristics of change in properties and structure of X10CrMoVNb9-1 steel due to long – term impact of temperature and stress, Archives of Materials Science and Engineering, , vol.60, pp 72 – 81.

in mechanical properties is not great and can be explained by the fact that with an increase in the number of thermal treatments, there is a small change in the size and dispersion of carbide and carbonitride precipitates [12], which was partially confirmed metallographically, using the optical microscopy technique. Despite the fact that a small drop in mechanical properties was noted, all measured values are within the limits prescribed by the SRPS EN ISO 10216-2 standard for steel X10CrMoVNb9-1, which leads to the conclusion that it is possible to perform heat treatment on the mentioned material a large number of times, strictly adhering to given parameters.

In this work, the influence of repeated heat treatment on the properties of the base material was examined. As the need to use welding during pipeline installation, it would be interesting to investigate the effect of repeated thermal cycles on parts of the welded joint that were not included in this work (heat-affected zone and weld metal).

[7] J. Pecha, D. Stano, O. Peleš, (2004), Welding of 9% Cr creep resisting steels for power Engineering equipment, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (4/2004), str. 159-168.

[8] SRPS EN ISO 6892-1: (2020): Metalni materijali – Ispitivanje zatezanjem - Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi, standard.

[9] SRPS EN ISO 6892-2: (2018): Metalni materijali – Ispitivanje zatezanjem – Deo 2: Metoda ispitivanja na povišenoj temperaturi, standard.

[10] SRPS EN ISO 148-1: (2017): Metalni materijali – Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom – Deo 1: Metoda ispitivanja, standard.

[11] SRPS EN ISO 6507 – 1: (2018): Metalni materijali-Ispitivanje tvrdoće po Vickersu-Deo 1:Metoda ispitivanja, standard.

[12] Jonas Ohlsson: Effects of different heat treatments on hardness of grade P91 steel, Karlstads Universitet, Faculty of Science and Technology, Degree project for Bachelor of Science in Mechanical Engineering, Spring semester 2014-05-25 - naučni rad.

[13] VGB – R 508L:(1999): Herstellung und Bauüberwachung von Rohrleitungsanlagen in Warmerkraftwerken - norma.

[14] Hermann Schumann (2004): Metallographie, pp. 547-553.