

ZAVARLJIVOST VATROOTPORNOG 1.4713 (X10CrAl7) MATERIJALA WELDABILITY OF HEAT RESISTANT 1.4713 (X10CrAl7) MATERIAL

Stjepan Gangur, Božo Depotović

Ul. Dr. Mile Budaka 1, 35000 Slavonski Brod, Duro Đaković TEP d.o.o.

Ključne riječi: 1.4713 (X10CrAl7), vatrootporni feritni nehrđajući čelik, zavarljivost istorodnih i raznorodnih materijala

Key words: 1.4713(X10CrAl7), heat resistant ferritic stainless steel, weldability of similar and dissimilar materials

Sažetak

Prikazano je istorodno zavarivanje 1.4713 (X10CrAl7) čelika, te raznorodno zavarivanje sa S355 materijalom. Zvari su izvedeni različitim postupcima zavarivanja i različitim dodatnim materijala i prikazane su razlike u mehaničkim svojstvima zavara, s obzirom na prostupke i dodatne materijale.

Abstract

It is shown similar welding of 1.4713 (X10CrAl7) steel, and disimilar welding with S355 material. The welds are welded with different welding processes and different filler metals and the differences in mechanical properties of the welds are shown, with respect of welding processes and filler metals.

1. UVOD

U radu se opisuju ukratko feritni razredi nehrđajućih vatrootpornih čelika, a detaljno je obrađen X10CrAl7 čelik. Prikazana su mehanička i kemijska svojstva čelika, te je prikazana zavarljivost čelika s istorodnim materijalom, te s raznorodnim S355 materijalom. Korišteni su postupci zavarivanja REL, TIG i MAG zavarivanje punom žicom.

2. OPĆENITO O FERITNIM VATROOTPORNIM NEHRĐAJUĆIM ČELICIMA

Viskotemperaturni vatrootporni nehrđajući čelici dopunjaju austenitne čelike i čelike otporne na puzanje. Glavni legirni element u feritnim razredima je krom. Njegov pozitivan učinak na korozivnu postojanost na zraku na povišenim temperaturama je pojačan silicijem i aluminijem.

Dva niža legirna razreda su najprikladniji za temperature od 550° do 850°C na kojima je većina visokotemperaturnih nehrđajućih austenitnih čelika sklona formiranju krhkikh faza. Više legure se primjenjuju na temperaturama do 1150°C i pokazuju odličnu otpornost napadima sumpora i rastaljenih metala.

Zbog svojih feritnih struktura, feritni čelici pokazuju niže čvrstoće na temperaturama iznad 600°C, i također su više otporni na temperaturne udare od visokotemperaturnih austenitnih nehrđajućih čelika. Uz veću toplinsku vodljivost i manju toplinsku ekspanziju u odnosu na austenitne čelike, jednaki toplinski udari će rezultirati manjim toplinskim naprezanjima u feritnim materijalima. U tim uvjetima, feriti omogućuju veće tolerancije za dizajn i rad.

Svi razredi ovih čelika su uključeni u europskoj normi EN 10095 – Vatrootporni čelici i niklene legure. Kemijski sastav i mehanička svojstva X10CrAl7 čelika su navedeni u Tablicama 3.1 i 3.2.

Tablica 3.1 Dozvoljeni kemijski sastav X10CrAl7 čelika prema EN 10095

C (max)	Si	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr	Al
0,12%	0,50-1,00%	1,00%	0,040%	0,015%	6,00-8,00%	0,50-1,00%

Maksimalna radna temperatura na suhom zraku ovog čelika je 800°C.

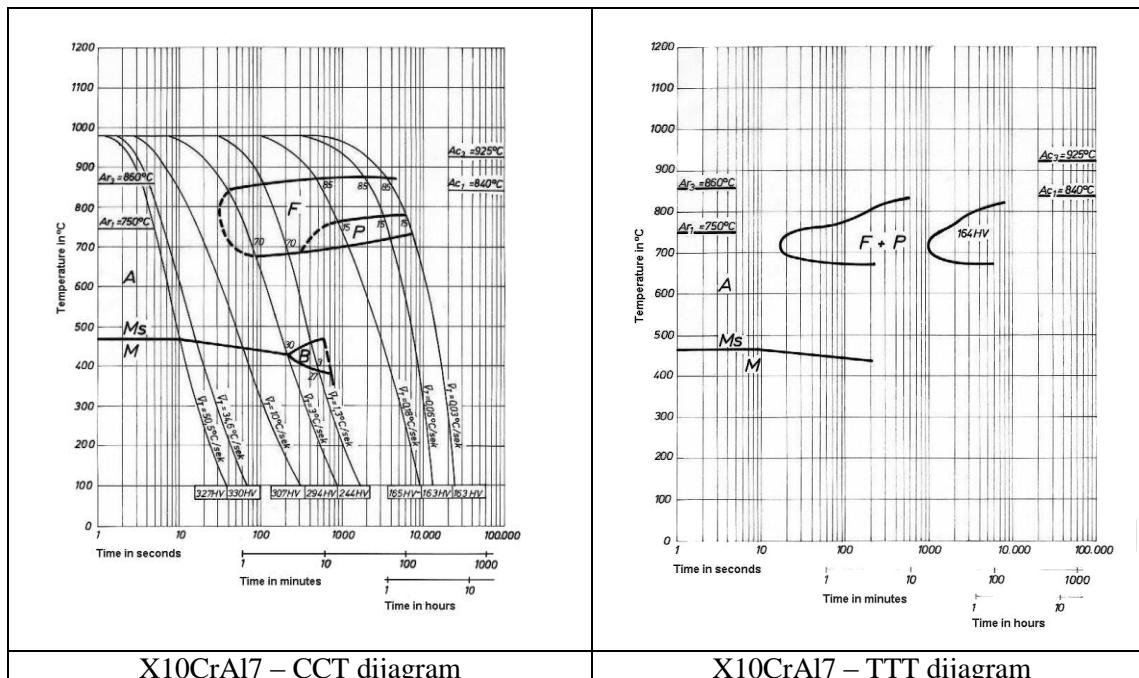
Na sobnim temperaturama, visokotemperaturni feritni čelici imaju mehanička svojstva jednaka njihovim austenitnim dvojnicima. Kada su podvrgnuti visokim temperaturama ($>600^{\circ}\text{C}$), vremenska čvrstoća opada samo za četvrtinu vrijednosti austenitnih vatrootpornih čelika koji su na istim radnim uvjetima. Stoga, primjenjena opterećenja na komponentama treba uzeti u obzir kod dimenzioniranja i konstruiranja.

X10CrAl7ne formira krhke faze, ali bi trebao biti izložen samo umjerenim korozijskim atmosferama zbog svog niskog sadržaja kroma.

Tablica 3.2 Mehanička svojstva na sobnoj temperaturi X10CrAl7 čelika prema EN 10027

$R_{p0,2}$ (N/mm ²) min.	R_m (N/mm ²)	$L_0=5D_0$ (%)		HB* (max.)
		uzd.	popr.	
220	420-620	20	15	192

Pretvoreno u HV10, 192HB = 198 HV10



Slika 1. CCT i TTT dijagrami X10CrAl7 čelika

3. KOROZIJSKA POSTOJANOST

Vodena korozija

Pošto je njihova glavna namjena da izdrže koroziju na visokim temperaturama, feritni vatrootporni razredi – kao drugi vatrootporni čelici – od njih se ne očekuju dobre performanse u nisko temperaturnim okruženjima. Sljedno tome, oni nisu otporni na kondenzate kiselina i sl.

Visokotemperaturna korozija

Usko je povezana s kemijskim sastavom materijala u kojoj mjeri je materijal otporan na vruće plinove. Legirni sadržaj određuje da li se ili ne zaštitni sloj oksida može održati ili formirati da se započne s njime ili da li se mogu pojaviti druge štetne reakcije.

U nastavku se raspravlja o brojnim tipovima visokotemperaturnih korozija. Neosjetljivost na reducirajuće sumporne plinove je najspecifičnije svojstvo visokotemperaturnih feritnih nehrđajućih čelika. Kako se industrijska okruženja obično sastoje od mješavine agresivnih plinova, jasno je da se kompromisno mora odabrat određeni razred čelika.

Oksidacija

U oksidacijskim okruženjima, zaštitni sloj oksida će se vjerovatno formirati na metalnoj površini. Ako je sloj uzak i prijanjajući, može spriječiti ostale agresivne elemente u okruženju za napad i stvaranje reakcija s čelikom. Međutim, sloj može rasti u debljini zbog stalne oksidacije. Rezultirajući porozni sloj će omogućiti plinovima da prođu do osnovnog materijala kroz pore ili pukotine. Silicij i aluminij su oboje korisni za otpor na oksidaciju. Niska toplinska ekspanzija i visoka toplinska vodljivost feritnih osnovnih materijala smanjuju promjene u volumenu, a time i ljuštenje zaštitnog sloja.

Napadi sumpora

Pravilo je da feriti daju bolje performanse od austenita u oksidirajućim i reducirajućim sumpornim okruženjima.

SO₂ ili H₂S su mogući spojevi u procesnim plinovima ili gorivima koje sadrže sumpor. U oksidirajućim atmosferama, napad se može odgoditi sve dok je postojeći nivo oksida kontinuiran i gust. Međutim, temperaturni nivo je do 200°C manji nego u zraku. Stoga, oksidni sloj može rasti brže i manje kompaktno – formirajući neželjene pore i pukotine – i oljuštiti se. S feritnim čelicima u upotrebi, nema rizika od formiranja niklenih sulfida s niskom točkom tališta. Takva tekuća faza može uništiti ostatak oksidnog sloja i spriječiti daljnju pasivizaciju austenita. Dodatno, eutektičke faze precipitata na 650°C – obično na granicama zrna – oslabljuju strukturu i dovode do brzog uništenja austenitnog materijala.

U reducirajućim sumpornim atmosferama, aktivnost kisika može biti dovoljna da se formira zaštitni sloj oksida, pod uvjetom da je sadržaj kroma veći od 25%. Ovo obično nije slučaj u austenitnim vatrootpornim čelicima jer je posljedica katastrofalnih napada korozije opisana iznad. Stoga, najbolje je koristiti feritne materijale u okruženima s reducirajućim sumporom.

Skupljanje ugljika i dušika

U pogledu otpornosti na karburaciju, austenitni razredi pokazuju povoljnije rezultate nego feritni zbog njihovog visokog sadržaja nikla. Formiranje krom karbida ili krom nitrida povlači krhkost materijala. Dodatno, okružujuća matrica postaje oslabljena kromom što posljednično smanjuje razinu otpornosti materijala.

Silicij ima koristan učinak i na skupljanje ugljika i dušika. Aluminij je samo povoljan u pogledu karburacije. Visoki afinitet dušika prema aluminiju rezultira aluminijevim nitridima koji uništavaju zaštitnu granicu i dovode do preranih grešaka u materijalu.

Rastaljeni metali

Kod rastaljenih metala, nikl je najosjetljiviji element na raspadanje. Austenitni materijali će nužno popustiti kada npr. rastaljeni bakar prodre u granice zrna. Od viskotemperurnih ferita, s druge strane, se očekuje da pokaže dobru kompaktibilnost s rastaljenim bakrom. Konačna otpornost će, naravno, ovisiti o sadržaju rastaljenog metala.

4. ZAVARLJIVOST X10CRAL7 MATERIJALA

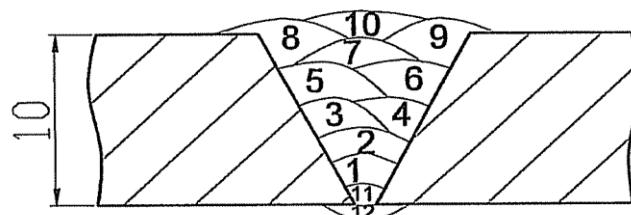
Obično se zahtjevaju iste mjere opreza kao i za ugljične čelike. Kod spojeva za limove deblje od 3 mm preporučljivo je, no ne i neophodno, predgrijavanje na 200-300°C. Zbog rasta zrna u zoni utjecaja topline, unos topline se treba minimalizirati. Preferirani postupci zavarivanja su oni pod zaštitom zaštitnih plinova poput TIG, plazma i MIG postupaka. Da bi se dobili najbolji rezultati, kao zaštitni plin se treba koristiti čisti argon.

Odgovaranjući dodatni materijal ima štetni učinak na duktilnost, stoga su preporučljivi austenitni dodatni materijali poput tipova 307, 309 ili 310. Ako će zavar biti izložen sumpornom okruženju, neophodno je navarivanje zavara s odgovaranjućim feritnim dodatnim materijalom.

Zavarljivost istorodnog X10CrAl7 materijala

Zavarivanje TIG postupkom

U testnom uzorku zavarena su dva uzorka limova debljina 10 mm. Kao dodatni materijal odabrana je Böhlerova žica FA-IG (W 25 4 Mn). Korištene jakosti struje bile su od 110 do 168 A, zaštitnim plinom Ar 11, protoka 10 l/min, a meduslojna temperatura je ograničena na maximalno 300°C. Zavar je izведен u 12 prolaza, a predgrijavanje prije zavarivanja je bilo 200°C.



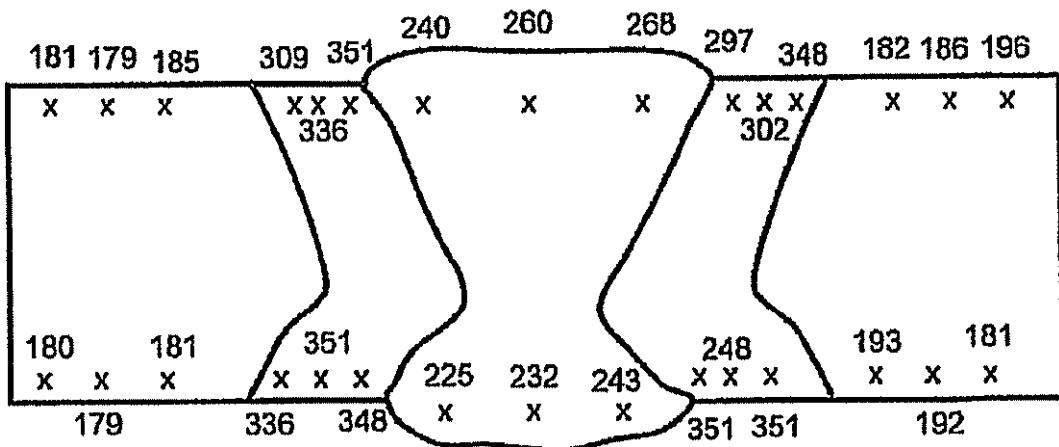
Slika 2. Prikaz zavarenog spoja TIG postupkom X10CrAl7 materijala

Kemijska analiza osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara pokazala je sljedeće:

Nr. No. N°	Art Sort Nature	CHEMISCHE ANALYSE [%] CHEMICAL COMPOSITION [%] - ANALYSE CHIMIQUE [%] *)										GW =Grundwerkstoff - Base Material - Métal de base SG =Schweißgut - Weld Metal - Métal déposé				
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe	Al	Nb	V	N	Cu	
83215	1.4713	0,070	0,620	0,660	0,026	0,004	6,30	0,220	0,08	-	0,64	-	-	-	0,190	
98066	FA-IG	0,067	0,71	1,03	0,024	0,001	25,15	4,35	0,21	-	-	-	-	-	0,11	
470AP	SG	0,076	0,58	1,05	0,024	0,002	23,95	3,91	0,10	-	-	-	-	-	0,12	

Slika 3. Kemijski sastav zavarenog spoja TIG postupkom X10CrAl7 materijala

Mjerenje tvrdoće pokazalo je za osnovni materijal da je u dozvoljenom području tvrdoća:

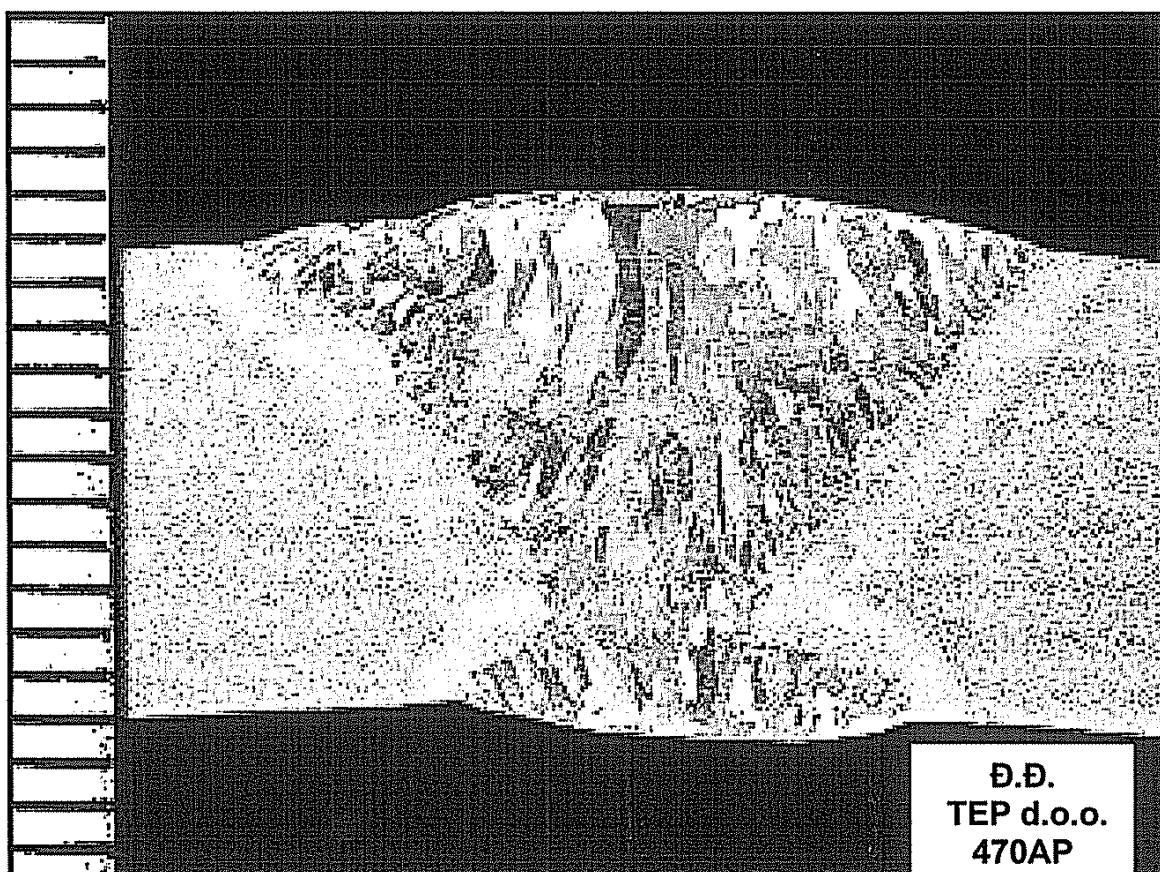


Slika 4. Mjerenje tvrdoća zavarenog spoja TIG postupkom X10CrAl7 materijala Jedinice u HV 10

Tablica 5.1 Mehanička svojstva zavarenog spoja TIG postupkom X10CrAl7 materijala

Dimenzijske epruvete			Sila granice razvlačenja	Sila prekida	Dimenzijske epruvete nakon preloma			Granica razvl., R _{pl,2}	Vlačna čvrstoća, R _m	Produljenje A ₅	Kut savijanja d=4t, 180°
Presjek		Mjerna dužina			Presjek		Mjerna dužina				
do, a	b				dk,ak	bk					
mm	mm	mm	N	N	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	α
10,30	24,90	90	106000	148700			111,3	413	580 OM	23,7	2x lice dobro
10,30	24,80	90	104600	148700			112,6	409	582 OM	25,1	2x korjen dobro

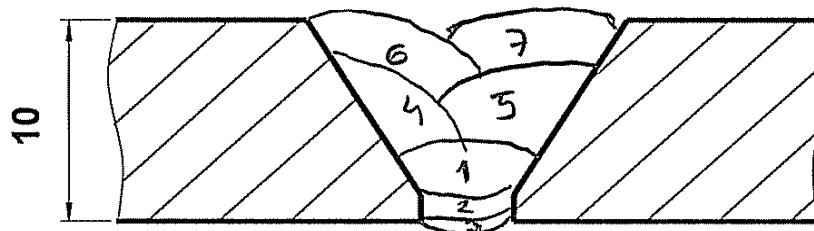
Mikrostruktura osnovnog materijala je sitnozrnata, feritno-martenzitna, prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643. Zona utjecaja topline je sitnozrnata. Zavar je krupnozrnate **feritne** strukture.



Slika 5. Mikrostruktura zavarenog spoja TIG postupkom X10CrAl7 materijala

Zavarivanje REL postupkom

U testnom uzorku zavarena su dva uzorka limova debljina 10 mm. Kao dodatni materijal odabрана je Böhlerova elektroda FOX FFB (E 25 20 B 2 2) – austenitni dodatni materijal tipa 310. Korištene jakosti struje bile su od 79 do 120 A, a međuslojna temperatura je ograničena na maximalno 250°C. Zavar je izведен u 7 prolaza, a predgrijavanje prije zavarivanja nije primjenjeno.



Slika 6. Prikaz zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 materijala

Kemijska analiza osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara pokazala je sljedeće:

CHEMISCHE ANALYSE [%]

CHEMICAL COMPOSITION [%] - ANALYSE CHIMIQUE [%] *)

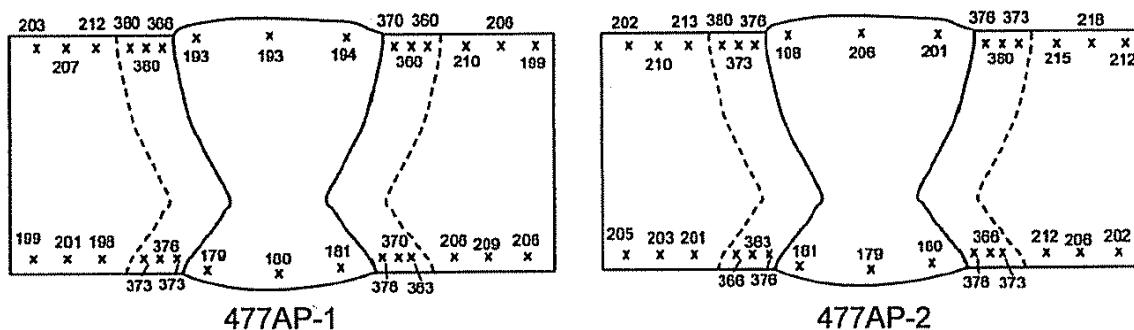
GW =Grundwerkstoff - Base Material - Métal de base

SG =Schweißgut - Weld Metal - Métal déposé

Nr. No. N°	Art. Sort Nature	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe	Al	Nb	V	N	Cu
87025 2125551	1.4713 FOX FFB	0,100 0,109	0,68 0,48	0,630 3,11	0,0330 0,014	0,005 0,004	6,70 25,08	0,260 20,37	0,04 0,03	- -	0,710 -	- -	- -	- 0,150 0,04	

Slika 7. Kemijski sastav zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 materijala

Tvrdoće su također bile u granicama dozvoljenoga..

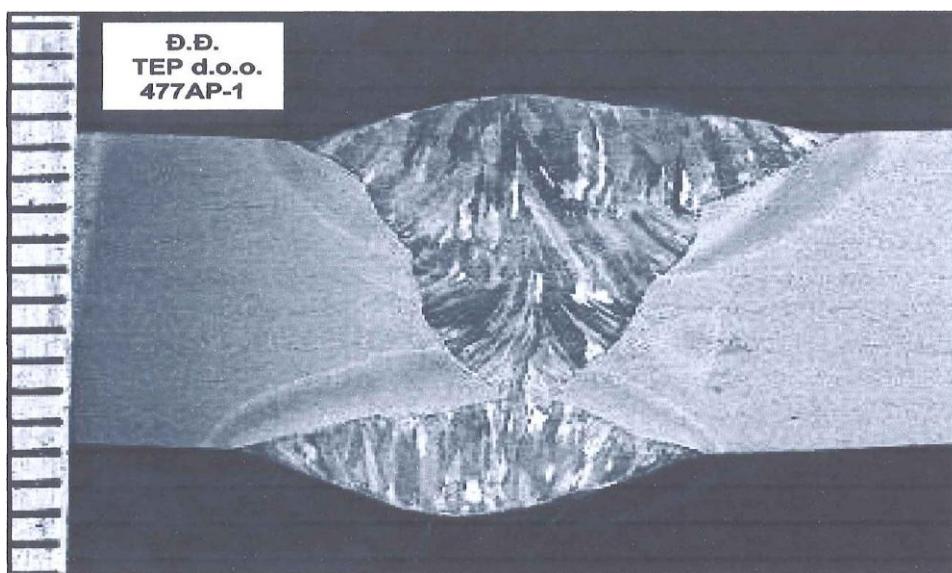


Slika 8. Mjerenje tvrdoća zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 materijala

Tablica 5.2 Mehanička svojstva zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 materijala

Dimenziije epruvete			Sila granice razvlačenja	Sila prekida	Dimenziije epruvete nakon preloma			Granica razvl., R _{p0,2}	Vlačna čvrstoća, R _m	Produljenje A ₅	Kut savijanja d=4t, 180°						
Presjek		Mjerna dužina			Presjek		Mjerna dužina										
do, a	b				dk,ak	bk											
mm	mm	mm	N	N	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	α						
9,9	25,1	90	119800	160300			108,5	482	645 OM	20,6	2x lice dobro						
9,9	25	90	119200	160000			108,4	482	646 OM	20,4	2x korjen dobro						

Makrostruktura osnovnog materijala je feritno-martenzitna prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643. Zavar je sitnozrnate strukture.



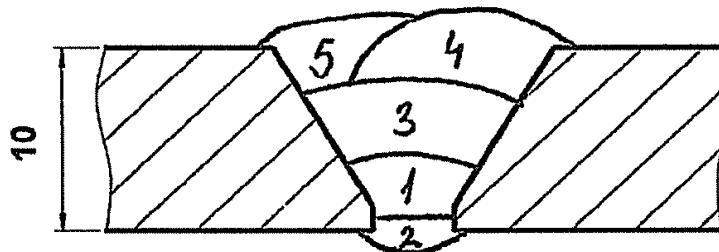
Slika 9. Mikrostruktura zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 materijala

5. RAZNORODNO ZAVARIVANJE X10CRAL7 MATERIJALA

Zavarivanje kombinacije X10CrAl7 i S355J2+N osnovnih materijala je izvedeno niskolegiranim feritnim dodatnim materijalima.

Zavarivanje REL postupkom

U testnom uzorku zavarena su dva uzorka limova debljina 10 mm, od materijala X10CrAl7 i S355J2+N. Kao dodatni materijal odabrana je Jesenička elektroda EVB Mo (E Mo B 42 H5). Korištene jakosti struje bile su od 100 do 175 A, a međuslojna temperatura je ograničena na maximalno 300°C. Zavar je izведен u 5 slojeva, a predgrijavanje prije zavarivanja je bilo 200°C.



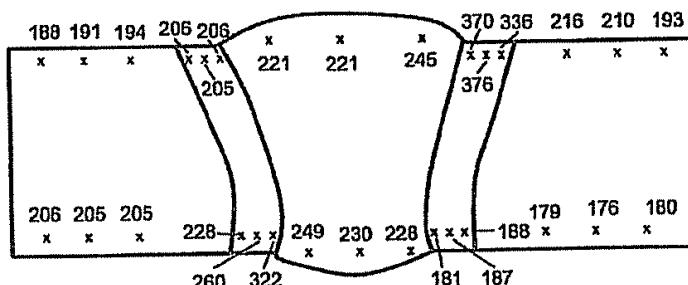
Slika 10. Prikaz zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Kemijska analiza osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara pokazala je sljedeće:

Nr. No. N°	Art Sort Nature	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Ti	N	Al	Cu
539152	1.0577	0,14	0,019	1,38	0,014	0,008	0,054	0,029	0,005	0,003	0,028	0,001	0,006	0,074	0,07
87025	1.4713	0,100	0,680	0,630	0,033	0,005	6,70	0,260	0,04	-	-	-	-	0,71	0,150
022497	EVB Mo	0,05	0,60	0,98	0,016	0,010	-	-	0,51	-	-	-	-	-	-
091460	EVB Mo	0,06	0,62	0,88	0,010	0,009	-	-	0,44	-	-	-	-	-	-
454AP/1	SG	0,066	0,51	1,03	0,020	-	-	-	0,49	-	-	-	-	-	-
454AP/2	SG	0,068	0,50	1,01	0,017	0,005	-	-	0,47	-	-	-	-	-	-

Slika 11. Kemijski sastav zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Mjerenje tvrdoća je izgledalo ovako:

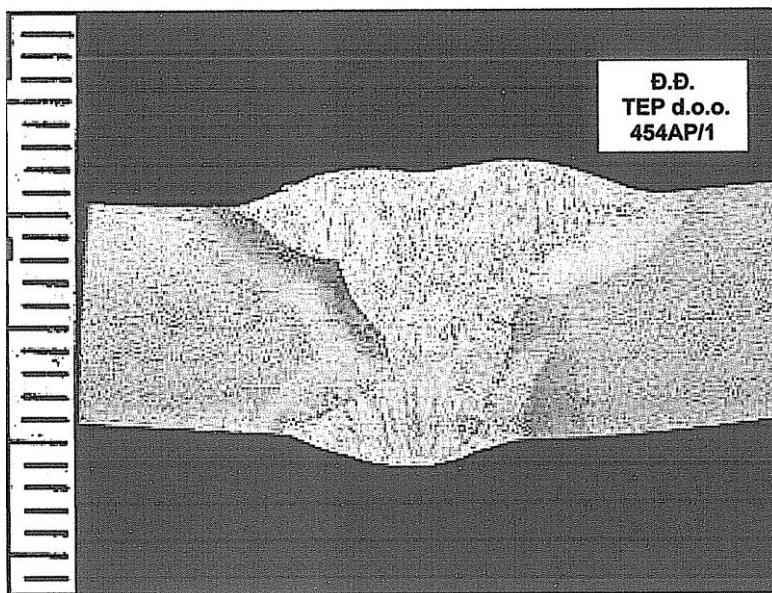


Slika 12. Mjerenje tvrdoća zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Tablica 5.3 Mehanička svojstva zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Dimenzijske epruvete			Sila granice razvlačenja	Sila prekida	Dimenzijske epruvete nakon preloma			Granica razvl., R _{p0,2}	Vlačna čvrstoća, R _m	Produljenje A ₅	Kut savijanja d=4t, 180°
Presjek		Mjerna dužina			Presjek		Mjerna dužina				
do, a	b				dk,ak	bk					
mm	mm	mm	N	N	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	α
9,40	25			134200					571 OM		2x lice dobro
9,40	24,80			134800					578 OM		2x korjen dobro

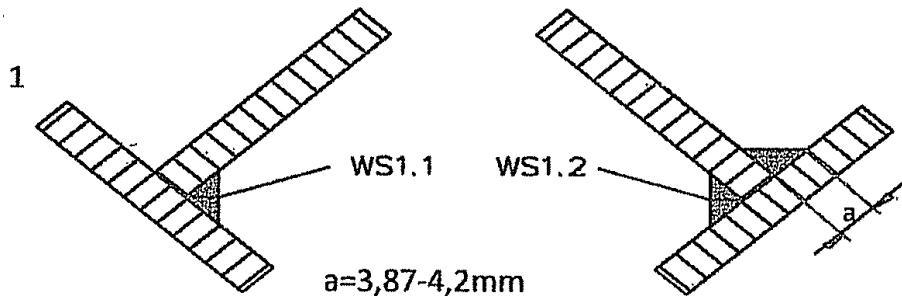
Mikrostruktura osnovnog materijala S355J2+N je feritno-perlitna, prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643, dok je mikrostruktura X10CrAl7 osnovnog materijala feritno-martenzitna, prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643. Zona utjecaja topline je sitnozrnata. Zavar je klasično sitnozrnate dendritne strukture.



Slika 13. Mikrostruktura zavarenog spoja REL postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Zavarivanje MAG postupkom

U testnom uzorku zavarena su dva uzorka limova debljina 6 mm. Kao dodatni materijal odabrana je Esabova puna žica OK Aristorod 13.09 (GMoSi). Korištene jakosti struje bile su od 150 do 175A. Zavar je izведен u 2 sloja.



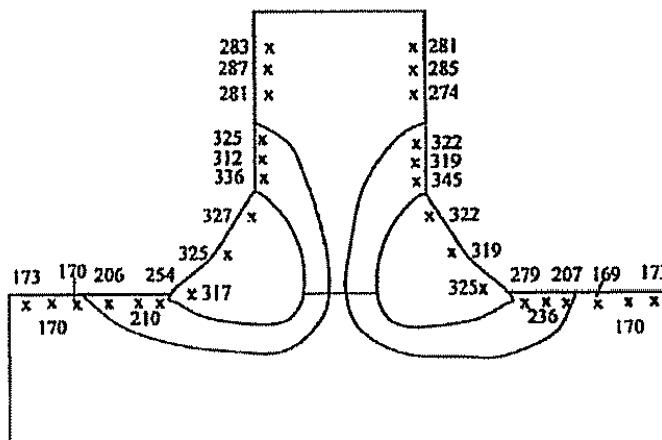
Slika 14. Prikaz zavarenog spoja MAG postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Kemijska analiza osnovnih materijala, metala zavara i zone utjecaja topline pokazala je:

Nr. No. N°	Art. Sort Nature	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	N	V	Nb	Cu
133523	1.0577	0,16	0,019	1,44	0,014	0,002	0,04	0,02	0,003	0,040	0,0010	0,0054	0,004	0,0095	0,03
79568	1.4713	0,060	0,660	0,920	0,028	0,002	6,740	0,260	0,080	0,670	-	-	-	-	0,170
PV049016728B	OK AristoRod	0,094	0,61	1,09	0,014	0,008	0,07	0,04	0,45	0,002	-	-	-	-	0,09

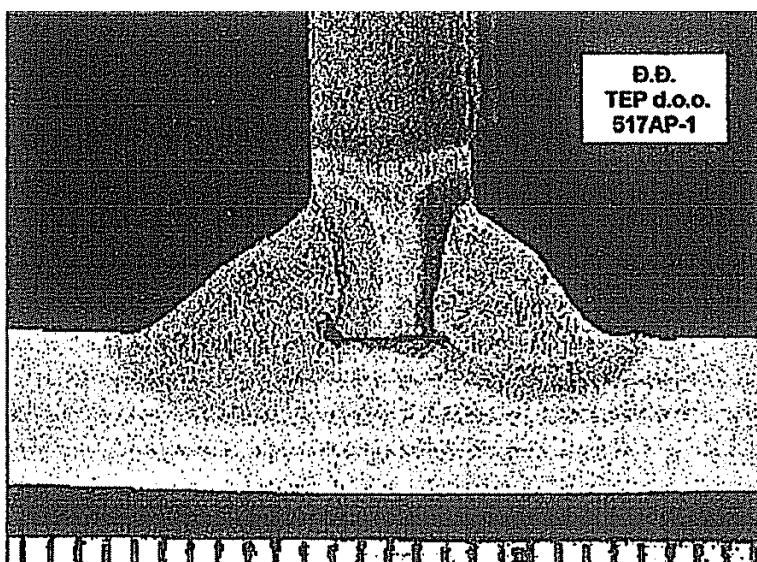
Slika 15. Kemijski sastav zavarenog spoja MAG postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Mjerenje tvrdoća je izgledalo ovako:



Slika 16. Mjerenje tvrdoća zavarenog spoja MAG postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

Kao i kod raznorodnog zavarivanja REL postupkom, mikrostruktura osnovnog materijala S355J2+N je feritno-perlitna, prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643, dok je mikrostruktura X10CrAl7 osnovnog materijala feritno-martenzitna, prosječne veličine zrna 10 prema EN ISO 643. Zona utjecaja topline je sitnozrnata, zavar je klasično sitnozrnate dendritne strukture.



Slika 17. Mikrostruktura zavarenog spoja MAG postupkom X10CrAl7 i S355J2+N materijala

6. ZAKLJUČAK

Osnovni materijal X10CrAl7 pokazuje uvjetno dobru zavarljivost zbog potrebe predgrijavanja, ograničene međuprolazne temperature i parametara zavarivanja. Kod istorodnog zavarivanja preporučeno je zavarivati ga fertno-perlitnim dodatnim materijalima. Kod raznorodnog zavarivanja preporučeno je zavarivati ga feritno - austenitnim dodatnim materijalima tipa 25/4 ili austenitnim dodatnim materijalima tipa 307, 309 ili 310. U radu je prikazano da se dobar zavar može postići i odgovarajućim dodatnim materijalom primjerenim za drugi osnovni materijal u spoju s ovim čelikom (S355 je bio primjer). Zbog svoje karakteristične vatrootpornosti i radnih uvjeta u kojima će se koristiti X10CrAl7, prvo je potrebno sagledati radne uvjete zavara, te onda izvesti zavar sa dodatnim materijalom istih ili boljih svojstava kao i X10CrAl7.

7. LITERATURA:

- [1] Outokumpo – High temperature ferritic stainless steel
- [2] EN 10095 – 1999 - Heat resisting steels and nickel alloys
- [3] Dokumentacija firme D.D. TEP
- [4] Ferrotherm – X10CrAl7
- [5] ThyssenKrupp – 1.4713 Material data sheet