

ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH AUSTENITNIH ČELIKA

WELDING OF STAINLESS AUSTENITIC STEELS

Josip Pavić¹, Josip Majić¹, Dejan Marić¹, Ivan Samardžić²

¹⁾Duro Daković Kompenzatori d.o.o.

²⁾Mechanical engineering faculty, University of Osijek, 35000 Slavonski Brod

Ključne riječi: austenitni čelik, Schaefflerov dijagram

Key words: austenitic steels, Schaeffler diagram

Sažetak:

U radu se opisuje kratka povijest nastanka austenitnih čelika kao i potrebni uvjeti kako bi se dobila potrebna otpornost prema koroziji i visokim temperaturama. Definiran je utjecaj legirnih elemenata na promjene strukture i otpornosti. Sa stajališta zavarivanja su obrađeni potrebni uvjeti, parametri, mogući problemi, izbor dodatnog materijala kao i primjena Schaefflerovog dijagrama za kontrolu ispravnosti odabranog osnovnog i dodatnog materijala.

Abstract:

This paper describes a short history of the emergence of austenitic stainless steels and the conditions necessary to obtain the required resistance to corrosion and high temperatures. Defined by the influence of alloying elements on the changes in the structure and resilience. From the standpoint of welding are processed the necessary conditions, parameters, possible problems, the choice of filler material and the application Schaefflerovog diagram to control correctness selected primary and supplementary material.

1. UVOD

Napretkom tehnike upotreba nehrđajućih čelika dostigla je vrlo velike razmjere kako u industrijski razvijenim zemljama tako i kod nas. Ova grupa čelika primjenjuje se u raznim granama industrije, a naročito u kemijskoj, tekstilnoj, u elektrotehnici, kao i u mnogim drugim strukama. Ovaj materijal je tehnološki usvojen i u masovnu upotrebu je došao u godinama 1912. – 1914. Od tog vremena upotreba specijalnih čelika je stalno i rapidno rasla zamjenjujući nove tehničke tekovine.

Usavršavanjem nehrđajućih čelika, otpornih i prema kiselinama, njihova primjena je proširena te su se pokazali kao pogodnija zamjena za neke druge materijale kao npr. keramički materijal, guma, staklo i sl.

Usvajanjem i razvojem mnogih novih postupaka omogućena je upotreba [1].

2. TEHNIČKE ZNAČAJKE AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Čelik postaje otporan prema koroziji ako sadrži najmanje 12,5% kroma, kao glavnog i osnovnog nosioca otpornosti prema koroziji i visokim temperaturama. Čelici sa ovom količinom kroma imaju najveću otpornost prema koroziji sa sadržajem ugljika do najviše 0,5%. Ukoliko čelik sadrži više od 0,5% ugljika, on djelomično veže za sebe krom, formirajući karbide. Stoga se u osnovnoj masi smanjuje količina slobodnog kroma koja nije dovoljna da formira potrebne količine kromovog zaštitnog površinskog oksidnog sloja.

Čelici koji imaju veći sadržaj ugljika (obično 0,8 do 1,1%) moraju se radi očuvanja korozionske otpornosti, legirati s najmanje 14% kroma.

Antikorozivni čelici su potpuno otporni tj. najotporniji prema predviđenim napadima – nagrizanjima samo u metalno-bijelom obrađenom stanju. Oni nemaju svoju potpunu otpornost prema agresiji ako im je površina prekrivena oksidnim ljkuskama, što je posebno bitno kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Dodatak nikla utječe na promjenu strukture i istovremeno poboljšava mehaničke osobine i otpornost prema kiselinama.

Titan (Ti) i tantal-niobijum (Ta/Nb) stabiliziraju i pojačavaju otpornost čelika prema interkristalnoj koroziji [1].

Metalurške značajke nehrđajućih čelika povezane su s utjecajem legirajućih elemenata na pretvorbu austenita. Ovisno o prisutnim elementima, neki proširuju γ -područje (Ni, Mn, N, Cu), a neki proširuju α -područje (Mo, Nb, Al, V, Si, Ti) stvarajući austenitne, odnosno feritne čelike. Osnovni elementi koji utječu na fazne pretvorbe su: Cr, Ni, C (N), o čemu ovisi i vrsta čelika.

Iz tablice 1. Može se vidjeti usporedba osnovnih fizikalnih svojstava nehrđajućih čelika u usporedbi sa ugljičnim čelicima.

Tablica 1. Fizikalna svojstva nehrđajućih čelika [2]

Svojstvo	Austenitni č.	Feritni č.	Martenzitni č.	Precipitacijski očvrsnuti č.	Ugljični č.
Gustoća (kg/m ³)	7,8 - 8,0	7,8	7,8	7,8	7,8
Toplinska rastezljivost (u području 0-500°C) (10 ⁻⁶ mm ⁻¹ °C ⁻¹)	17,0 - 19,2	11,2 - 12,1	11,6 - 12,1	11,9	11,7
Modul elastičnosti (GPa)	193 - 200	200	200	200	200
Toplinska provodljivost kod 100°C (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	18,7 - 22,8	24,4 - 26,3	28,7	21,8 - 23,0	60
Specifična toplina (0-100°C) (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	460 - 500	460 - 500	420 - 460	420 - 460	480
Električna otpornost (10 ⁻⁸ Ω)	69 - 102	59 - 67	55 - 72	77 - 102	12
Područje taljenja (°C)	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1400-1440	1538

Uočavamo kako nehrđajući čelici imaju veće vrijednosti toplinskog rastezanja, električnog otpora i nižu toplinsku provodljivost.

Iz toga proizlaze i nužne mjere opreza pri zavarivanju. Tijekom samog zavarivanja treba strogo kontrolirati deformacije. Niža toplinska provodljivost ukazuje da je tijekom njihova zavarivanja nužan manji unos topline nego kod ugljičnih čelika. Zbog više električne otpornosti ovih čelika koristi se niža struja tijekom elektrootpornog zavarivanja.

Mikrostruktura austenitnih čelika je, od solidusa do ispod sobne temperature, austenitna, bez mogućnosti mijenjanja toplinskog obradom (nema mogućnosti usitnjavanja zrna).

Iz tablice 1. se vidi da ovi čelici imaju za oko 50% niže toplinsko rastezanje i za blizu 30% nižu toplinsku provodljivost od feritnih čelika.

Iz toga proizlazi zaključak da se tijekom zavarivanja mogu očekivati veće napetosti i deformacije nego kod feritnih čelika.

Ovi čelici imaju odličnu plastičnost (A₅=30-50%), vrlo visoku žilavost (čak i kod kriogenih uvjeta), zadovoljavajuću čvrstoću, oksidacijsku otpornost kod temperatura iznad 500°C i visoku korozijsku otpornost.

Naglasak je na činjenici da ovi čelici su dobro zavarljivi, nisu skloni porastu zrna u ZUT-u, te nisu skloni krhkosti kod 475°C.

Austenitni čelici mogu biti nestabilizirani, stabilizirani i čelici s niskim sadržajem intersticijskih elemenata.

U tablici 2 su navedeni kemijski sastavi tipičnih valjanih austenitnih čelika prema AISI standardu.

Tablica 2. Austenitni čelici prema AISI standardu [2]

Tip	C ¹ , %	Cr, %	Ni, %	Ostali elementi ^{1,2} , %
201	0,15	16,00-18,00	3,50-5,50	0,25N; 5,50-7,50Mn; 0,06P
202	0,15	17,00-19,00	4,00-6,00	0,25N; 7,50-10,00Mn; 0,06P
301	0,15	16,00-18,00	6,00-8,00	
302	0,15	17,00-19,00	8,00-10,00	
302B	0,15	17,00-19,00	8,00-10,00	2,00-3,00 Si
303	0,15	17,00-19,00	8,00-10,00	0,15 S min.; 0,20P
303 Se	0,15	17,00-19,00	8,00-10,00	0,15 Se, min.
304	0,08	18,00-20,00	8,00-12,00	
304L	0,03	18,00-20,00	8,00-12,00	
305	0,12	17,00-19,00	10,00-13,00	
308	0,08	19,00-21,00	10,00-12,00	
309	0,20	22,00-24,00	12,00-15,00	
309S	0,08	22,00-24,00	12,00-15,00	
310	0,25	24,00-26,00	19,00-22,00	1,50 Si
310S	0,08	24,00-26,00	19,00-22,00	1,50 Si
314	0,25	23,00-26,00	19,00-22,00	1,50-3,00 Si
316	0,08	16,00-18,00	10,00-14,00	2,60-3,00 Mo
316L	0,03	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00-3,00 Mo
317	0,08	18,00-20,00	11,00-15,00	3,00-4,00 Mo
321	0,08	17,00-19,00	9,00-12,00	Ti = 5 x Cmin
347	0,08	17,00-19,00	9,00-13,00	Nb + Ta = 10 x Cmin
17-7PH ³	0,09	16,00-18,00	6,50-7,75	1,00Mn; 0,75-1,50Al
17-10P ³	0,10-0,14	16,50-17,50	9,75-10,75	0,50-1,00Mn; 0,25-0,30P; 0,60Si
17-4PH ³	0,07	15,50-17,50	3,00-5,00	1,00Mn; 3,00-5,00Cu; Nb + Ta=0,15-0,45
15-7Mo ³	0,09	14,00-16,00	6,50-7,75	1,00Mn; 0,04S; 0,75-1,50Al
AM-350 ³	0,08-0,12	16,00-17,00	4,00-5,00	0,50-1,25Mn; 0,50Si; 2,50-2,25Mo; 0,07-0,13N
AM-355 ³	0,10-0,15	15,00-16,00	4,00-5,00	0,50-1,25Mn; 0,50Si; 2,50-3,25Mo; 0,07-0,13N
A-286 ³	0,08	13,50-16,00	24,00-27,00	1,00-2,00Mn; 1,00-1,50Mo; 1,75-2,35Ti; 0,10-0,50V; 0,35Al; 0,04P

Osnovni austenitni čelik je 18/8 CrNi (AISI 302) koji ima visoku otpornost na koroziju u umjerenim agresivnim sredinama, dobra mehanička svojstva i dobru zavarljivost. Glavni nedostatak austenitnih čelika u primjeni je veliko smanjenje otpornosti na točkastu i pukotinsku koroziju u sredinama koje sadrže kloride.

Čelici s većom otpornosti na interkristalnu koroziju (AISI 304L i 321), na točkastu koroziju (AISI 316 i 316L), za otpornost na visokim temperaturama (AISI 309 i 310) su najčešće zastupljeni u Tvornici kompenzatora i zavaruju se svakodnevno.

3. ZAVARIVANJE AUSTENITNIH ČELIKA

Problemi zavarenog spoja austenitnih čelika (kao posljedica nepoštivanja tehnologije zavarivanja) mogu se svesti u tri velike skupine:

- Korozijske pukotine
- Tople pukotine
- Izlučivanje σ -faze

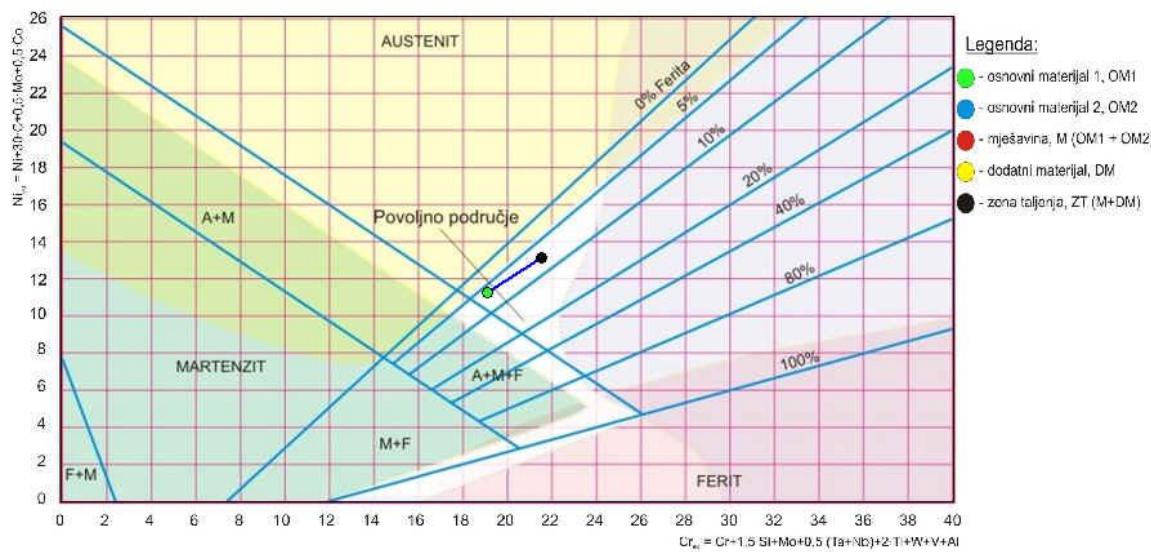
Područje zavarenog spoja ovih čelika može postati osjetljivo na interkristalnu, jamičastu, naponsku, pukotinsku i ostale vrste korozije (kavitacijsku, erozijsku). Osjetljivost ovih čelika na interkristalnu koroziju posljedica je duže izloženosti zavarenog spoja u kritičnom temperaturnom području od 450 do 850°C, gdje na granicama zrna precipitiraju lističasti Cr₂₃C₆ karbidi (94,3% Cr). Budući da u blizini granice zrna dolazi do potrošnje kroma (Cr < 12%) za nastajanje karbida, stvaraju se uvjeti za djelovanje agresivnih medija tijekom eksploatacije, što dovodi do interkristalne korozije.

Čelici čiste austenitne strukture pri skrućivanju su tijekom zavarivanja skloni nastanku toplih pukotina zbog nastajanja spojeva niskog tališta (sulfidi, fosfidi) koji segregiraju pa se u posljednjem stadiju skrućivanja tijekom pojačanog istezanja iniciraju međukristalne tople pukotine.

Pored izbora optimalnih parametara i tehnike zavarivanja djelotvoran način za sprečavanje pojave pukotina je primjena dodatnog materijala koji će u zoni taljenja osigurati 4 – 12% δ -ferita.

S udjelom δ -ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja treba biti oprezan jer on potencira nastajanje krhkog σ -faza kod izlaganja zavarenog spoja na 600 – 900°C.

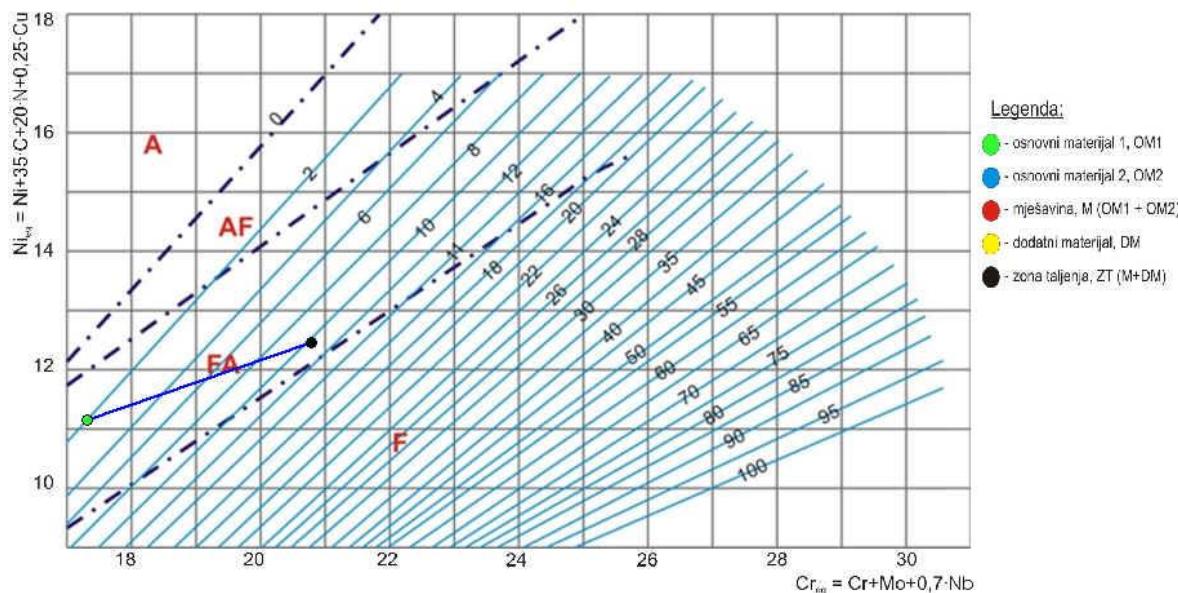
Na slici 1. je vidljiv način provjere izbora dodatnog materijala pomoću Schaefflerovog dijagrama gdje je za potrebe testiranja uzet osnovni materijal AISI 321 i zavaren je uz pomoć dodatnog materijala AISI 316L.



Slika 1. Schaefflerov dijagram probe zavarivanja [4]

Iz dijagrama je vidljivo da odabrani dodatni materijal u kombinaciji s osnovnim materijalom daje povoljne rezultate sa stajališta zavarivanja. Bitno je navesti kako Schaefflerov dijagram služi kao mjera kontrole prije zavarivanja i ne daje stopostotnu sigurnost kako će zavarivanje se izvoditi bez problema.

Udio δ -ferita u kombinaciji AISI 321 i AISI 316L materijala preciznije možemo odrediti iz WRC1992 dijagrama. Iz Schafflerovog dijagrama je vidljivo da udio δ -ferita je ispod 10% dok na slici 2. je vidljivo u WRC1992 dijagramu malo iznad 10% δ -ferita.



Slika 2. WRC1992 dijagram udjela δ -ferita [4]

Izlučivanje karbida odnosno interkristalna korozija može se spriječiti legiranjem elementima koji tvore stabilne karbide (Nb, Ti, Ta), smanjenjem sadržaja ugljika (C<0,03%), gašenjem s 1050 – 1100°C u vodi (karbidi se otope, a brzim hlađenjem 850 – 450°C se izbjegne izlučivanje Cr-karbida po granicama zrna). Također se može ograničiti unos topline, do 15 kJ/cm (bez predgrijavanja, temperatura između prolaza treba biti što niža, naprimjer max. 100°C, korištenje što veće duljine izvlačenja elektrode, a širina gusjenice treba biti $b \leq 2.5xd_e$). Osim navedenog pažnju treba obratiti i na izbjegavanje toplinskih postupaka u temperaturnom području 450 – 500°C što se pogotovo odnosi na toplo oblikovanje.

Predgrijavanje se, prema tome, ne koristi za zavarivanje austenitnih čelika osim kod debljih komada koji se predgrijavaju na 100 – 150°C. Austenitni zavareni spojevi u pravilu e toplinski ne obraduju. Za složene oblike može se koristiti popuštanje naprezanja kod 850 – 950°C ili 400 – 500°C. Za smanjenje osjetljivosti na koroziju zavareni spojevi mogu se žariti na 1050 – 1100°C, uz naglo hlađenje u vodi, nakon čega su ovi čelici najiskoristiviji.

Budući da je toplinska obrada zavarenih spojeva teška, a često i nemoguća, bolje je koristiti stabilizirane austenitne čelike ili čelike s veoma niskim sadržajem ugljika.

Austenitni čelici se mogu zavarivati gotovo svim važnijim postupcima zavarivanja. Sve se površine prije zavarivanja moraju dobro očistiti (odmastiti). Dodatni materijal bira se tako da po kemijskom sastavu odgovara osnovnom materijalu.

Za zavarivanje MIG postupkom koristi se argon čistoće 99,95%, Ar+(1 – 3)%O₂ ili Ar+5%O₂.

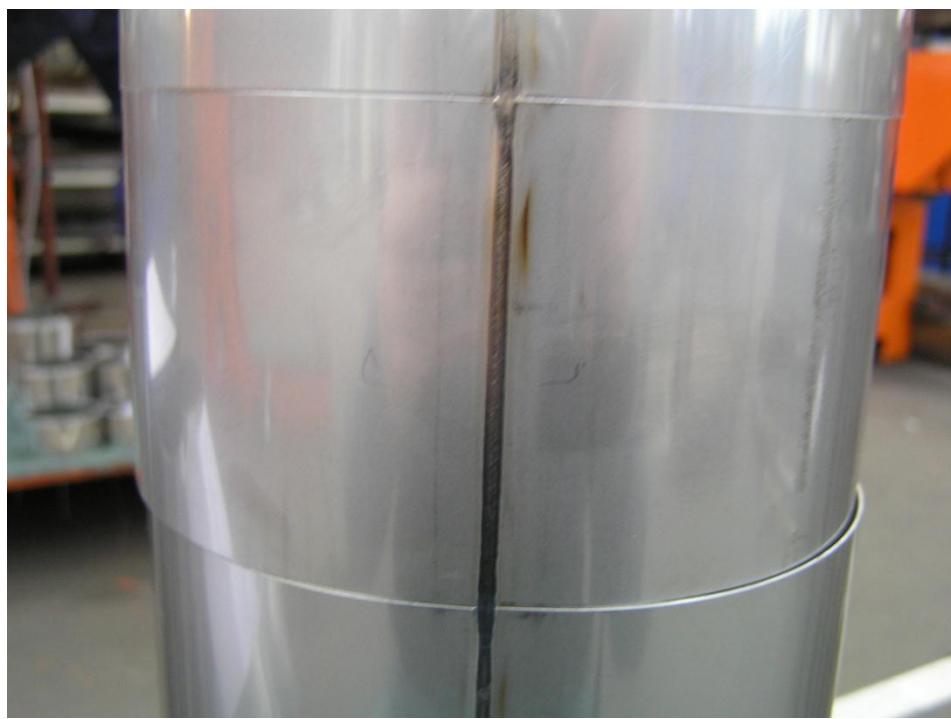
Time se postiže mirniji i stabilniji električni luk uz manje prskanje kapljica metala, što daje bolju kvalitetu zavara. Kod zavarivanja cijevi potrebna je zaštita korijena s argonom.

Lemljenje se uspješno primjenjuje za ove čelike. Termička rezanja kisikom normalno nisu moguća, ali uz pomoć željeznog praha moguće je rezanje kisikom. Bolje je koristiti rezanje plazmom ili laserom [3].

Na slikama 3 i 4 je prikazan karakteristični izgled zavarenog spoja kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika.



Slika 3. Zavareni spoj austenitnih čelika uz upotrebu dodatnog materijala



Slika 4. Zavareni spoj austenitnih čelika bez dodatnog materijala

4. ZAKLJUČAK

Zavarivanje austenitnih čelika je široko područje i teško je iz literature i dostupnih sadržaja odrediti idealne parametre prilikom samog zavarivanja. Adekvatnom pripremom prije samog zavarivanja može se doći do povoljnih rezultata, u teoriji, ali kao što se može vidjeti iz rezultata

upotrebe Schaefflerovog i WRC1992 dijagrama sami rezultati mogu varirati i do nekoliko %. Jako je bitno imati da umu da kod zavarivanja ovih čelika pripremom dobivamo približne rezultate i otprilike se mogu predvidjeti mogući problemi i greške u zavarenom spoju. Dosadašnji iskustveni podaci su dobiveni serijom testiranja parametara stroja, izborom osnovnog materijala, izborom dodatnog materijala te izradom radnim probi koje su podvrgnute testiranju. Tvornica „Đuro Đaković Kompenzatori“ je zbog prirode svoga posla usvojila tehnologije zavarivanja austenitnih čelika i nastoji napredovati u smjeru poboljšanja i dobivanja što boljih rezultata na tome području.

5. LITERATURA

- [1] Bogomir Trifunović., “Specijalni čelici“, Naučna knjiga, Beograd, 1960.,
- [2] Mirko Gojić, “Tehnike spajanja i razdvajanja materijala“, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [3] Lukačević, Z.“ Zavarivanje“, SF, Slavonski Brod,1998.
- [4] “Program zavarivanje“, Strojarski Fakultet, Slavonski Brod.