

# EKSPLOATACIONA UPOTREBLJIVOST MATERIJALA X10CrMoVNB91 SA NIŽIM OSOBINAMA OD ONIH ZAHTEVANIH STANDARDOM I ZNAČAJ TEHNIČKIH ZAHTEVA

Gordana M. Bakić<sup>1</sup>, Vesna Perunicic<sup>2</sup>, Ivan Gajić<sup>3</sup>, Savo Bezmarević<sup>4</sup>,  
Miloš B. Đukić<sup>1</sup>, Bratislav Rajičić<sup>5</sup>, dr Aleksandar Maslarević<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*

<sup>2</sup> *Tehnički centar inspekt, Obrenovac*

<sup>3</sup> *Via Ocel d.o.o.*

<sup>4</sup> *Javno preduzeće Elektroprivreda Srbije*

<sup>5</sup> *Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu*

**Apstrakt:** Nabavka visoko vrednih delova termoenergetskih postrojenja, kao što su komponente parovoda sveže pare koje su izložene najvišim radnim parametrima tokom rada postrojenja, podrazumeva definisanje vrlo preciznih zahteva za isporuku delova opreme. Kada postoje precizni zahtevi za gotov proizvod, isporučioци moraju strogo da kontrolišu parametre proizvodnje delova. Značaj svakog od zahteva često promiče tehničkim licima, i onima koji nabavljaju i onima koji isporučuju opremu, posebno ako zahtevi nisu sadržani u standardima, već proističu iz saznanja koja su domen usko specijalizovanih naučnih oblasti. U ovom radu je na primeru komponenti parovoda sveže pare izrađenih od čelika X10CrMoVNB91 koje su isporučene sa nehomogenim i u nekom delu sniženim osobinama prikazan značaj kako ulazne kontrole, tako i poštovanja svakog od tehničkih zahteva. Takođe, ponuđeno je i rešenje šta raditi sa takvom opremom i ocenjeno je koliko dugo bi ona mogla bezbedno da radi sa nižim osobinama.

**Ključne reči:** Termoenergetska postrojenja, čelik X10CrMoVNB91, eksploataciona upotrebljivost, tehnički zahtevi

## 1. UVOD

Pojam procena preostalog radnog veka (ili životnog veka kako je negde ustaljeno) koji asocira na pouzdan rad nekog mašinskog dela, poznavanje parametara rada, naponskog stanja, proračun utrošenog radnog veka za konkretne uslove rada, itd. [1]. Uobičajeno je da mašinski delovi imaju resurs za rad koji je veći od onog koji je deklarisan u projektu. Razlog za ovakvu rezervu u resursu leži u činjenici da su u realnim uslovima rada parametri rada najčešće niži od projektnih, kao i činjenica da se za proračun delova koriste minimalne vrednosti osobina materijala koje su date u standardu, a ne one koje stvarno poseduje materijal od koga je deo izrađen. Ukoliko se tačno definiše

mehanizam oštećenja i polazno stanje materijala moguće je da se proceni brzina degradacije materijala i vreme do loma mašinskog dela [2]. Iz navedenog je jasan značaj polaznog kvaliteta materijala koji se tokom nabavke opreme definiše preko tehničkih zahteva. Pored uobičajenih tehničkih zahteva neretko se propisuju i specifični zahtevi koji uglavnom obuhvataju veličine koje nisu definisane standardima kao što su: određena ograničenja u pogledu hemijskog sastava, vrstu mikrostrukture, opseg vrednosti površinskih tvrdoća, način izrade (npr. zahtev za višestruku redukciju tokom kovanja), itd. Specifičnim zahtevima pre svega se utiče na maksimizaciju resursa za rad opreme. Potvrda stanja polaznog materijala nekog mašinskog dela ostvaruje se adekvatnim obimom kontrole metodama ispitivanja sa i bez razaranja. Rezultati ispitivanja su deo sertifikata koji prati isporuku proizvoda.

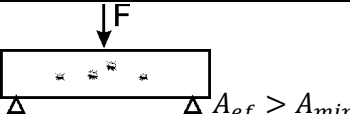
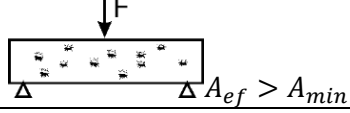
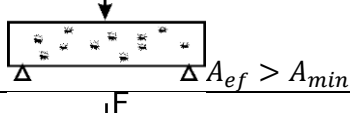
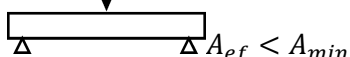
U slučajevima kada procena preostalog radnog veka (PPRV) ne može da se uradi za neki mašinski deo, kako zbog nepostojanja podataka o brzini procesa promene stanja materijala komponente u određenim uslovima rada [3], tako i zbog nepoznavanja dovoljno detaljno uslova rada, uobičajeno je da se koriste procedura za ocenu eksploatacione upotrebljivosti (OEU), a rezultati koji se dobijaju treba da odlikuju koliko je pouzdan rad nekog dela u dužem ili kraćem periodu. OEU definiše prihvatljivost grešaka /diskontinuiteta/oštećenja u funkciji sposobnosti za daljom pouzdanom eksploatacijom mašinskih delova [2]. Razvijen je niz postupaka vrlo često detaljno datih u okviru tehničkih normi ili određenih procedura, čiji je krajnji cilj ocena prihvatljivosti određenog tipa grešaka za dalju pouzdanu eksploataciju. Još jedan važan pojam je vezan za rad komponente – pouzdanost. Pouzdanost je verovatnoća da će neki deo da ispravno obavljati funkciju u predviđenom vremenu za zadate uslove rada i definiše rizik koji nosi rad komponente. Na primer, do smanjenja pouzdanosti neke cevi može da dođe i tokom izrade i tokom eksploatacije i pouzdanost nije vezana samo za kvalitet materijala već obuhvata niz drugih faktora. U tabeli 1 je ilustrativno prikazana razlika između pojma pouzdanosti i kvaliteta materijala na primeru jedne grede.

Greda koja je uobičajeno izrađena svakako sadrži određene greške u materijalu tako da je efektivna površina poprečnog preseka ( $A_{ef}$ ) komponente na koju se raspoređuju radna opterećenja veća od minimalno potrebne površine preseka koji je dobijen proračunom ( $A_{min}$ ) (tabela 1 slučaj 1). Sve dok je napon u preseku  $A_{ef}$  niži od dozvoljenog, bez obzira na količinu grešaka u materijalu, mi smatramo takvu gredu pouzdanom (tabela 1, slučaj 2). S druge strane, materijal može da bude izrađen specijalnim postupkom bez greške (samim tim vrlo skup), ali ako greda nije dobro dimenzionisana, ona nije pouzdana za rad (tabela 1, slučaj 4) i naravno moguće je da greške budu toliko značajne da je stvarana nosivost niža od min potrebne. Slučaj 3 takođe obuhvata i neadekvatno određenu veličinu  $A_{min}$  zbog nižih mehaničkih osobina materijala od onih zahtevanih standardom.

Razlika između proračunskih i stvarnih dimenzija mašinskog dela, zbog svih aproksimacija i konzervativizma klasičnih proračuna čvrstoće, otvara prostor za razmatranje stvarnog resursa

komponente - stvarne osobine materijala su najčešće više od minimalnih iz standarda koje se koriste za određivanje dozvoljenog napona, stvarni radni parametri su najčešće znatno niži od projektnih, itd. Takođe, treba imati na umu da je stepen sigurnosti značajno pooštrio proračun u konzervativnom pravcu, pa su komponente često predimenzionisane i do 500 % kao posledica ove konzervativnosti.

Tabela 1: Razlike između shvatanja pojmova kvaliteta materijala i pouzdanosti

Slučaj	Kvalitet materijala	Minimalno potrebna debljina zida	Pouzdanost upotrebljivost
1) prihvatljive greške i dovoljna nosivost poprečnog preseka	+	 $A_{ef} > A_{min}$	+
2) neprihvatljive greške/oštećenja i dovoljna nosivost poprečnog preseka	-	 $A_{ef} > A_{min}$	+
3) neprihvatljive greške/oštećenja i nedovoljna nosivost poprečnog preseka	-	 $A_{ef} > A_{min}$	-
4) Nema grešaka ali nije dovoljna nosivost poprečnog preseka	++	 $A_{ef} < A_{min}$	-

Razlika između procedura za PPRV i OEU se prvenstveno odnosi na stepen poznavanja stanja materijala i uslova rada neke komponente. Obim ispitivanja za PPRV neke komponente treba da omogući ocenu stepena istrošenosti materijala i eventualno da naznači trend, dok se kod OEU ocenjuje trenutno stanje komponente. Slobodno možemo da kažemo da PPRV sadrži u sebi OEU i nadograđuje OEU formiranjem funkcionalnog modela koji povezuje materijal komponente, radne uslove, naponsko stanje i vreme do loma. Neuobičajeno je da se sa procenom veka ili eksploatacione upotrebljivosti započene pre puštanja u rad neke komponente, međutim, to nije nemoguće, ako se ima na umu da se radni vek komponente delimično definiše u fazi projektovanja i fazi propisivanja tehničkih zahteva za izradu u procesu nabavke opreme. Radni vek delova termoenergetskih postrojenja koji rade u vrlo zahtevnim uslovima predstavlja važan faktor za projektante. Kada uslovi rada dominatno izazivaju pojavu puzanja, neminovan pratilac ovog mehanizma oštećenja u uobičajenim uslovima rada je i mikropstrukturalna degradacija i pad mehaničkih osobina koji dovode do loma komponente na kraju radnog veka [4]. Različiti modeli su razvijeni i korišćeni od strane istraživača za procenu preostalog radnog veka u uslovima delovanja puzanja [1, 5, 6] kao što su Larson Miller relacija, ili Orr Sherby Dorn, Manson Haferd, Manson Succop relacije. Svi navedeni modeli služe za dobijanje master krive za koja povezuje materijal, napon, temperaturu i vreme do loma. Larson Miller parametarska relacija je najčešće korišćen metod za procenu preostalog radnog veka u uslovima delovanja puzanja [5, 6].

U ovom radu je na primeru komponente parovoda sveže pare izrađene od čelika X10CrMoVNb91, koja je isporučena sa nehomogenim i sniženim osobinama prikazan značaj kako ulazne kontrole, tako i poštovanja svakog od tehničkih zahteva koji se propisuju za nabavku opreme. Takođe, ponuđeno je i rešenje šta raditi sa takvom opremom i ocenjeno je koliko dugo bi ona mogla bezbedno da radi sa nižim osobinama. Za ovakve ocene potrebna je vrlo detaljna analiza koja smanjuje rizik ugradnje opreme sa nižim osobinama na najnižu moguću meru.

## 2. OSNOVNE POSTAVKE PROBLEMA

Cev koja je predmet ovog rada je izrađena od čelika X10CrMoVNb 9 1 (oznaka prema EN), koji je martenzitne klase [4, 7]. Ovaj čelik pored osnovnih legirajućih elementa hroma (Cr) i molibdena (Mo) sadrži i manju količinu vanadijuma (V), niobijuma (Nb) i azota (N), a prvi put je proizveden početkom 80-ih godina u USA pod oznakom P/T/F91 (oznake iz ASTM: T91 za tankozide cevi, P91 za debelozide cevi i F91 za kovane komade). Čelik X10CrMoVNb 9 1 ima značajno višu čvrstoću na puzanje (vremenske karakteristike) i otpornost na oksidaciju od dobro poznatih niskougleničnih niskolegiranih toplotnopoostojanih čelika. Karakteristike čelika X10CrMoVNb 9 1 bitno zavise od mikrostrukturnog stanja, koje treba da bude otpušteni martenzit sa karbonitridima. Termička obrada se izvodi u dva koraka gde se posle austenitizacije i brzog hlađenja (stanje QT ili NT) izvodi visoko otpuštanje. Pažljiva kontrola procesa termičke obrade je suštinski presudna za dobijanje odgovarajuće mikrostrukture [3] koja je garant, kako mehaničkih osobina na sobnoj temperaturi, tako i osobina koje omogućuju dugotrajni rad u uslovima povišenih temperatura.

Zbog navedenih osobina čelika X10CrMoVNb 9 1, tokom naručivanja delova od ovog materijala, tehnički zahtevi za izradu podrazumevaju ograničenja u pogledu parametara termičke obrade i finalne mikrostrukture, od koje se zahteva da bude otpušteni martenzit, bez prisustva ostalih faza kao što je beinit ili sorbit, ferit, itd. Takođe kao pokazatelj kvaliteta izvođenja termičke obrade zahteva se da vrednost tvrdoće budu u opsegu 190-260HV (VGB508L), uz napomenu da se ovaj zahtev gotovo nikad ne ocenjuje bez uporede analize sa mikrostrukturom.

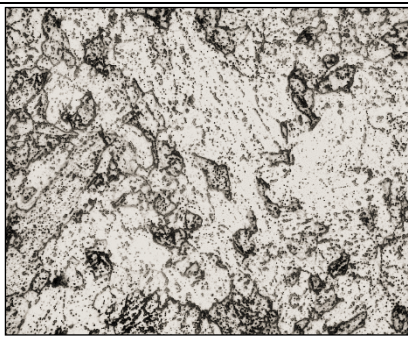
Tokom zamene linije sveže pare na termoenergetskom postrojenju, ispučen je priključak cevi dimenzija  $\varnothing 508 \times 55$  mm proračunat na minimalno 100.000h staj rada, izrađen kovanjem prema EN 10222-1 i 2: 2017 i PED 2014/68/EU i AD2000 W0 Merkblatt, kod koga je tokom ulazne kontrole ustanovljeno da u određenim područjima ima mikrostrukturu otpuštenog beinita, umesto kako je zahtevano tehničkim zahtevima otpuštenog martenzita sa do maksimalno 3%  $\delta$ ferita. Zbog toga je iz priključka isečen uzorak (oznaka Y1) sa ciljem da se izvrše dodatna ispitivanja metodama sa razaranjem i ustanove stvarne osobine. Ispitivanja su obuhvatila: ispitivanje zatezanjem na sobnoj temperaturi, ispitivanje zatezanjem na povišenoj temperaturi, ispitivanje udarne žilavosti, merenje

tvrdooe, dimenzionu kontrolu debljine zida i mikrostrukturno ispitivanje optiokom mikroskopijom. Rezultati ispitivanja hemijskog sastava dati u tabeli 2, a mehaniokih i mikrostrukturnih osobina u tabeli 3. Izmerena debljina zida prikljuokaka iznosi 53,9-54,4 mm, što je još uvek prihvatljivo sa spekta tolerancije izrade.

Tabela 2: Hemijski sastav uzorka i zahtevi standarda (elementi u %)

Uzorak	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N
Y1	0,124	0,353	0,384	0,0125	0,0053	8,772	0,975	0,185	0,065	0,051
Zahtev SRPS EN10222-2	0,08- 0,12	0,20- 0,50	0,30- 0,60	≤0,020	≤0,005	8,0- 9,5	0,85- 1,20	0,18- 0,25	0,06- 0,10	0,030- 0,070

Tabela 3: Mehaniokoe i mikrostrukturne osobine ispitanog uzorka

Osobine	Sobna temperatura						600°C
	R <sub>0,2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A, %	KV, J	HV	Mikrostruktura	R <sub>0,2</sub> , MPa
Y1	<b>308- 313</b>	<b>538- 545</b>	32,2- 34,2	214- 273	194- 201		218- 258
SRPS EN10222-2	min 450	630- 830	min 17	min 34	-	-	min 215
Dodatni tehniokki zahtevi	-	-	-	-	190- 250	Otpušteni martenzita sa max 3% δ ferita	-

Kao što se može videti iz tabele 2 hemijski sastav uzorka je u saglasnosti sa zahtevim standarda, izuzev u sluokaju sadržaja sumpora (S) koji je nešto vrlo malo povišen. S druge strane napon teoenja dobijen ispitivanjem zatezanjem na sobnoj temperaturi i zatezna ovrstooa su znatno niže od zahtevanih vrednosti kao posledica prisutne beinitne mikrostrukture sa malim udelom martenzita i karbidne i karbonitridne faze tvrdooe 194-201HV. Takođe, ispitivanje zatezanjem na temperaturi od 600°C dobijena je vrednost tek nešto viša od graniokne zahtevane standardom. S druge strane svojstva deformacije, procentualno izduženje i žilavost dobijena ispitivanjem na udar na sobnoj temperaturi su vrlo visoka, iako su u zahtevanim granicama standrada. Ovako visoka svojstva duktilnosti odgovaraju prisutnom velikom udelu beinita koji je znatno duktilniji od otpuštenog martenzita. U ovom sluokaju su svojstva deformacije indikativnija za stanje materijala cevi od tvrdooe koja je u zahtevanim granicama. Izmerene vrednosti tvrdooe iako zadovoljavajuoe imaju drugaokije poreklo od onog koji se zahteva. Mikrostruktura beinitno martenzitna sa karbidima ima znatno veoi udeo

ojačavanja od čestica u odnosu na zahtevanu mikrostrukturu otpuštenog martenzita kod koje je glavni doprinos čvrstoći (tj. tvrdoći kao njenoj meri na površini).

### 3. ANALIZA STANJA I PROCENA PREOSTALOG RADNOG VEKA PRIKLJUČKA

Za dalju analizu važni su i parametri za proračun parovoda sveže pare:  $t_{\text{projektno}}=550^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{projektno}}=206$  bar;  $t_{\text{radno}}=540^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{\text{radno}}=186,5$  bar. S obzirom da su osobine ispitanog uzorka Y1 znatno niže od standardom zahtevanih za materijal X10CrMoVNb9-1 prema SRPS EN 10228-2, jasno je da on ne zadovoljava kriterijum rada od minimalno 100.000h, kako je proračunat, pa je cilj analize je bio da se proveri da li cev u stanju u kojem je isporučena može bezbedno da radi i koliko dugo.

S obzirom da cev ima većinski beinitnu strukturu, sa malim udelom otpuštenog martenzita, ona može da se analizira kao da je izrađena od toplotno postojanog čelika niže klase, tabela 4. Generalno govoreći, proverava se da li cev zadovoljava slučaj 2 ili 3 iz tabele 1. Analizirana je grupa materijala iz kategorije toplotno postojanih čelika kojima bi stanje ispitanog uzorka odgovaralo. U tom pogledu za poređenje su korišćeni čelici koji su toplotno postojani, koji sadrže 9%Cr i 1%Mo i koji imaju beinitnu mikrostrukturu, uz napomenu da ove vrste čelika postoje samo u vidu valjanih proizvoda (SRPS EN 10216-2), tabela 4. Drugi uslov za izbor materijala za poređenje je da ispitanu uzorak Y1 ima više osobine od minimalno zahtevanih standardom za taj materijal.

Kao što se može videti iz tabele 4 najbolji kandidat za poređenje je materijal X11CrMo91+I jer mu je hemijski sastav odgovarajući, osnovna mikrostruktura je beinitna, a osobine uzorka priključka su više od minimalno zahtevanih standardom, čime je zadovoljen i drugi uslov, uz napomenu da su osobine uzorka znatno više od zahtevanih za ovaj materijal. Čelik X11CrMo91 (1.7386+I) ima vrednosti vremenske čvrstoće do  $600^{\circ}\text{C}$  što mu određuje temperaturu primene i što je zadovoljavajuće uzimajući u obzir projektnu temperaturu parovoda, uz napomenu da za napon tečenja na povišenoj temperaturi imam podatke do  $550^{\circ}\text{C}$ . Poređenja radi u tabeli 4 su navedene osobine istog materijala sa +NT termičkom obradom, koje su znatno više, međutim, osobine ispitanog uzorka Y1 ne zadovoljavaju minimalne zahteve iz standarda.

Tabela 4: Podaci potrebni za analizu priključka cevi

Osobine	Materijal			
	EN 10216-2 X11CrMo91 (1.7386+I)	EN 10216-2 X11CrMo91 (1.7386+NT)	EN 10222-2 X10CrMoVNb91	Uzorak Y1
R <sub>0,2</sub> min, MPa	210	390	450	<b>308</b>
R <sub>m</sub> , MPa	460-640	590-740	630-830	<b>538</b>
A min, %	20	18	17	>30
R <sub>0,2</sub> , MPa 550/600°C	550°C 120	550°C 235	600°C 215	600°C 218/265 (325) (216)

S obzirom da su vrednosti osobina dobijene ispitivanjem uzorka Y1 znatno više od minimalno zahtevanih za materijal X11CrMo91 (+I), a u cilju dobijanja što realnije slike o upotrebljivosti priključaka, izvršena je korekcija vremenske čvrstoće i dozvoljenog napona priključka cevi za podatak o vremenskoj čvrstoći za 10.000h, slika 1. Korekcija je izvršena primenom Larson Miller parametarske relacije. Ovaj parametar se dobija iz relacije (1) [5, 6]:

$$\text{LMP} (\sigma) = T(\log(t_l) + C) \quad (1)$$

gde je T – temperatura u K,  $t_l$  – vreme do loma u h, C vrednost koja se dobija u preseku izonaponske linije i ose  $\log(t_l)$  u dijagramu  $\log(t_l) - (1/T)$  i iznosi 20 za većinu čelika. Zavisnost LMP od napona je moguće odrediti upotrebom vrednosti za vremensku čvrstoću, koje su u ovom slučaju računane za vremenske čvrstoće od 10.000h za različite temperature, tabela 5.

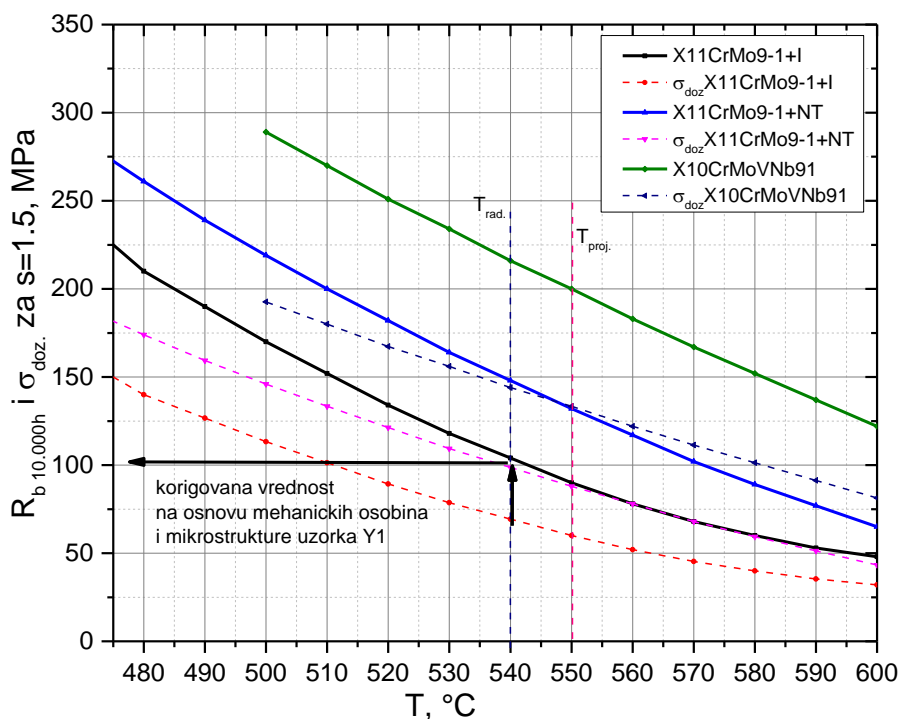
Tabela 5: LMP parametar za podatke iz standarda za vremensku čvrstoću od 10.000h

T, °C	X11CrMo9-1+I	X11CrMo9-1+NT	X10CrMoVNb91
500	17008.81	15802.38	14304.83
510	17492.93	16252.36	14689.08
520	18002.18	16699.04	15089.05
530	18477.34	17167.51	15461.44
540	18910.92	17603.85	15872.04
550	19360.34	18060.40	16252.36
560	19755.81	18507.76	16673.67
570	20088.87	18974.19	17087.84
580	20353.35	19392.98	17492.93
590	20578.43	19789.05	17915.48
600	20731.71	20188.54	18356.52

Na osnovu vremenskih čvrstoća za 10.000h i za stepen sigurnosti od 1,5 određen je dozvoljeni napon sa kojim se poredi napon u zidu cevi. Za ispitani uzorak Y1 je na osnovu mikrostrukturnog stanja izvršena korekcija vrednosti vremenske čvrstoće primenom podataka iz tabele 5 i dobijena je vrednost koja je nešto viša od zahtevane vrednosti za čelik X11CrMo91 (1.7386+I, EN 10216-2), slika 1, što više odgovara mehaničkim osobinama i mikrostrukturnom stanju ispitanog uzorka. Treba napomenuti da, iako je uočeno da je vrednost parametar C iz LMP relacije uglavnom konstanta koja zavisi od hemijskog sastava, veličine zrna i drugih ojačavajućih i parametara, to je samo prvo približenje, jer konstanta C ne može da zadovolji svaki pojedinačni slučaj zbog rasipanja osobina materijala. Istraživanja su pokazala da je važan uticajni činilac je i mikrostrukturno stanje, jer se sa promenom mikrostrukture menjaju i mehaničke osobine koje određuju konstantu C. Korelacijom mikrostrukture i vremenske čvrstoće koriguje se LMP parametar [1, 6] na osnovu čega je moguće izvršiti korekciju vremenske čvrstoće kao što je to prikazano na slici 1.

Rezultati proračuna minimalno potrebne debljine zida i resursa u debljini zida dobijeni za radne parametre, korigovanu vrednost vremenske čvrstoće i dozvoljenog napona su prikazani u tabeli 6. Dobijeni rezultati ukazuju na to da cevi priključaka nemaju pozitivan resurs za koeficijent sigurnosti

od 1,5 sa dodacima za geometriju koji su sastavni deo proračuna posuda pod pritiskom u koje spada cev iz koje je isečen uzoraka Y1. Za slučaj proračuna bez dodatka ili sa nešto nižim koeficijentom sigurnosti (1,45) postoji resurs za eksploataciju, iako je on relativno mali. U tabeli nisu prikazani rezultati proračuna za projektne parametre jer je za njih resurs u debljini zida negativan. S obzirom da se u daljem postupku montaže ove cevi zavaruju učinjena je pretpostavka da je kvalitet zavarivanja zadovoljavajući i da neće značajno da dodatno snizi mehaničke osobine u zoni uticaja toplote.



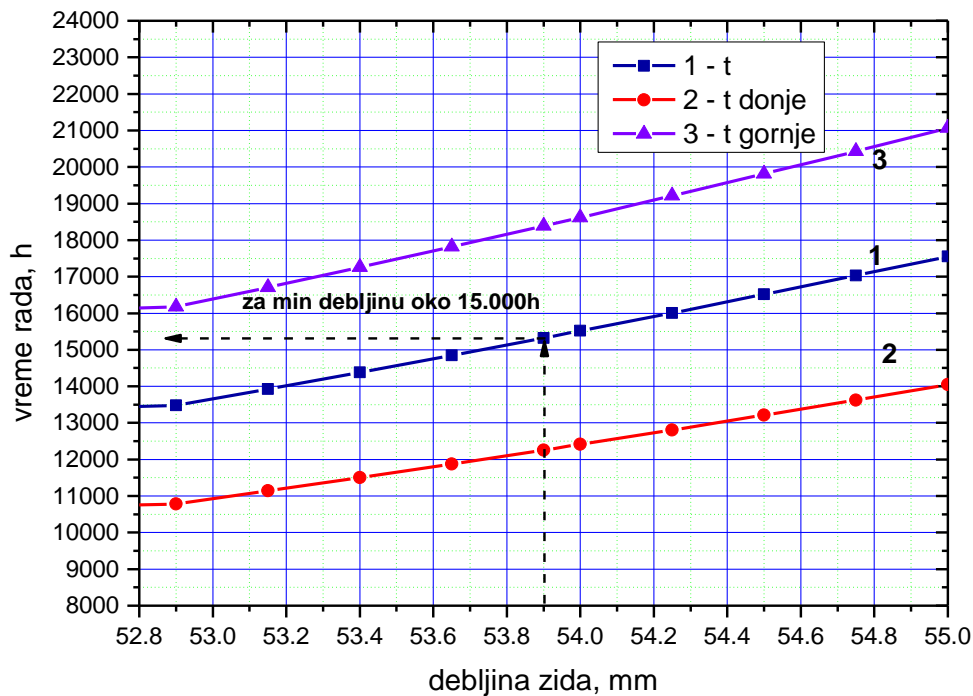
Slika 1: Korekcija dozvoljenog napona za vremensku čvrstoću od 10.000h priključka Y1 na osnovu njegovih mehaničkih osobina i mikrostrukture

Procena preostalog radnog veka u ovom slučaju je urađena da bi se utvrdilo da li je moguć rad ove cevi sa sniženim osobinama bar jedan kraći period. Po svojoj suštini ova dodatna analiza, s obzirom na rezultate proračuna date u tabeli 6, iako sadrži elemente proračuna preostalog radnog veka, spada u ukupnu ocenu koja je još u domenu OEU i treba da da odgovor na pitanje da li je moguće svrstati ovu cev u grupu 2) iz tabele 1, tj. da li deo izrađen od materijala sniženog kvaliteta ima radnu sposobnost da obavlja funkciju. Ovakve analize su vrlo korisne jer se njima omogućuje planiranje zamene u vremenu koje odgovara termoelektrani u periodu planiranih remonata.

Tabela 6: Rezultati proračuna i analiza za korigovanu vremensku čvrstoću i radne parametre

Proračun $s_{min}$ za radne parametre 540°C, 186.5 bar (18.65MPa) za korigovanu vrednost vremenske čvrstoće na osnovu osobina i mikrostrukture priključka Y1 i min izmerenu debljinu od 53,9mm	
s=1.5, 10.000h bez dodataka	$s_{min}$ = 50.76 mm (resurs= +8%, kvalitetan zavareni spoj)
s=1.5, 10.000h sa dodacima	$s_{min}$ = 56.40 mm (resurs= -2%, kvalitetan zavareni spoj)
s=1.45, 10.000h sa dodacima	$s_{min}$ = 54.70 mm (resurs= +1%, kvalitetan zavareni spoj)





Slika 2: Preostali radni vek za priključak  $\varnothing 508 \times 55 \text{ mm}$  za minimalno izmerenu debljinu

U cilju određivanja bezbednog vremena rada izvršena je procena preostalog radnog veka cevnog priključka za radne parametre linije sveže pare, slika 2. Modeliranjem zavisnosti debljine, preko koje se određuje napon u zidu cevi, i LMP parametra, a zatim LMP parametra i vremena do loma dobijena je zavisnost debljine zida i vremena do loma. Zbog potencijalnog dozvoljenog odstupanja osobina materijala određena je gornja i donja granica opoverenja. Za minimalno izmerenu debljinu od 53,9mm preostali radni iznosi oko 15.000h što praktično odgovara periodu eksploatacije od gotovo dve godine. Treba napomenuti da je ova procena izvedena pod pretpostavkom da su mehaničke osobine priključka najmanje jednake ili više od onih koji su dobijeni na uzorku Y1 tokom ispitivanja i da će radni parametri biti najviši kojima će biti izložen. Takođe, zavareni spojevi za ostatak parovoda treba da budu urađeni u potpunosti prema zahtevima struke. Drugim rečima, dobijeni rezultat ukazuje da je cev u klasi 2 prema podeli iz tabele 1 i da imu eksploatacionu upotrebljivost na kraći period.

#### 4. ZAKLJUČAK

Slučaj isporuke opreme koja je proračunata na radni vek od najmanje 100.000h, a koja nije proivedena u potpunosti prema tehničkim zahtevima služi kao dobar pokazatelj koje su sve posledice nepoštovanja makar i jednog od zahteva. U slučaju cevnog priključka izrađena od čelika X10CrMoVNb 9 1, dimenzija  $\varnothing 508 \times 55 \text{ mm}$ , koji u samo jednom delu nema odgovarajuću mikrostrukturu usled neodgovarajuće termičke obrade, ustanovljeno je ispitivanjima da ima niže mehaničke osobine od zahtevanih za deklarisan materijal, a samim tim ne ispunjava uslove da može

bezbedno da radi kako je to definisano projektom. Ostali koraci prikazani u ovom radu pokazuju kompleksnos postupka kojim se utvrđuje da li ovakav deo može da radi i on podrazumeva uzorkovanje, što je u najvećem broju slučajeva nemoguće da se ostvari. Ocnom eksploatacione upotrebljivosti na osnovu podataka dobijenih ispitivanjima i proračunom priključka cevi parovoda sveže pare dobijeno je da ova cev može da radi naredne dve godine.

Kod svake nabavke potrebno je da se strogo poštuju tehnički zahtevi, a između ostalih i zahtev da mikrostruktura bude otpušteni martenzit odgovarajuće tvrdoće po celoj zapremini što govori da je termička obrada adekvatna. Navedeni primer najbolje pokazuje da nepoštovanje ovog zahteva podrazumeva i niže osobine na lokalnom nivou koje svakako ne garantuju dugi radni vek delova.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije po ugovoru broj 451-03-9/2021-14/200105

## LITERATURA

- [1] Bakić M.G., Model procene preostalog radnog veka komponenti termoenergetskih postrojenja, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija 2011., 165
- [2] Bakić G., Đukić M., Šijački Žeravčić V., Osnovni mehanizmi oštećenja mašinskih konstrukcija, ISBN 978-86-6060-069-3, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2021,
- [3] Zielińska-Lipiec A, Koziel T, Czyrska-Filemonowicz A. Quantitative characterisation of the microstructure high chromium steel with boron for advanced steam power plants. *J Achiev Mater Manuf Eng* 43 (2010), pp. 200-204
- [4] Lj. Milović, T. Vuherer, I. Blačić, M. Vrhovac, M. Stanković, Microstructures and mechanical properties of creep resistant steel for application at elevated temperatures, *Materials & Design*, 46 (2013) pp 660-667
- [5] Bakić G., Sijacki Zeravcic V., Đukić M, Maksimović S., Plešinac D., Rajičić B., Thermal History and Stress State of a Fresh Steam-Pipeline Influencing Its Remaining Service Life, *THERMAL SCIENCE* 15 (2011), 3, pp. 691-704,
- [6] Ghatak A., Robi P.S, Investigation of Micro-structure and Creep Life Analysis of Centrifugally Cast Fe-Cr-Ni Alloy Reformer Tubes, *Manufact. Science and Technology* 3(2015)4, pp.155-159
- [7] Bakic, G.M., Djukic M.B., Rajicic B., Sijacki Zeravcic V., Maslarevic A., Radovic M., Maksimovic V., Milosevic N.: Characterization of Tube Repair Weld in Thermal Power Plant Made of a 12%Cr Tempered Martensite Ferritic Steel, in: Monograph Fracture at all Scales, Edited by G. Pluvinaige and Lj. Milovic, Springer, 2017., pp.151-170,

# SERVICEABILITY OF X10CRMOVNB91 MATERIAL WITH LOWER PROPERTIES THAN REQUIRED BY STANDARD AND THE IMPORTANCE OF TECHNICAL DELIVERY REQUIREMENTS

Prof. Gordana Bakić<sup>1</sup>, PhD, dipl.eng.mech., Ivan Gajić<sup>2</sup>, dipl.eng.mech., Savo Bezmarević<sup>3</sup>, dipl.eng.mech., Prof. Miloš Đukić<sup>1</sup>, PhD, dipl.eng.mech., Bratislav Rajičić<sup>4</sup>, dipl.eng.mech., Aleksandar Maslarević<sup>4</sup>, PhD, dipl.eng.mech.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade

<sup>2</sup> Technical Center Inspect, Obrenovac

<sup>3</sup> Via Ocel Ltd.

<sup>4</sup> Electric Power Industry of Serbia

<sup>5</sup>Innovation Center, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade

## Abstract

Procurement of highly valuable parts of thermal power plants, such as fresh steam pipeline components that are exposed to the highest operating parameters during the operation of the plant, implies defining very precise requirements for the delivery of equipment parts. When there are precise requirements for the finished product, the producers need to obtain strictly control of the production parameters. The importance of each of the requirements is often overlooked by technical persons, both those who procure and those who supply equipment, especially if the requirements are not contained in the standards, but derive from knowledge that is the domain of narrowly specialized scientific fields. In this paper, the importance of both input control and compliance with each of the technical requirements is shown on the example of fresh steam steam pipe components made of X10CrMoVNb91 steel that are delivered with inhomogeneous and in some parts reduced properties. Also, a solution was offered on what to do with such equipment and it was assessed how long it could work safely with lower properties.

**Keywords:** Thermal Power Plants, Steel X10CrMoVNb91, Service behavior, Technical delivery requirements