

Dr G. Gnirs
Doc. XI - 725/00

ZAVARIVANJE MODERNIH KOTLOVSKIH ČELIKA

1. TEHNIČKA PODLOGA

Čelici za rad na povišenim temperaturama su izuzetno značajni u konstrukciji energetskih postrojenja. Čelik odličnih eksploatacijskih osobina, legiran sa 2.25 % Cr i 1 % Mo korišćen je širom sveta, na energetskim postrojenjima velikog kapaciteta, više od 50 godina, i kao takav je standardizovan u glavnim nacionalnim pravilima.

Zahtevi za većom efikasnošću, i shodno tome povećanje radnih parametara (pritisak, temperatura) i veličina

postrojenja, uslovili su razvoj čelika veće čvrstoće. U Evropi su tokom ranih 60-tih godina razvijena dva čelika sa povećanom prekidnom čvrstoćom puzanja: X20 CrMoV 12-1 i EM12. Čelik X20 CrMoV 12-1 sadrži 12 % Cr i 1 % Mo, uz dodatak V. EM12 je čelik sa 9 % Cr, 2 % Mo i sa dodatkom V i Nb.

Sledeći logični korak je bio razvoj modifikovanog 9 % Cr čelika; ova klasa je uspešno prihvaćena širom sveta tokom kasnih osamdesetih. Do danas X20 CrMoV 12-1 i EM 12 čelici uveliko se zamenjuju sa T/P91.

Tabela 1. Čelici za visoke temperature primenjeni u Evropi, SAD i Japanu

GODINA	EVROPA	SAD	JAPAN
pre šezdesetih	10 CrMo 9-10 (2.25 % Cr, 1%Mo)	T/P22	STBA24-STPA24
tokom šezdesetih	14 MoV 6-3 (0.5 % Cr, 0.5 % Mo, 0.25 % V)	T/P22	STBA24-STPA24
sredinom šezdesetih	X20 CrMoV 12-1 (12 % Cr, 1 % Mo, 0.25 % V) EM 12 (9 % Cr, 2 % Mo, V, Nb)	T/P22	STBA24-STPA24
od sredine osamdesetih	X10 CrMoVNb 9-1 (9 % Cr, 1 % Mo, 0.25 % V, Nb)	T/P91	STBA24-STPA24

Tabela 2. Čelici primenjeni kasnih osamdesetih godina

GODINA	EVROPA	JAPAN
kasnih osamdesetih	E911 (T/P911)	NF616 (T/P92) HCM12A (T/P122)

Mogućnosti za povećanje parametara pare kod novih kotlova ograničene su ako pritisak i temperatura u membranskom ekranu kotla ne mogu istovremeno da rastu. Konvencionalni feritno-beinitni čelici, kao što su T12 (13 CrMo 44; 1 % Cr i 0.5 % Mo) i T22 (10 CrMo 9-10; 2.25 % Cr, 1 % Mo), nemaju dovoljnu prekidnu čvrstoću puzanja za upotrebu kod membranskih ekrana U.S.C.B. (ultra super kritičnog kotla). Nove kase T23 i T24, sa vrlo visokim osobinama puzanja na 550 °C i malom tvrdoćom u uslovima zavarivanja, mogući su kandidati za materijale delova ekrana kotla.

2. GRUPA ČELIKA OTPORNIH NA PUZANJE SA 12 % Cr

2.1. Primena 12 % Cr čelika otpornih na puzanje

Klasični 12 % Cr čelik, poznat kao X20 CrMoV 12-1, od sredine 60-tih korišćen je širom sveta za primenu u uslovima puzanja. Ovaj čelik je zavarivan odgovarajućim dodatnim materijalom, bilo po austenitnoj, bilo po martenzitnoj metodi. Austenitna metoda podrazumeva: zavarivanje na temperaturi predgrevanja / međuslojnoj oko M_s tačke, tj. oko približno 400 - 450 °C. Martenzitna metoda podrazumeva: zavarivanje na temperaturi predgrevanja / međuslojnoj ispod M_s , ali oko 200 °C. Korišćenjem austenitne metode metal šava i ZUT, koji se pri visokim temperaturama transformisao u austenit, zadržava austenit tokom celog procesa zavarivanja. Korišćenjem martenzitne metode metal šava i ZUT, koji se transformisao u austenit, delimično se transformiše u martenzit, koji se odmah otpušta sledećim slojevima. U svakom slučaju hlađenje treba da bude sprovedeno posle zavarivanja ispod M_f , u cilju očuvanja martenzitne strukture. Ova struktura se može hladiti do sobne temperature, a deblji delovi se smeju hladiti samo do 100 - 150 °C. Kako je martenzitna struktura krhija, zbog

visokog sadržaja ugljenika, ovaj martenzit se posle zavarivanja otpušta na približno 720 - 780 °C. U otvrdnutom martenzitu prsline usled naponske korozije se mogu javiti u značajnom obimu; zato se termička obrada posle zavarivanja izvodi odmah nakon hlađenja.

Kasniji razvoj se odnosi na smanjenje sadržaja ugljenika, dodavanjem W i Nb (HCM12) (tab. 3). Ovaj čelik je zavarivan sa odgovarajućim dodatnim materijalom (T-HCM12) čiji je sadržaj Ni (~3 % Ni) iz razloga plastičnosti. Ovaj čelik se može zavarivati sa primenom kod ekrana kotla sa niskom temperaturom predgrevanja od približno 50 °C, bez termičke obrade posle zavarivanja, a može se koristiti do 570 °C. Više radne temperature se ne preporučuju zbog niske A_{c1} temperature, uzrokovane visokim sadržajem Ni. Za više radne temperature pogodan je martenzitni dodatni materijal (T-HCM12A), koji zahteva više temperature predgrevanja (200 °C) i termičku obradu posle zavarivanja između 700 - 780 °C.

3. GRUPA ČELIKA OTPORNIH NA PUZANJE SA 9 % Cr

3.1. Primena 9 % Cr čelika otpornih na puzanje

3.1.1. Čelici sa 9 % Cr otporni na puzanje u novim energetskim kotlovima i cevima sistemima

Veća fleksibilnost i smanjenje troškova zapaža se kod energetskih postrojenja sa konvencionalnim parametrima pare, korišćenjem T/P91, NF616/P92, E911 umesto T/P22, EM12 i X20 CrMoV 12-1, u najvećem stepenu zbog smanjenja debljine zida, a zahvaljujući unapređenju osobina puzanja i otpornosti na oksidaciju čelika sa 9 % Cr.

U modernim energetske kotlovima na fosilna goriva klase T/P91, NF616/P92, E911 dozvoljavaju više radne parametre (pritisak, temperatura) i zbog toga veću efikasnost. Čelik T/P91 se može koristiti za unutrašnje delove kotla (super zagrejači, zagrejači) za temperature pare do 560 °C (maksimalne temperature metala oko 600 °C). Za spoljašnje delove kotla (cevi i delove bubnja) čelik P91 može da se primenjuje na temperaturama do oko 610 °C.

3.1.2. 9 % Cr čelici otporni na puzanje u rekonstrukciji-reparaturi

Čelik klase T/P11, T/P22 ili ekvivalentni materijali se vrlo često koriste za cevovode starih energetske postrojenja. Bolja čvrstoća puzanja do loma čelika P91 dozvoljava

značajno smanjenje debljine zida bubnjeva i cevne sistema u poređenju sa P22 (do 50 %, zavisno od proračunske temperature). Ovo smanjuje toplotni gradijent u zidu tokom operacija startovanja i zaustavljanja, i time se smanjuje sklonost ka zamornim prslinama koje su bile problem kod debelozidnih delova od P22. Značajan broj bubnjeva od P22 imaju prsline na spojevima tako da su širom sveta zamenjeni sa P91, T91, NF616/P92, E 911. Takođe se mogu smatrati alternativom nerđajućem austenitnom čeliku u supergrejačima i zagrejačima, kada se primenjuju uz odgovarajuće projektne parametre.

Tabela 3. Upoređenje hemijskog sastava čelika sa 9 % i 12 % Cr

Klasa	C	Cr	Mo	W	Nb	V
Grupa čelika sa 9 % Cr						
EM12	- / 0.17	8.5 / 9.5	1.7 / 2.3		0.3 / 0.55	0.2 / 0.4
P91 X10 CrMoVNb 91	0.08 / 0.12	8 / 9.5	0.85 / 1.05		0.06 / 0.1	0.18 / 0.25
E911 X11 CrMoWVNb 911	0.09 / 0.13	8.5 / 9.5	0.9 / 1.1	0.9 / 1.1	0.06 / 0.1	0.18 / 0.25
P92 NF616	0.08 / 0.13	7.95 / 9.6	0.3 / 0.65	1.5 / 2.1	0.035 / 0.095	0.17 / 0.23
Grupa čelika sa 12 % Cr						
X20 CrMoV 121	0.17 / 0.23	10 / 12.5	0.8 / 1.2			0.25 / 0.35
HCM12	- / 0.14	11 / 13	0.8 / 1.2	0.8 / 1.2	- / 0.2	0.2 / 0.3

3.1.3. 9 % Cr čelik otporan na puzanje u petrohemijskoj industriji

U postrojenjima za destilaciju i krekovanje, kao što su rafinerije, cevi i limovi od klase čelika T/P91 počeli su da zamenjuju klasu 22 i klasu 5 (lim i cev) zahvaljujući boljim mehaničkim osobinama na visokim temperaturama i otpornosti prema vodoniku pod visokim pritiskom. Šta više, T/P91 je pogodniji od T/P22 i T/P5 za primenu u pećima gde je atmosfera bogata sumporom.

3.2. Metalurgija 9 % Cr čelika otpornog na puzanje

Hemijski sastav 9 % Cr i 12 % Cr čelika prikazan je u tabeli 3. Čelik EM12 je u osnovi 9 % CrMo čelik sa 2 % Mo i dodatkom Nb + V. Čelik P91 u principu ima isti osnovni sastav sa sadržajem Mo 1 %. Čelik E911 u odnosu na analizu P91 ima dodatak 1 % W. P92 ima 2 % W, uz smanjeni sadržaj Mo na 0.5 %.

Razvoj ovih čelika sa 9 % i 12 % Cr prikazan je na slici 1 [2]. Njihova čvrstoća puzanja data je na slici 2.

3.2.2. Pojava transformacije u 9 % Cr čeliku otpornom na puzanje

Zavisno od hemijskog sastava, A_{c1} temperatura za klasu P91 je 785 °C, i niža je nego kod većine drugih, kod kojih je između 800 i 830 °C. Za klasu P92; NF616, A_{c1} temperatura osnovnog materijala je 825 °C, dok za metal šava varira između 765 - 770 °C [3]. M_s (početak martenzitne transformacije) temperatura za klasu P91 je viša, oko 400 °C. M_f (kraj martenzitne transformacije) temperatura leži iznad 100 °C, zavisno od veličine prethodnog austenitnog zrna [1].

A_{c1} temperatura uslovljava maksimalno dozvoljenu temperaturu termičke obrade posle zavarivanja, M_f temperatura uslovljava hlađenje pre termičke obrade posle

zavarivanja, a M_s utiče na temperaturu predgrevanja / međuslojnu temperaturu.

3.2.3. Osobine posle starenja 9 % Cr čelika otpornog na puzanje

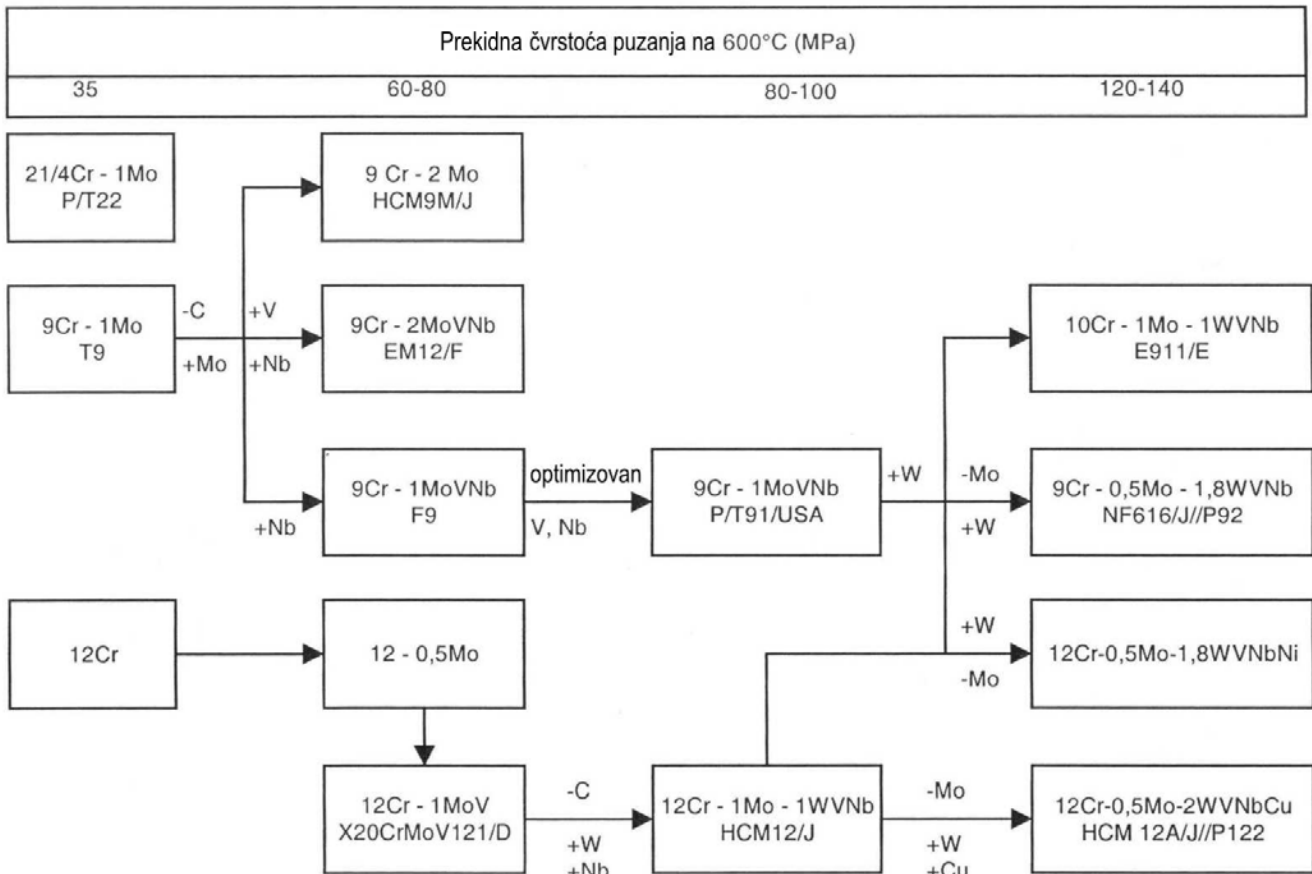
Rezultati ispitivanja epruveta od P91 koje su podvrgnute starenju na temperaturi između 550 i 650 °C do 30000 časova dati su na slici 3 [1].

3.2.4. Zavarivanje 9% Cr čelika otpornog na puzanje

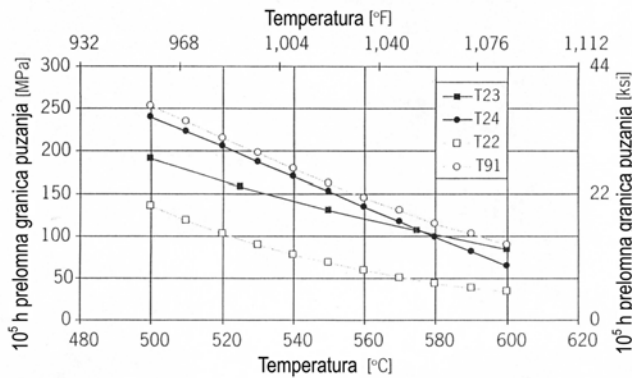
3.2.4.1. Jednorodni spojevi

Prvi program istraživanja zavarivosti modifikovanog 9 Cr – 1 Mo (T/P91) započeo je ORNL 1978., a zatim je na toj temi radilo mnogo radnih grupa u SAD, Evropi i Japanu. U isto vreme, T/P91 je uspešno zavarivan svim uobičajenim postupcima zavarivanja, npr. TIG, E i EPP, obuhvatajući širok opseg debljina zida.

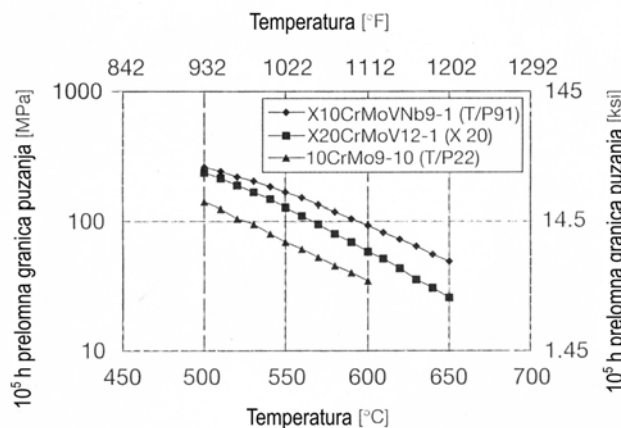
Međutim, bilo je potrebno razviti odgovarajuće dodatne materijale. Pored zahteva čvrstoće na sobnoj temperaturi (R_e/R_m) i prirodno, zahtevane čvrstoće na radnim temperaturama (granica puzanja), metal šava treba da zadovolji i zahteve žilavosti. Odmah nakon početka razvojnog rada, postalo je jasno da nije moguće zadovoljiti minimalne zahteve udarne čvrstoće korišćenjem istog opsega sastava osnovnog materijala. Sadržaje azota, nikla, mangana i niobijuma, potrebno je optimizovati. Stvaranjem karbonitrida azot ima značajan uticaj na čvrstoću puzanja do loma. Takođe, povećava napon tečenja i zateznu čvrstoću, ali smanjuje plastičnost i žilavost. Mangan i nikal imaju manji uticaj na osobine čvrstoće. Međutim, ustanovljeno je da u specifikacijama za osnovni materijal dodatak Ni i Mn preko gornjih granica može značajno da poveća žilavost. Ograničenja su data preko njihovog uticaja na A_{c1} temperaturu (sl. 4) [1].



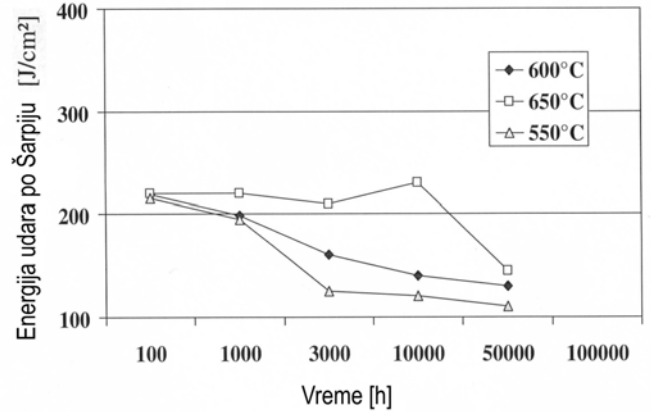
Slika 1. Razvoj grupe čelika sa 9 % i 12 % Cr



Slika 2a. Prekidne čvrstoće puzanja posle 100000 časova rada unapređenih čelika



Slika 2b. Poređenje prekidne čvrstoće puzanja posle 100000 časova rada



Slika 3. Osnovni materijal T/P91 posle starenja

Zbir sadržaja Ni i Mn treba da bude ograničen na 1.5 %, uz toleranciju sadržaja N oko 0.04 %. Niobijum može da ima negativan uticaj na žilavost. Međutim, zbog njegovog velikog uticaja na granicu puzanja, sadržaj Nb može da bude redukovano na 0.04 %, što je donja granica koja je specificirana za osnovni materijal. Ali nisu svi razvoji dodatnih materijala uzimali u obzir ove međusobne odnose. Dodatni materijali za T/P91, odnosno, njihovi tipični sastavi dati su u tabeli 4.

Dodatni materijali za klasu E911 su u osnovi slični. Pri dugotrajnoj primeni na visokim temperaturama metal šava nije odlučujući faktor za lom usled puzanja, tako da se dodatni materijal sa nižim osobinama, između kritičnih ZUT, može koristiti u specijalnim slučajevima delimično opterećenih spojeva, npr. poprečnih spojeva kod odgovarajuće projektovanih cevovoda.

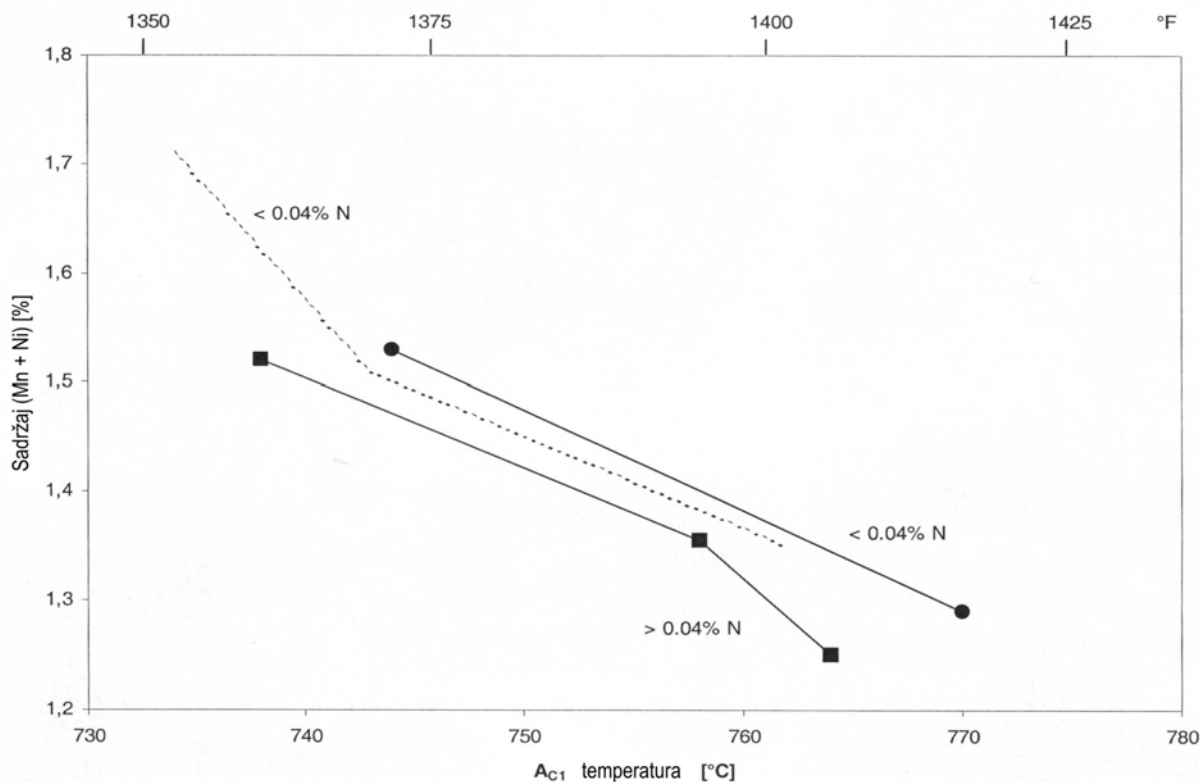
Slika 4. Uticaj N, Ni i Mn na A_{c1} temperaturu

Tabela 4. Tipični hemijski sastav dodatnih materijala tipa T/P91

Postupak	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cb/Nb	V	N
Žica za TIG	0.10	0.20	0.50	9.0	1.0	0.8	0.05	0.20	0.04
Obložena elektroda za E	0.09	0.20	0.65	9.0	1.10	0.8	0.05	0.20	0.04
EPP: Žica	0.11	0.30	0.50	9.0	1.0	0.8	0.06	0.20	0.04
Metal šava	0.11	0.30	0.50	8.5	0.95	0.75	0.05	0.20	0.04

Tehnologija zavarivanja T/P91, E911, NF616, P92, tipična je za martenzitne 9 - 12 % Cr čelike. To je zato što se tehnologija zavarivanja, za npr. X20 CrMo 12 1, može direktno transformisati i za tipove sa 9 % Cr. U suštini, zavarivost 9 % Cr tipova čelika je ponekad bolja zbog nižeg sadržaja ugljenika kojim se smanjuje otvrdnjavanje, a time se smanjuje i osetljivost ka hladnim prslinama i prslinama usled naponske korozije. U cilju postizanja velike vrednosti žilavosti u metalu šava, preporučuje se korišćenje tehnike više zavara u jednom sloju. Ne treba očekivati probleme žilavosti u ZUT posle termičke obrade nakon zavarivanja. Kritična oblast je metal šava. Na slici 3. prikazan je tipični ciklus zagrevanja tokom i posle zavarivanja 12 % Cr i 9 % Cr čelika. Kod 9 % Cr čelika predgrevanje i zavarivanje je na temperaturama oko 250 °C. Posle zavarivanja esencijalno je hlađenje do temperature ispod 100 °C, u cilju postizanja potpune transformacije austenita u martenzit. Posle toga je normalno da se sprovodi termička obrada posle zavarivanja, na temperaturi između 750 i 760 °C. Zato što je A_{c1} tačka za klasu P92 niža, temperatura termičke obrade posle zavarivanja za klasu P92 treba da je niža za približno 10 °C. Zavareni elementi sa malim unutrašnjim naponima, poput sučeonih spojeva cevi, mogu se zavarivati ispod 200 °C, zavisno od debljine zida. Do debljine zida od 80 mm mogu se hladiti do sobne temperature. Nasuprot tome, teži debelozidni otkovci ili odlivci mogu biti zavarivani ispod 200 °C, a hlađenje posle zavarivanja u cilju sprečavanja nastanka

prslina treba da je ograničeno na minimalnu temperaturu od 80 °C. Temperature pri zavarivanju spojeva tipova čelika sličnih 12/9 %, prikazani su na slici 5.

3.2.4.2. Raznorodni spojevi 9 % Cr čelika otpornog na puzanje

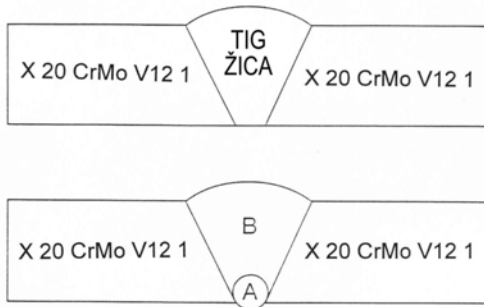
Raznorodni spojevi između T/P91, P22, E911 i niskolegiranih feritnih čelika, npr. T/P22, kao i austenitnih čelika, mogu se izvesti bez problema. Ponašanje je uporedivo sa bilo kojim drugim vatrootpornim feritnim čelicima sa sadržajem Cr 9 - 12 %, kao što su T/99, EM12 ili X 20 CrMo 12 1.

Raznorodni spojevi sa niskolegiranim feritnim Cr čelikom

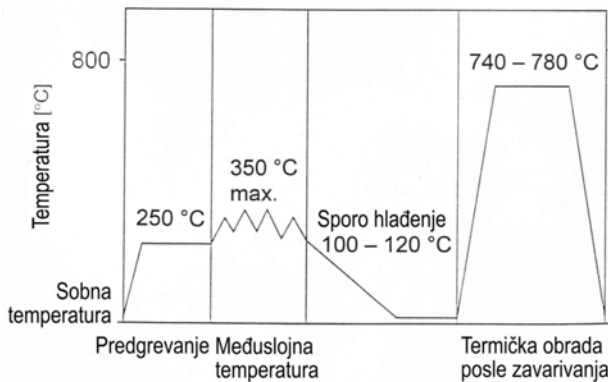
Za raznorodne spojeve između 9/12 % Cr čelika i nisko legiranog feritnog čelika mogu se koristiti dodatni materijali i sa niskim i sa visokim sadržajem Cr. Međutim, postoji fenomen koji se mora uzeti u obzir pri svakom tipu zavarenih spojeva. Zavisno od razlika u sadržaju Cr između materijala, tokom termičke obrade posle zavarivanja ugljenik difunduje iz materijala sa nižim sadržajem Cr u okolinu čelika sa višim sadržajem Cr ili u metal šava. Kao rezultat, zona osiromašena ugljenikom se priključuje materijalu sa malim sadržajem hroma, a zona obogaćena ugljenikom (tzv. "ugljenična traka") materijalu sa visokim sadržajem hroma. Širenje ovih zona zavisi od vremena i temperature žarenja. Ovaj fenomen nije moguće sprečiti, izuzev korišćenjem dodatnog materijala na bazi nikla.

Ove mikrostrukturne promene imaju uticaj na žilavost na sobnoj temperaturi. To je razlog što su u Nemačkoj dodatni materijali sa nižim sadržajem Cr (2.25 Cr 1 Mo) prihvatljivi samo pod određenim uslovima. Međutim, prekidna čvrstoća puzanja takvih raznorodnih spojeva obično nije ugrožena. Finozrna međukritična ZUT niskolegiranog feritnog čelika još

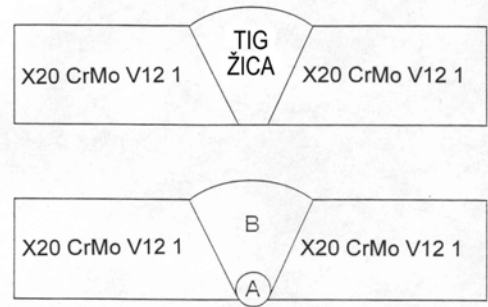
zadržava "loše" zone pri dugotrajnoj eksploataciji. Ponašanje pri puzanju takvog raznorodnog spoja je uporedivo sa normalnim spojem T/P22. Temperatura pri zavarivanju raznorodnih spojeva od čelika legiranih sa Cr data je na slici 6.



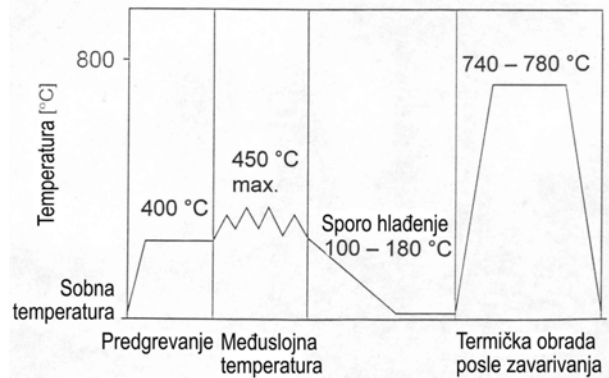
A - Koreni zavar - TIG sa dodatnim materijalom | Dodatni materija
B - Zavar ispune - E ili EPP | tipa X20 CrMoV 12 1



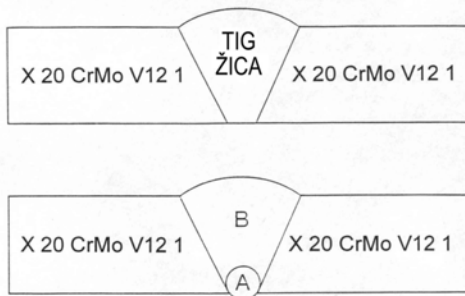
Slika 5a. Zavarivanje čelika X20 CrMoV 12 1 sa X20 CrMoV 12 1 martenzitnom metodom (debeli)



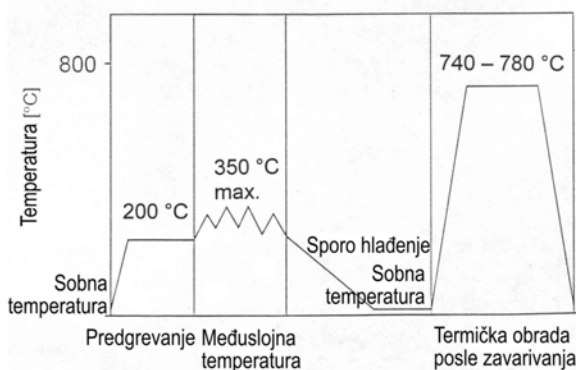
A - Koreni zavar - TIG sa dodatnim materijalom | Dodatni materija
B - Zavar ispune - E ili EPP | tipa X20 CrMoV 12 1



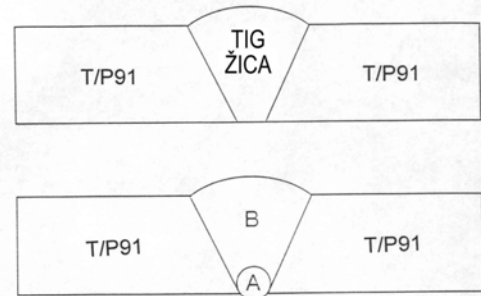
Slika 5c. Zavarivanje čelika X20 CrMoV 12 1 sa X20 CrMoV 12 1 austenitnom metodom



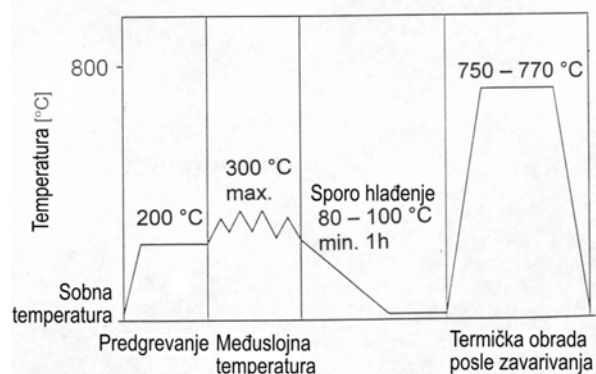
A - Koreni zavar - TIG sa dodatnim materijalom | Dodatni materija
B - Zavar ispune - E ili EPP | tipa X20 CrMoV 12 1



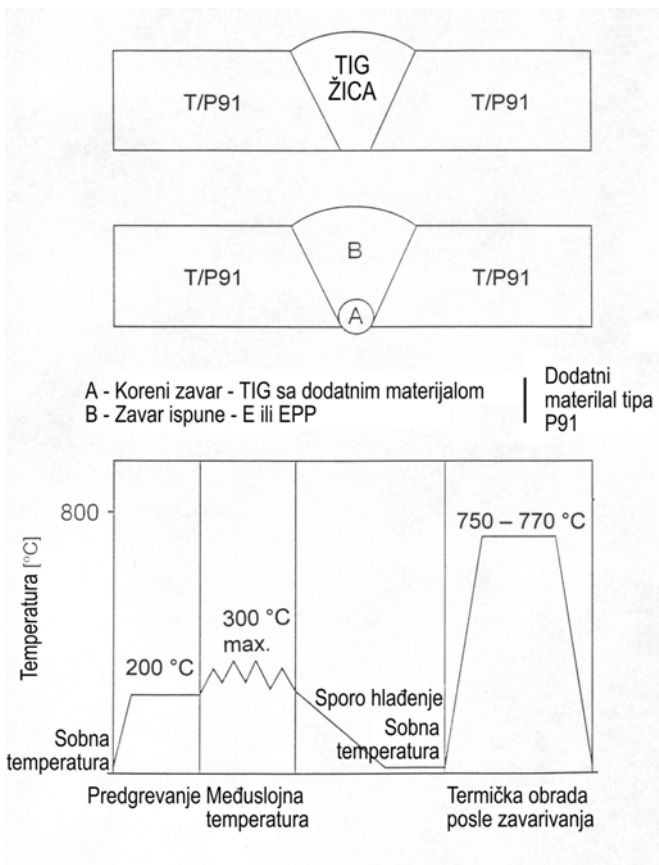
Slika 5b. Zavarivanje čelika X20 CrMoV 12 1 sa X20 CrMoV 12 1 martenzitnom metodom (tanki)



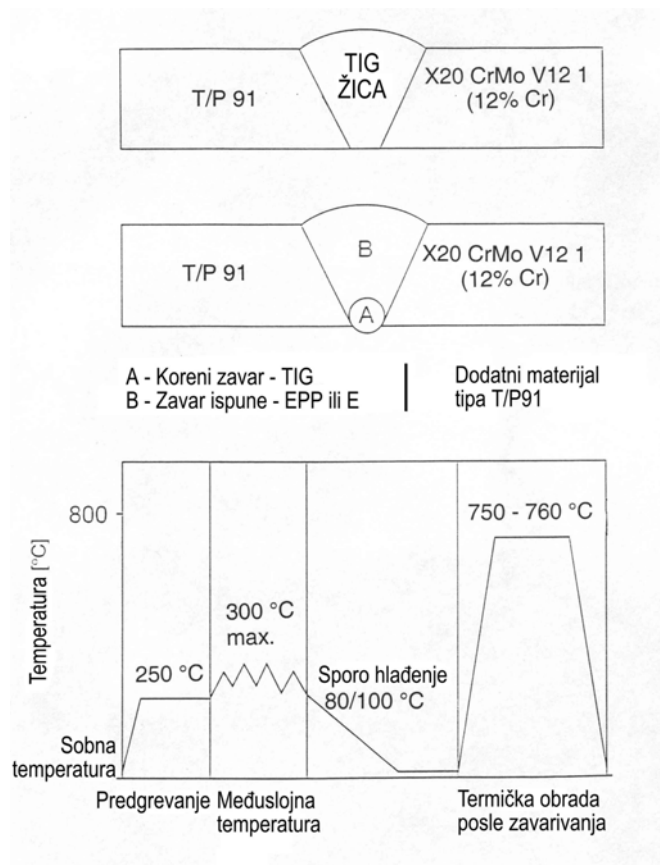
A - Koreni zavar - TIG sa dodatnim materijalom | Dodatni materijal tipa P91
B - Zavar ispune - E ili EPP



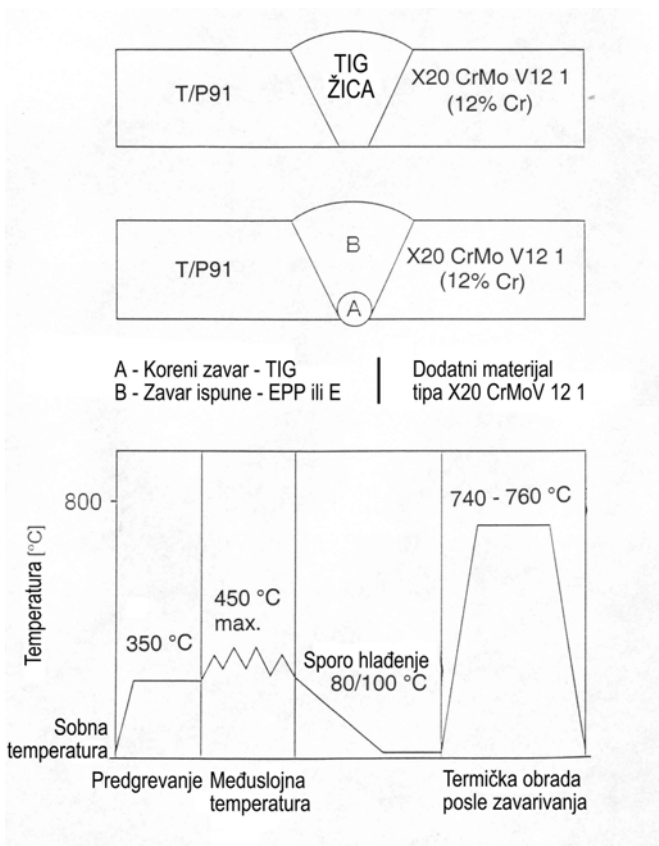
Slika 5d. Zavarivanje T/P91 sa T/P91 (debeli)



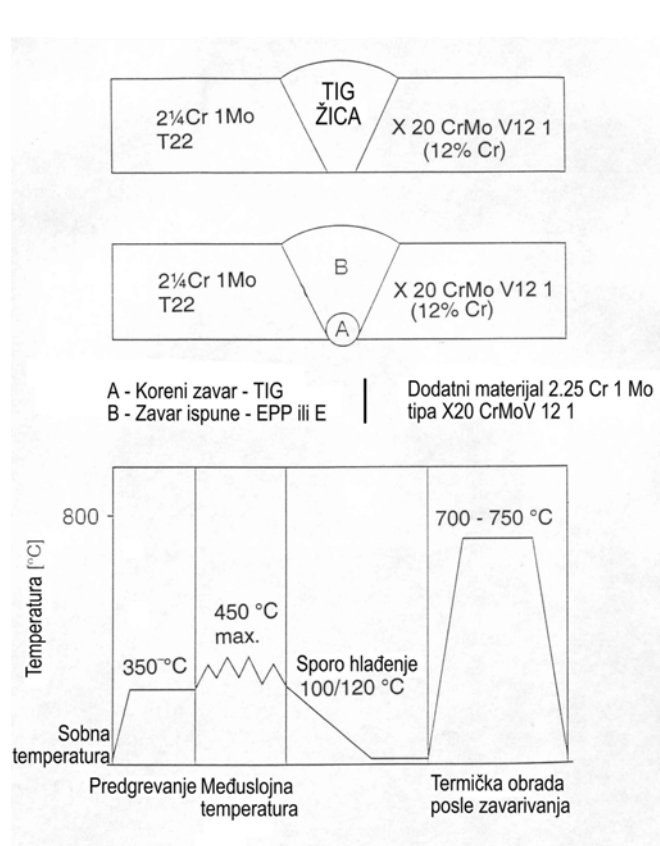
Slika 5e. Zavarivanje T/P91 sa T/P91 (tanki)



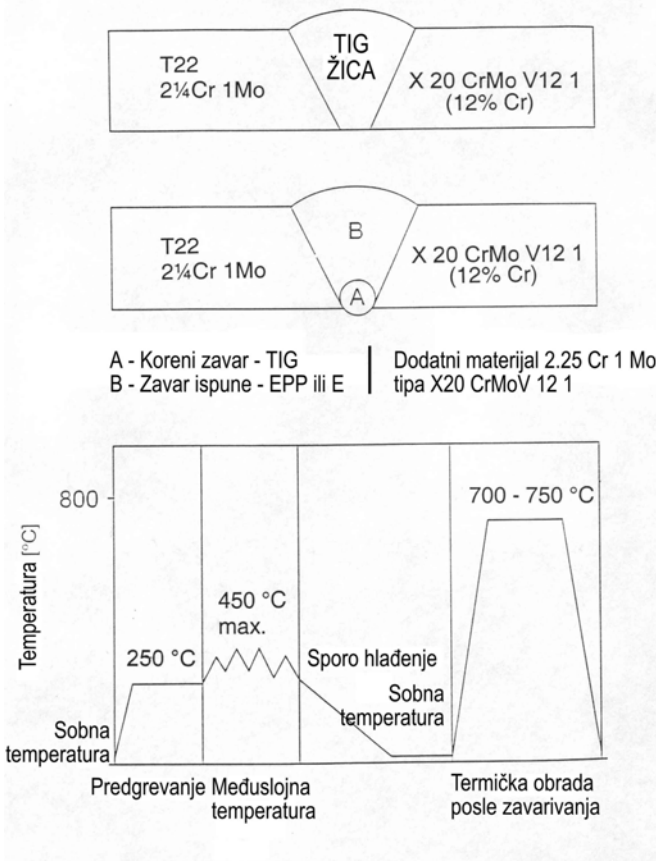
Slika 5g. Zavarivanje T/P91 sa 12 % Cr materijalom uz dodatni materijal T/P91



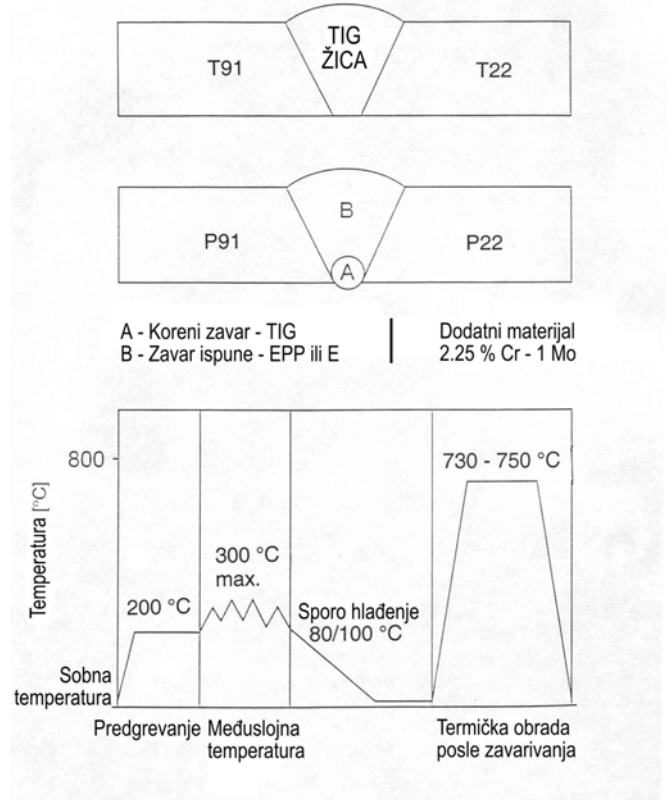
Slika 5f. Zavarivanje T/P91 sa 12 % Cr materijalom uz dodatni materijal X20



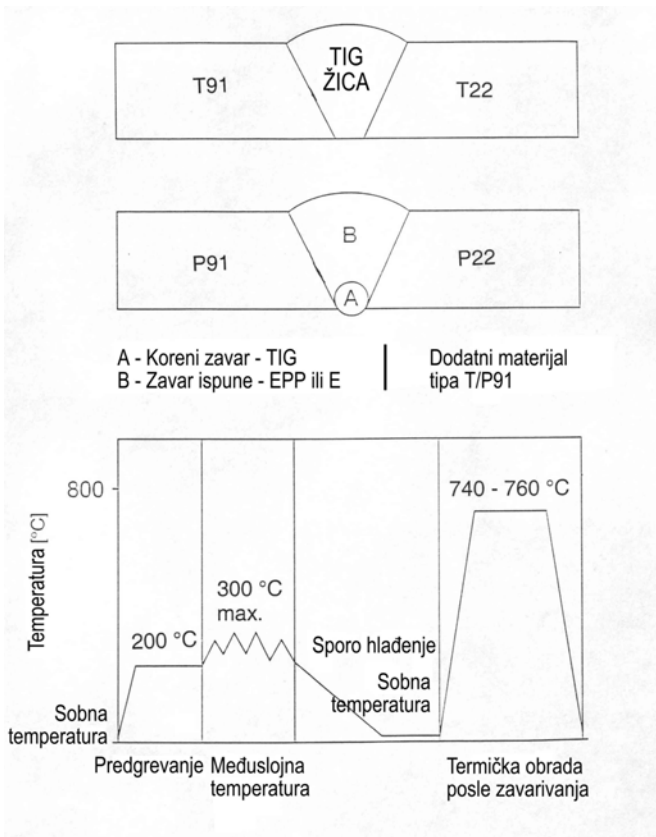
Slika 6a. Zavarivanje X20 sa T22 uz dodatni materijal X20 (debeli)



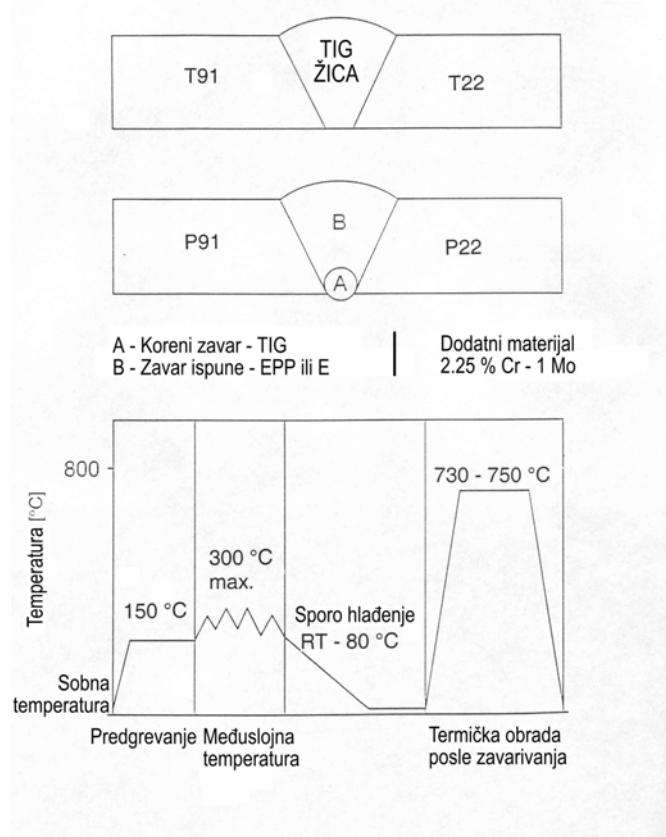
Slika 6b. Zavarivanje X20 sa T22 uz dodatni materijal X20 (tanki)



Slika 6d. Zavarivanje T/P91 sa T/P22 uz dodatni materijal 2.25 Cr 1 Mo (debeli)



Slika 6c. Zavarivanje T/P91 sa T/P22 uz dodatni materijal T/P91



Slika 6e. Zavarivanje T/P91 sa T/P22 uz dodatni materijal 2.25 Cr 1 Mo (tanki)

Raznorodni spojevi sa austenitnim čelicima

Najbolji način za realizaciju prelaska između T/P91 i austenitnog čelika je izvođenje prelaznog spoja u radionici. Prvi metal šava na bazi nikla postavlja se na jednoj strani komada od T/P91 i praćen je "NT" tretmanom sličnom za osnovni materijal T/P91. Ovaj puterovani P91 je osnova za zavarivanje sa austenitnim materijalom korišćenjem metala šava na bazi nikla. Posle odgovarajućeg IBR i mašinske obrade ovaj prelazni komad se može zavarivati na licu mesta i sa cevima od T/P91 i austenitnog čelika. Strana T/P91 je regularni istorodni spoj sa odgovarajućim sličnim dodatnim materijalom i termičkom obradom posle zavarivanja, a austenitna strana je drugi regularni srodni spoj sa austenitnim dodatnim materijalom.

U slučaju tankozidnih cevi spoj između T91 i austenitnog čelika obično se izvodi direktnim zavarivanjem sa dodatnim materijalom na bazi nikla i termičkom obradom posle zavarivanja na oko 760 °C. Za ovu proceduru austenitni čelik treba da je ili stabilizovan ili sa smanjenim ugljenikom, u cilju sprečavanja moguće osetljivosti na prsline usled naponske korozije pri termičkoj obradi posle zavarivanja.

U slučaju debelozidnih prelaza, puterovanje cevi P91 treba prvo obaviti nanošenjem sloja na bazi nikla, a potom obaviti uobičajenu termičku obradu posle zavarivanja. Tada se zavarivanje austenitne cevi može izvesti korišćenjem dodatnog materijala na bazi nikla. U cilju smanjenja napona

usled zavarivanja mora se koristiti tehnika zavarivanja sa što više zavara, u cilju što manjeg unosa toplote.

4. GRUPA UNAPREĐENIH ČELIKA SA 2.25 % Cr

4.1. Primena unapređenih čelika sa 2.25 % Cr

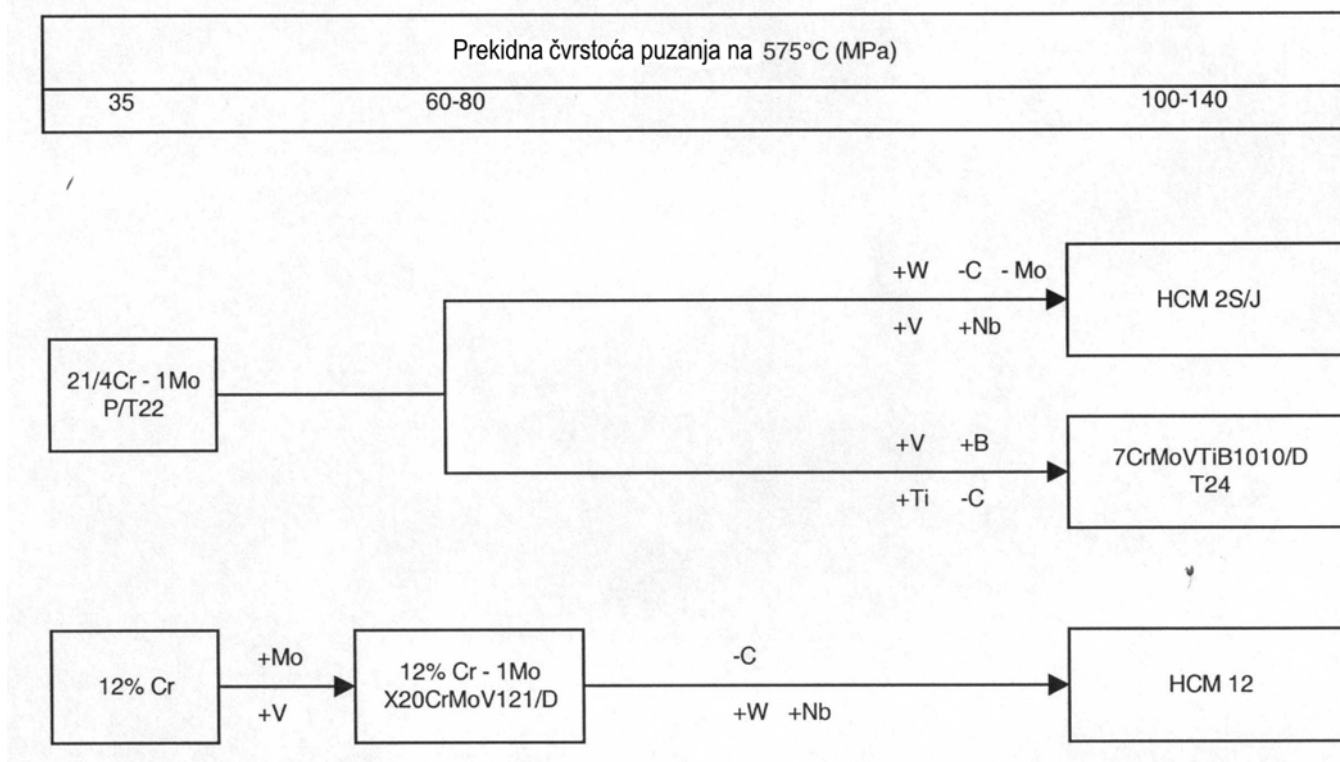
Prva primena u energetskim postrojenjima modernih unapređenih čelika sa 2.25 % Cr za ekrane kotla pokazala je da su ovi čelici u potpunosti ispunili očekivanja u odnosu na zavarivanje, oblikovanje i tvrdoću.

4.2. Metalurgija grupe unapređenih čelika sa 2.25 % Cr

4.2.1. Hemijski sastav

U razvoju klase T23, osnova, klasa T22, modifikovana je dodatkom volframa (1.6 %), smanjenjem sadržaja molibdena (0.20 %) i sadržajem ugljenika (0.04 – 0.10 %), uz male dodatke vanadijuma, niobijuma, azota i bora. Sadržaj ugljenika je namenski smanjen zbog zahteva zavarivosti; niti je potrebno predgrevanje niti termička obrada posle zavarivanja [4].

Kod klase T24, dodatak vanadijuma, titana i bora doveo je do poboljšanja čvrstoće puzanja do loma, u poređenju sa klasom T22 (2.25 % Cr, 1 % Mo) (tab. 5, sl. 2). Optimizacija hemijskog sastava uključuje odgovarajuće smanjenje sadržaja ugljenika, kao važnog koraka u smanjenju vrednosti tvrdoće u ZUT. Razvoj je prikazan na slici 7.



Slika 7. Razvoj unapređenih čelika za ekrane kotla

Tabela 5. Hemijski sastav modernih čelika 2.25 % Cr 1 % Mo za ekrane kotla

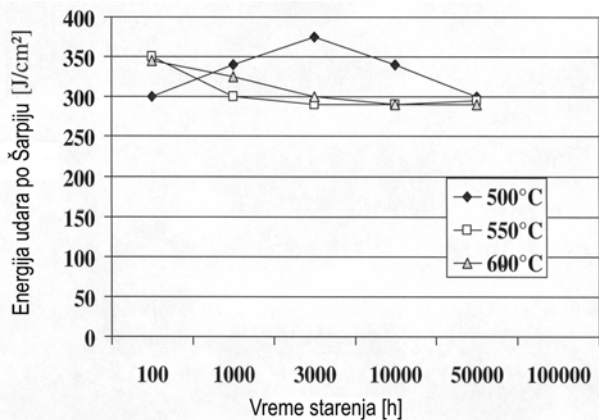
Klasa	C	Cr	Mo	W	Nb	V
T22	max. 0.15	1.9 2.6	0.87 1.13	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.
T23 HCM2s	0.04 0.10	1.9 2.6	0.05 0.30	1.45 1.75	0.02 0.08	0.2 0.3
T24 7 CrMoVTiB 10 10	0.05 0.10	2.2 2.6	0.9 1.10	n.s. n.s.	n.s. n.s.	0.2 0.3

4.2.2. Pojava transformacije unapređenih 2.25 % Cr čelika otpornih na puzanje

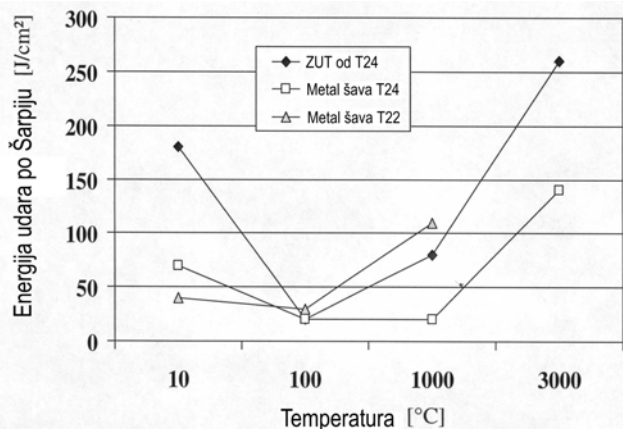
Zahvaljujući hemijskom sastavu, u T23 u oblasti velikih brzina hlađenja (od 0.8 K/s do 200 K/s) razvija se beinitno martenzitna struktura. Tvrdoća martenzita je samo oko 350 HV, i u direktnoj je vezi sa sadržajem ugljenika. Klasa T24 takođe pokazuje beinitno martenzitnu strukturu u istom opsegu brzina hlađenja. Maksimalna tvrdoća je takođe oko 350 HV.

4.2.3. Osobine unapređenih 2.25 % Cr čelika posle starenja

Posle starenja u temperaturnom opsegu 500 - 600 °C klasa T24 pokazuje rezultate koji su prikazani na slici 8. ZUT i metal šava klasa T24/T22 pokazuje oporavljanje posle privremene krtosti, kao što je prikazano na slici 9 [4].



Slika 8. Osnovni materijal T24 posle starenja



Slika 9. ZUT i metal šava T22/T24 posle starenja

4.3. Zavarivanje unapređenih 2.25 % Cr čelika

4.3.1. Zavarivanje čelika T23

Poprečni zavareni spojevi

Poprečni zavareni spojevi se mogu izvesti odgovarajućim dodatnim materijalima bez i sa predgrevanjem do 175 °C, bez završne termičke obrade posle zavarivanja. Postoji samo mala razlika u tvrdoći između epruveta sa i bez predgrevanja. Maksimalna tvrdoća je manja od 320 HV10, čak i bez predgrevanja (sl. 10).

Zavarivanje ekrana kotla

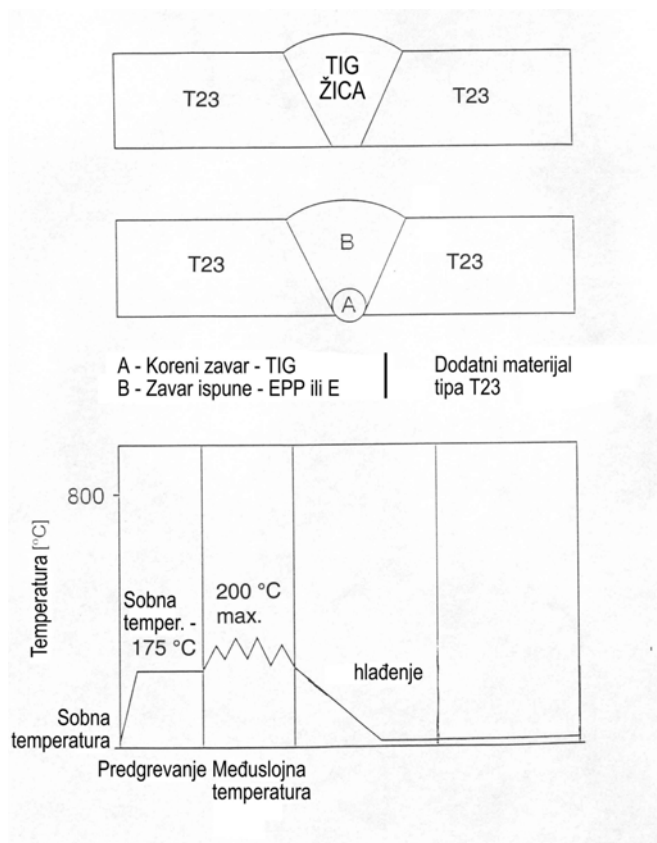
Zavarivanje ekrana kotla može se izvesti sa trakama T11 ili T22 i dodatnim materijalom 2.25 % Cr 1 % Mo, postupkom EPP bez predgrevanja i sa termičkom obradom posle zavarivanja. Maksimalna tvrdoća je u granicama do 350 HV10. Ovi ekrani kotla mogu se savijati, zavarivati na uobičajeni način, bez stvaranja prslina (sl. 11).

4.3.2. Zavarivanje čelika T24

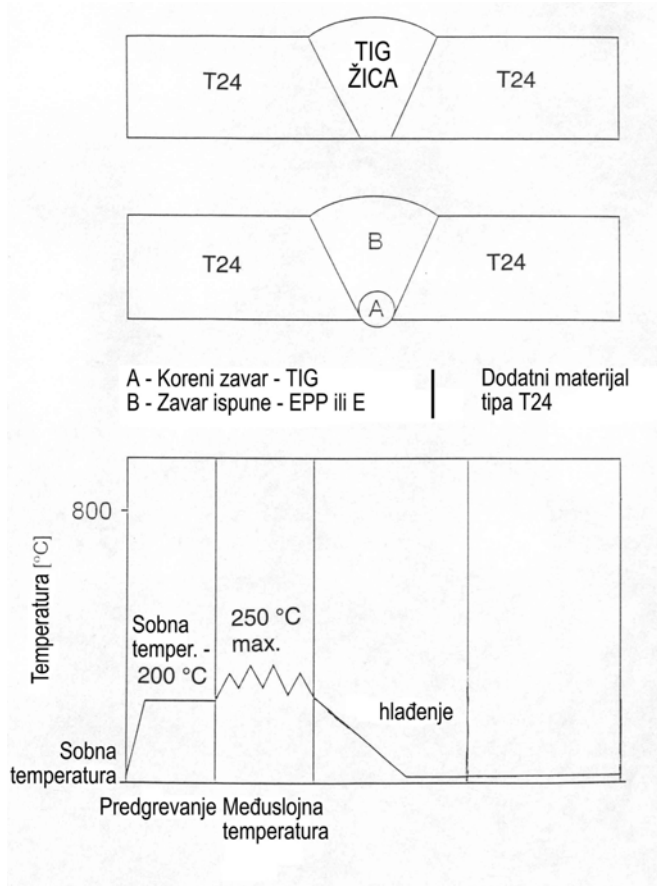
Zavarivanje poprečnih zavarenih spojeva

Zavarivanje poprečnih zavarenih spojeva je moguće sa odgovarajućim dodatnim materijalom, bez i sa predgrevanjem do 200 °C, bez termičke obrade posle zavarivanja. Raspodela tvrdoće pokazuje nebitan uticaj temperature predgrevanja na tvrdoću metala šava i ZUT. Može se

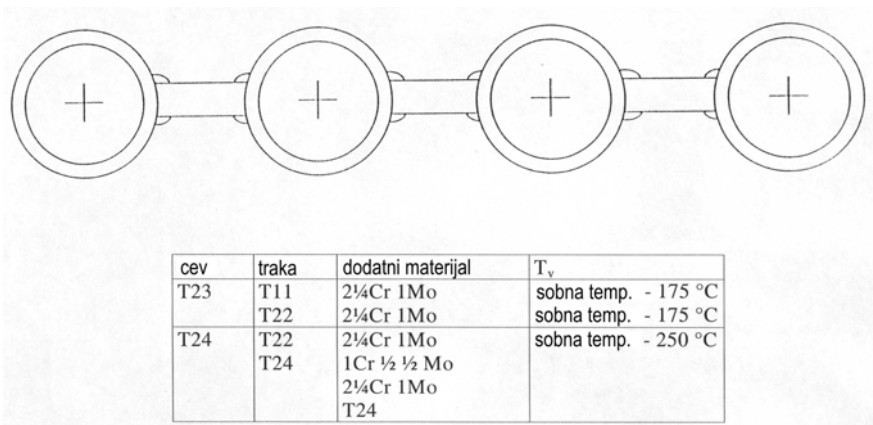
zaključiti da za poprečne zavarene sklopove predgrevanje nije potrebno (sl. 12).



Slika 10. Zavarivanje T23 sa T23 korišćenjem dodatnog materijala T23



Slika 12. Zavarivanje T24 sa T24 dodatnim materijalom T24



Slika 11. Shema cevnog zida, uslovi zavarivanja

Zavarivanje ekrana kotla

Zavarivanje ekrana kotla može se izvesti sa trakama T22 i dodatnim materijalom 2.25 % Cr 1 % Mo, postupkom EPP sa predgrevanjem do 250 °C, bez termičke obrade posle zavarivanja. Zavareni sklopovi pokazuju da temperatura predgrevanja nema uticaja. Maksimalna vrednost tvrdoće u ZUT je manja od 350 HV10 (sl. 11).

U principu, već je rečeno važeće za trake od T24 i dodatne materijale tipa 1 Cr 0.5 Mo / 2.25 Cr 1 Mo ili T24. Tvrdoća posle termičke obrade posle zavarivanja ostaje u ZUT ispod 350 HV. Ovi ekrani kotla se mogu savijati u zavarenim spojevima bez stvaranja prslina.

LITERATURA

- [1] Haarmann K. et al: The T91/P91 Book, Vallource & Mannesmann Tubes
- [2] Oehmigen H.G. et al: Das Verhalten der Schweissverbindung des Stahles X11 CrMoWVNB 9-1-1 unter Zeitstandanspruchung, VGB Kraftwerkstechnik 2/99 s. 88-86.
- [3] Wachter O. et al: Auslegung, Fertigung und Montage der ersten in Deutschland gefertigten und in einem Steinkohlenkraftwerk eingebauten P92-Jammer, VGB - Konferenz "Werkstoffe und Schweisstechnik im Kraftwerk 1998."
- [4] Arndt J. et al: New Grades for Waterwalls and Superheaters, Vallource & Mannesmann Tubes
- [5] Lind E.: In Plant Testing of HCM12, HCM2s and 7 CrMoVTiB 10-10, VGB - Konferenz "Werkstoffe und Schweisstechnik im Kraftwerk 1998."

STRUČNI DOKUMENTI MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE U 2001.

Nastavak pregleda iz časopisa ZZK br. 1/2002

Komisija VIII - Zdravlje i bezbednost

1. **Doc. VIII-1904-00:** Evaluation of health hazards caused by hazardous in welding
 - Procena zdravstvenih rizika izazvanih opasnim supstancama pri zavarivanju
2. **Doc. VIII-1922-01:** Effect of process parameters upon the dopamine and lipid peroxidation activity by selected MIG welding fumes as a marker of potential neurotoxicity
 - Uticaj parametara procesa pri aktivnosti dopamina i lipidne peroksidacije preko izabranih gasova pri MAG zavarivanju, kao markera moguće neurotoksičnosti
3. **Doc. VIII-1923-01:** UK Health and Safety Executive Chemical Hazard Alert Notice - Manganese and its inorganic compounds
 - Zapis Britanskog udruženja za zdravlje i bezbednost - Mangan i njegova neorganska jedinjenja
4. **Doc. VIII-1924-01:** Speciation of chromium in welding fumes
 - Specifikacija hroma u dimovima pri zavarivanju
5. **Doc. VIII-1926-01:** Status report by the Nickel Development Institute - Stainless steel and welding fume
 - Izveštaj Instituta za razvoj nikla - Nerđajući čelici i dim pri zavarivanju
6. **Doc. VIII-1927-01:** UK Health and Safety Executive Information Document 668/28 – Control of fume arising from electric arc welding of stainless steels
 - Dokument br. 668/28 britanskog udruženja za zdravlje i bezbednost - Kontrola dima stvorenog pri elektro-lučnom zavarivanju nerđajućih čelika
7. **Doc. VIII-1928-01:** 2001 assessment of the risk of disorders of the lung being caused by occupational

exposure to emissious associated with electric arc welding processes

- Procena rizika poremećaja rada pluća usled profesionalne izloženosti dimovima pri elektro-lučnom zavarivanju
8. **Doc. VIII-1929-01:** Evaluation of health hazards caused by hazardous substances in welding
 - Procena zdravstvenih rizika uzrokovanih opasnim supstancama pri zavarivanju
 9. **Doc. VIII-1929-01:** Development of plasma cutting process that meets environmental requirements
 - Razvoj procesa rezanja plazmom koji zadovoljava zahteve životne sredine
 10. **Doc. VIII-1930-01:** Strategies for risk assessment and control in welding challenges for developing countries
 - Strategije za procenu rizika i kontrolu pri zavarivanju - izazov za zemlje u razvoju

Komisija XVI- Spajanje polimera i adhezivne tehnologije

1. **Doc. XVI-791-01:** Theoretical model for the one dimensional temperature and stress calculation of simple hot plate welded geometries
 - Teorijski model za izračunavanje jednodimenzione temperature i napona jednostavne geometrije spoja vrućom pločom
2. **Doc. XVI-792-01:** Investigation towards application of a new technique on laser transmission welding
 - Istraživanja usmerena ka primeni nove tehnike zavarivanja transmisionim laserom

Prevod: Milica Antić