

Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

Hрман, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:436859>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

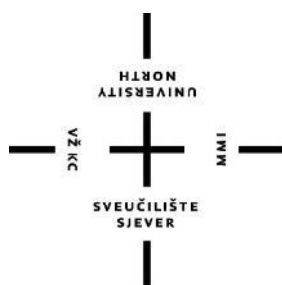
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





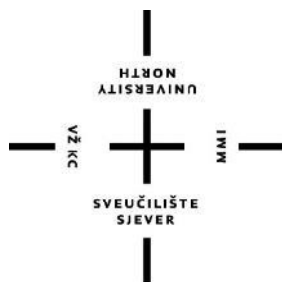
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 376/PS/2022

Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

Dominik Hrman, 1494/336

Varaždin, svibanj 2022. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 376/PS/2022

Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

Student

Dominik Hrman, 1494/336

Mentor

Doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujan 2021. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Dominik Hrman

MATIČNI BROJ 1494/336

DATUM 10.05.2022.

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Filler materials for welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. Marko Horvat, dipl. ing., član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, rezervni član povjerenstva
- 5.

Zadatak završnog rada

BROJ 376/PS/2022

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti vrste i karakteristike nehrđajućih čelika. Detaljno obraditi tehnologije zavarivanja, pripremu prije zavarivanja i obradu nakon zavarivanja nehrđajućih čelika. Potrebno je na temelju dostupnih normi navesti vrste i karakteristike dodatnih materijala za zavarivanje s posebnim naglaskom na praškom punjene žice.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti MAG zavarivanje dostupnog nehrđajućeg čelika korištenjem praškom punjene žice. Opisati cjelokupni postupak i parametre zavarivanja. Na zavarenom spoju provesti analizu geometrije i eventualno nastalih pogrešaka u zavaru. Donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

12. 05. 2022.



M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na pruženoj stručnoj pomoći i savjetima tijekom pisanja završnog rada. Velika hvala i ostalim profesorima koji su mi prenijeli svoje znanje i vještine tijekom studiranja na Sveučilištu Sjever.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na podršci i motivaciji za vrijeme studiranja.

Sažetak

U ovome radu će se obraditi tematika dodatnih materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika. Napravljen je uvod u nehrđajuće čelike te njihov proces zavarivanja, radi boljeg razumijevanja problematike oko odabira dodatnih materijala. Opisani su načini odabira dodatnih materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika prema njihovoj svrsi i učestalosti primjene. Predočeni su brojni primjeri za pojedine situacije. Spomenute su razne vrste dodatnih materijala za zavarivanje. Detaljno su objašnjene elektrode i njihove različite izvedbe kao najzastupljeniji oblik dodatnog materijala kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Uz njih je opisana uloga zaštitnih plinova koji su prisutni u poznatim postupcima zavarivanja. Napomenute su i različite završne obrade zavara radi prevencije korodiranja. Izveden je i eksperimentalni dio u kojem se pomoću MAG postupka zavarivao nehrđajući čelik s praškom punjenom žicom te su navedena zapažanja.

Ključne riječi: nehrđajući čelik, zavarivanje, dodatni materijali, MAG

Summary

This paper will address the topic of welding consumables for welding stainless steels. An introduction has been made to stainless steels and their welding processes in order to better understand the issues surrounding the selection of welding consumables. Methods of selecting welding consumables for welding stainless steels are described according to their purpose and frequency of application. Numerous examples for individual situations are presented. Various types of additional welding materials are mentioned. The electrodes and their different designs are explained in detail as the most common form of welding consumables in the welding of stainless steels. In addition, the role of shielding gases that are present in known welding processes, is described. Various finishing treatments for welds are also mentioned to prevent corrosion. Also, an experiment was performed in which stainless steel was welded with a flux cored wire using the MAG process so the observations were made.

Keywords: stainless steel, welding, welding consumables, MAG

Popis korištenih kratica i oznaka

ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju
EN	Europska norma
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
ZUT	Zona utjecaja topline
AISI	Američki institut za željezo i čelik
IKK	Interkristalna korozija
ZT	Zona taljenja
OM	Osnovni materijal
DM	Dodatni materijal
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštiti inertnog plina
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštiti aktivnog plina
FCAW	Zavarivanje praškom punjenom žicom
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>R_m</i>	MPa	Maksimalna vlačna čvrstoća
<i>R_{p0.2}</i>	MPa	Granica elastičnosti
<i>HB</i>		Tvrdoća u meko-žarenom stanju (po Brinell-u)
<i>A₅</i>	%	Istezljivost
<i>KV</i>	J	Udarni rad loma

Cr_2O_3		krom(III) oksid
Cr		Krom
Ni		Nikal
Mo		Molibden
Si		Silicij
Al		Aluminij
Ti		Titanij
Nb		Niobij
C		Ugljik
N		Dušik
CO_2		Ugljikov dioksid
O_2		Kisik
Sb		Antimon
Pb		Olovo

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Nehrđajući čelici	2
2.1.	Podjela nehrđajućih čelika.....	3
2.1.1.	Feritni nehrđajući čelici	4
2.1.2.	Austenitni nehrđajući čelici	6
2.1.3.	Martenzitni nehrđajući čelici	10
2.1.4.	Dupleks nehrđajući čelici (austenitno-feritni s > 40 % δ ferita).....	11
2.1.5.	Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici	12
3.	Zavarivanje i zavarljivost.....	13
3.1.	Podjela postupaka zavarivanja	14
3.2.	Priprema za zavarivanje nehrđajućih čelika	16
3.3.	Zavarivanje nehrđajućih čelika	17
3.4.	Postupci zavarivanja nehrđajućih čelika	21
3.5.	Česte greške kod zavarivanja nehrđajućih čelika.....	25
4.	Dodatni materijali	27
4.1.	Odabir dodatnog materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika.....	28
4.2.	Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika.....	33
4.2.1.	Obložene elektrode	34
4.2.2.	Zaštitni plin	38
5.	Zaštita od korozije i njena prevencija nakon zavarivanja	40
5.1.	Uzročnici korozije nakon zavarivanja.....	41
5.2.	Završne obrade zavara radi prevencije korodiranja	42
6.	Eksperimentalni dio	44
6.1.	Opis eksperimentalnog rada	44
6.2.	Osnovni i dodatni materijal za zavarivanje	44
6.3.	Oprema korištena u eksperimentalnom radu.....	46
6.3.1.	Aparat za zavarivanje.....	46
6.3.2.	Automat za pravocrtno zavarivanje	48
6.3.3.	Ostala oprema	49
6.4.	Postupak eksperimentalnog rada	50
6.4.1.	Priprema ispitnog uzorka za zavarivanje	50
6.4.2.	Zavarivanje ispitnog uzorka.....	50
6.4.3.	Priprema ispitnog uzorka za promatranje	53
6.4.4.	Zapažanja.....	55
7.	Zaključak.....	57
8.	Literatura.....	59

1. Uvod

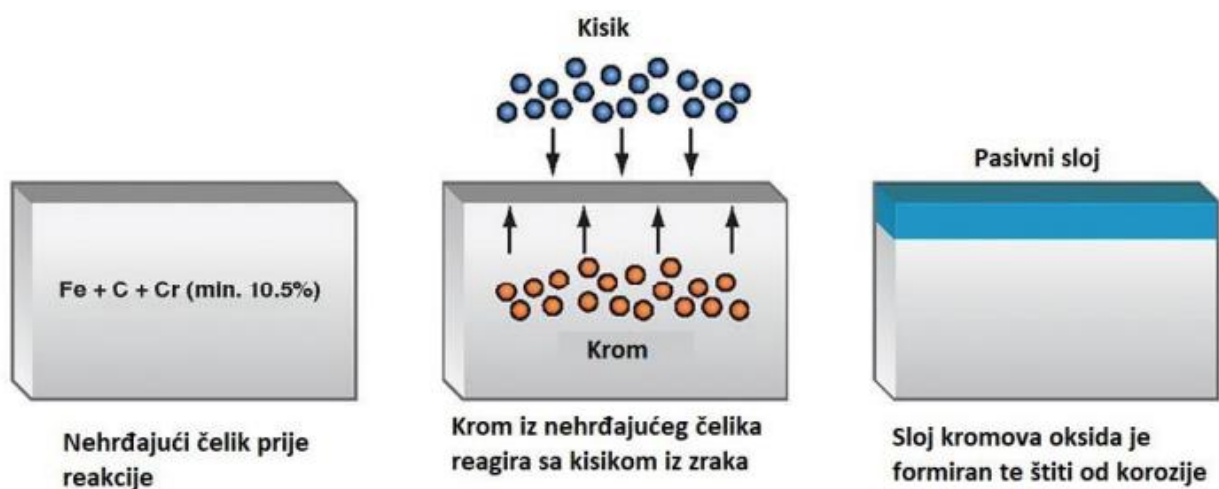
U 21. stoljeću gotovo nema industrije koja nema potrebu za nehrđajućim čelikom. Radi li se samo o dijelovima ili cijelim proizvodima, ovisi o njihovoj namjeni. Kako bi čelik bio potpuno korozijski postojan, mora imati dva uvjeta istovremeno ispunjena. Prvi uvjet je da čelik sadrži barem 12 % kroma i to u čvrstoj otopini. Dakle, nehrđajući čelici moraju sadržavati što viši postotak kroma i što niži postotak ugljika pa tako već postoje i nehrđajući čelici koji sadrže do 30 % kroma. Drugi uvjet za korozijsku postojanost je da ima homogenu monofaznu mikrostrukturu. Kako ne bi došlo od pojave galvanskih članaka, njihova mikrostruktura bi teorijski morala biti potpuno feritna, austenitna ili martenzitna bez oksida, karbida i ostalih intermetalnih faza. [1]

Takva podjela nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi kristalne rešetke je ujedno i najzastupljenija. Njihova zavarljivost ovisi o osnovnom i dodatnom materijalu, dimenzijama dijelova, pripremi spoja, parametrima, režimu i postupku zavarivanja. Pri tim povoljnim uvjetima zavarivanja mora se ostvariti kontinuirani zavareni spoji, koji svojim svojstvima zadovoljava predviđene uvjete i vijek primjene. Ne postoji opća zavarljivosti nekog metala. Za svaki pojedini postupak zavarivanja, prema predviđenoj namjeni proizvoda ili strukture, mora se utvrditi dodatni materijal, vrsta spoja i ostali parametri. Homogenost zavarenog spoja se može narušiti pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, stoga se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. [2]

Točan sastav osnovnih i dodatnih materijala je specificiran s brojnim internacionalnim standardima (ISO, EN, AISI i drugi). Ukoliko su ti standardi prihvaćeni i prevedeni od strane Hrvatskog zavoda za norme dodaje se predmetak HRN. Od nehrđajućih čelika najčešće se primjenjuju i najlakše zavaruju austenitni nehrđajući čelici. Njihova primjena zauzima više od 85 % udjela svih nehrđajućih materijala. Sve više raste i primjena ostalih korozijski postojanih čelika poput dupleks i feritnih čelika. Kod zavarivanja istovrsnih nehrđajućih materijala uglavnom se koriste dodatni materijali jednakog sastava ili koji su više legirani od osnovnog materijala. Preveliko odstupanje u legiranju između osnovnih i dodatnih materijala moglo bi uzrokovati nastajanje galvanske korozije. [3]

2. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelik (tzv. korozijski postojani čelik) prema definiciji europske norme EN 10088-1:2014 sadrži minimalno 10,5 % kroma i maksimalno 1,2 % ugljika u svom sastavu. Ipak, u većini slučajeva komercijalno dostupni nehrđajući čelici sadrže od 13 % do 18 % pa se zbog toga u praksi zahtijeva minimalno 12 % kroma u sastavu kako bi se postigla zadovoljavajuća antikorozivna svojstva. Dodatkom kroma osigurava se mogućnost stvaranja vrlo tankog sloja oksida na površini čelika. Taj proces se naziva pasivizacija. Pasivni sloj je netopljiv, kompaktan te se jako dobro pričvršćuje za podlogu štiteći materijal na kojem se nalazi, a sastoji se uglavnom od oksida Cr_2O_3 (Slika 2.1). [4]

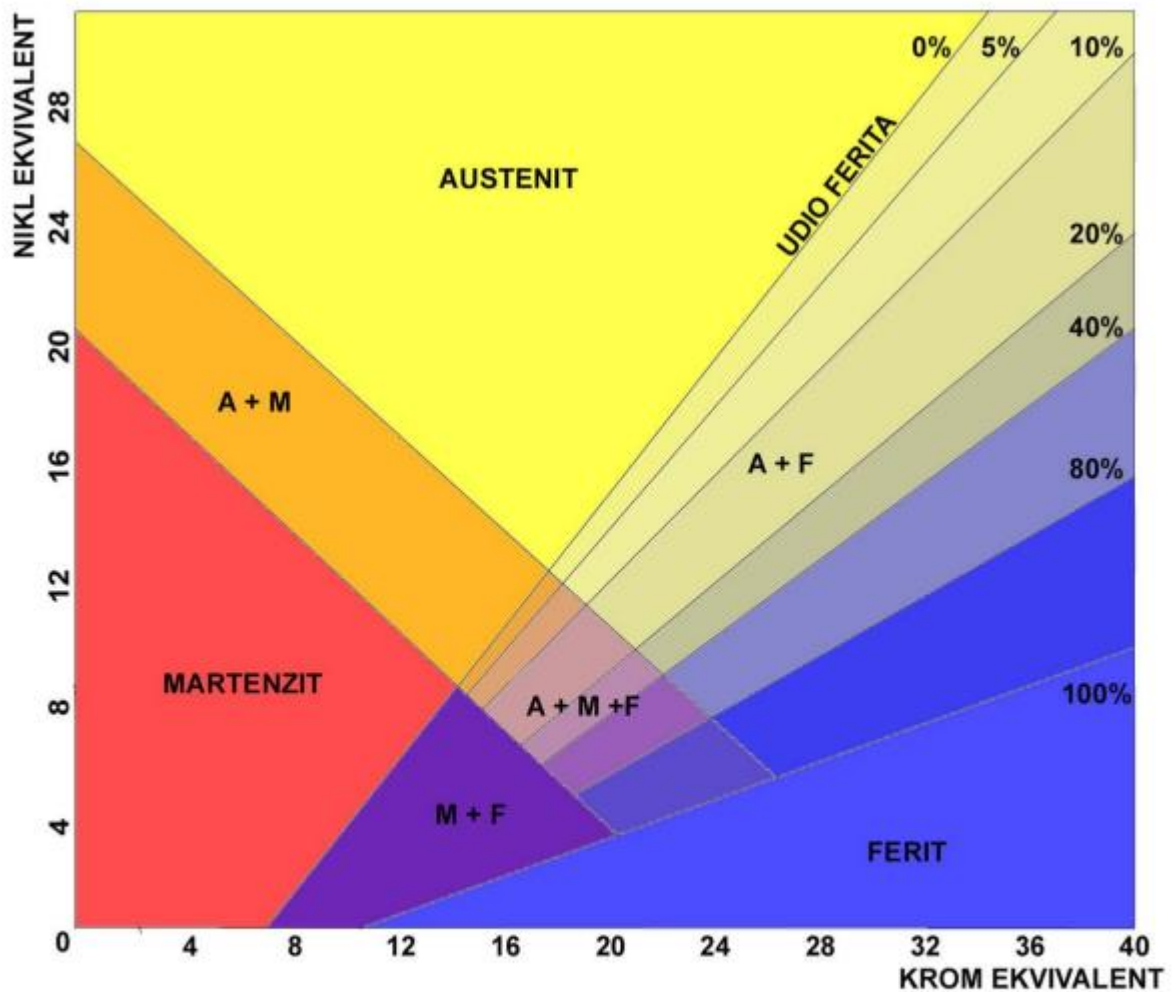


Slika 2.1 Proces pasivizacije [3]

Do stvaranja pasivnog sloja dolazi u neutralnoj oksidirajućoj atmosferi kao što je kontakt sa zrakom. Ako se taj pasivni sloj ogrebe, skine ili mehanički ošteti, opet se pasivno formira na površini materijala te ga dalje štiti od korozije. Osim dodatka kroma, otpornost na koroziju također se može povećati dodatkom drugih legiranih elemenata poput nikla, molibdena i dušika. Dakle, postoje brojne legure nehrđajućih čelika različitih sadržaja pojedinih elemenata s obzirom na njihovu primjenu i ostale zahtjeve.

2.1. Podjela nehrđajućih čelika

Korozivski postojani čelici prema nastaloj mikrostrukтури dijele se na: feritne, austenitne, martenzitne, dupleks (austenitno-feritne) te precipitacijski očvrsnute čelike koji pripadaju zasebnoj skupini visokočvrstih čelika. Na osnovi poznatog kemijskog sastava može se pomoću Schaefflerovog strukturnog dijagrama dobiti dobar uvid u moguću mikrostrukтуру nehrđajućeg čelika. Schaefflerov strukturni dijagram (slika 2.2) pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr ekvivalenta i Ni ekvivalenta. [1]



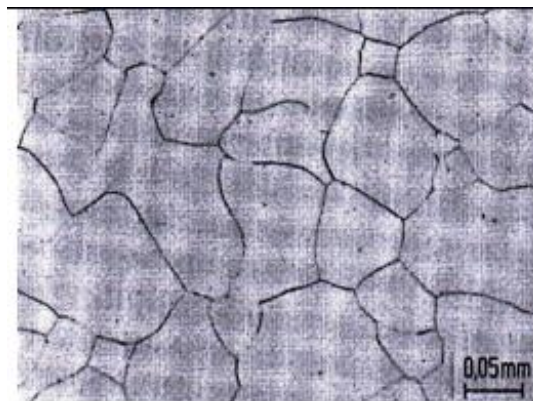
$$\text{KROM EKVIVALENT} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

$$\text{NIKL EKVIVALENT} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$$

Slika 2.2 Schaefflerov strukturni dijagram [3]

2.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno od 11 do 17 % kroma i manje od 0,1 % ugljika, uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata poput Mo, Si, Al, Ti ili Nb. Kako bi se poboljšala strojna obradivost, mogu se dodati sumpor i selen, dok je udio austenitizirajućih elemenata (C, N i Ni) vrlo mali. Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični te ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade zbog nedostatka fazne pretvorbe. Granice razvlačenja feritnih čelika kreću se od 275 do 350 MPa, vlačna čvrstoća od 415 do 585 MPa, dok je duktilnost od 20 do 35 %. Njihova obradivost i upotreba je ograničena zbog slabe čvrstoće i osjetljivosti na senzibilizaciju. Čvrstoća pri povišenim temperaturama im je također slabija nego kod austenitnih čelika. Prednost ovih čelika je u njihovoj otpornosti na koroziju i oksidaciju te su relativno jeftini u usporedbi s drugima, pa se iz tog razloga koriste u uvjetima gdje su izloženi dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Koriste se u postrojenjima gdje postoji otvorena opasnost od pojave napetosne korozije koju ne mogu zadovoljiti austenitni čelici. [3].



Slika 2.3 Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3]

Osnovna svojstva feritnih čelika su:

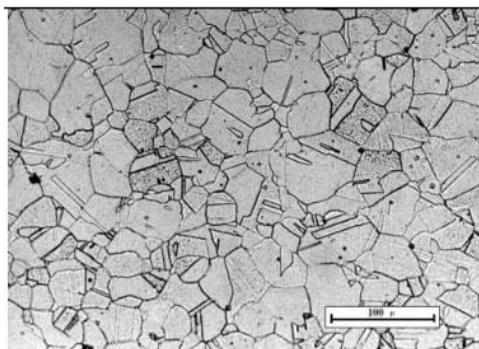
- relativno su mekani
- magnetični su
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900 °C, te opasnosti od krhkosti pri duljem držanju od 350 do 520 °C, kao i zbog mogućeg nastajanja krhke faze (FeCr) pri dugom držanju od 520 °C do 850 °C
- slabo su oblikovljivi deformiranjem
- bolje obradivi odvajanjem čestica od austenitnih čelika
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO₃) i osjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, za razliku od Cr-Ni austenitnih čelika

- manje su postojani prema kloridnim otopinama (morska voda)
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama
- umjereno su postojani na pojavu jamičastog oštećenja ako sadrže Mo
- nisu otporni na rastaljene metale (Al, Sb i Pb), soli i reducirajuće medije
- niže su cijene od ostalih nehrđajućih čelika
- skloni su lomljivosti pri niskim temperaturama. [3]

Primjer pojedinih sastava i svojstva nekih vrsta feritnih čelika vidljivi su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Primjer pojedinih vrsta feritnih nehrđajućih čelika [3]

Oznaka čelika prema EN	Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva u žarenom stanju			Posebna otpornost i primjeri primjene
		R_m , MPa	$R_{p0.2}$, min MPa	A_5 , min, %	
X6Cr17	/	450...600	270	20	korozijski postojan pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji
X6CrMo17	1,1 Mo	450...650	270	20	posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline za automobilske dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora
X8CrTi17	0,7 Ti	450...650	270	20	kao X6Cr17, otporniji na rast zrna za zavarene dijelove kućanskih aparata, sita i okvire
X8CrNb17	0,9 Nb	450...650	270	20	dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove)
X8CrMoTi17	1,75 Mo 0,65 Ti	450...650	300	20	za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća. Nije za udarni rad.
X12CrMoTi25	2,5 Mo 1,8 Ti	650...750	450	12	za otopine s visokim udjelom slobodnog klora
X12CrMoS17	0,25 Mo 0,20 S	700...850	550	12	za obradu odvajanjem čestica na automatima: vijke, matice, zakovice, male zupčanike, male osovine



Slika 2.5 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [3]

Karakteristična svojstva austenitnih nehrđajućih čelika:

- nemagnetični su
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna
- odlična plastičnost, nisko naprezanje tečenja (185 – 225 MPa)
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika
- dobra svojstva pri niskim temperaturama
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600 °C
- visoka žilavost, oksidacijska i korozivna otpornost
- visok odnos čvrstoća/masa
- postojana austenitna struktura od solidus temperature do ispod sobne temperature
- kubično plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) koja osigurava visoku deformabilnost
- nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja
- visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura
- dodavanjem Cr više od 18 % općenito se povećava otpornost prema koroziji
- titan i niobij - niski sadržaj ugljika (do 0,03 %) što sprječava interkristalnu koroziju
- koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50 % veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja
- specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo
- koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja
- za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj koroziji u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji. [6]

Zbog tih karakteristika su najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije. Osnovnim austenitnim nehrđajućim čelikom smatra se X5CrNi18-10 (AISI 304). Od navedenog austenitnog čelika razvile su se nove legure. Razvoj legura bazira se na dodavanju molibdena i dušika radi bolje korozijske postojanosti i otpornosti na oksidaciju. Mogućnost pojave senzibilizacije prilikom postupka zavarivanja umanjuje njihovu upotrebu jer može doći do pojave interkristalne korozije, fenomena koji se na zavarenim konstrukcijama javljao često u početnom razdoblju korištenja ovih materijala, te je ograničavao njegovu širu primjenu. Senzibilizacija se može izbjeći odabirom stabiliziranih čelika niskog sadržaja ugljika. Također, ovi materijali često su podložni i ostalim lokalnim korozijskim fenomenima poput rupičaste, napetosne ili korozije u procjepu, pa treba pažljivo izvršiti odabir pojedine vrste austenitnog nehrđajućeg čelika. Iz tog razloga se preferira X2CrNi18-9 (AISI 304L) austenitni nehrđajući čelik kada je u pitanju zavarivanje većih područja, te nema mogućnosti naknadnog prokaljenja nakon zavarivanja. [7]

Zahtjevi kemijskog sastava austenitnog nehrđajućeg čelika su:

- maseni udio ugljika što manji ($< 0,15\%$ C) kako bi bila što manja opasnost od stvaranja karbida
- maseni udio Cr što viši ($> 18\%$) radi uvjeta antikorozivnosti
- maseni udio Ni što viši ($> 8\%$) da se omogući nastanak austenitne mikrostrukture (Ni je γ -geni element, mora prevladati djelovanje Cr koji je α -geni)
- moguće legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta jer pospješuju pojavu ferita ili djeluju stabilizirajuće kod opasnosti od interkristalne korozije
- povišen maseni udio N ($0,2 - 0,4\%$) jer pospješuje povišenje čvrstoće i otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju. [1]

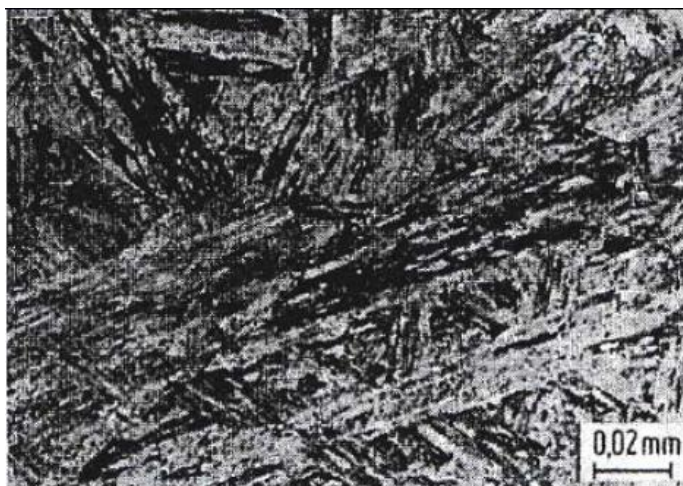
Tipični primjeri austenitnih čelika i njihova svojstva prikazana su u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Primjeri austenitnih čelika i njihova svojstva [7]

Oznaka čelika prema EN	Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
		R_m , MPa	$R_{p0,2}$, MPa	HB	A_5 , %	KV , J	
X12CrNi18-8	/	700	215	180	50	85	Standardni tip čelika -predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama, ortopediji. Primjenjiv je do 300°C.
X5CrNi18-9	/	700	185	180	50	85	Otporan na različite organske i anorganske kiseline - industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X10CrNiTi18-9	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez toplinske obradbe nakon zavarivanja, -mljekarstvo, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrija filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450°C.
X5CrNiNb18-9	0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu.
X5CrNiMo18-10	2,25 Mo	700	205	180	45	85	Otporan prema neoksidirajućim kiselinama i prema točkastoj koroziji uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez topl. obradbe. -industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i pivovare
X10CrNiMoTi18-10	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, topl. obradba nakon zavarivanja nepotrebna. -industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju

2.1.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici imaju od 0,20 % C do 1,0 % C, iznad 13 % Cr do 18 % Cr, te mogu sadržavati i do 1,3 % Mb i 2,5 % Ni. Kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem postižu se optimalna mehanička svojstva uz korozijsku postojanost. Alotropskom modifikacijom austenita postiže se martenzitna mikrostruktura. Mikrostruktura se sastoji od ferita i karbida (Slika 2.6). Martenzitni čelici kristaliziraju iz taline u δ -ferit, a zatim pri hlađenju prelaze u austenit, koji daljnjim hlađenjem prelazi u martenzit.



Slika 2.6 Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [3]

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtijeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili vakuumu zbog opasnosti od oksidacije. Što je viši % C i % Cr to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu zbog zakaljivosti i što više kroma zbog korozijske postojanosti. [8]

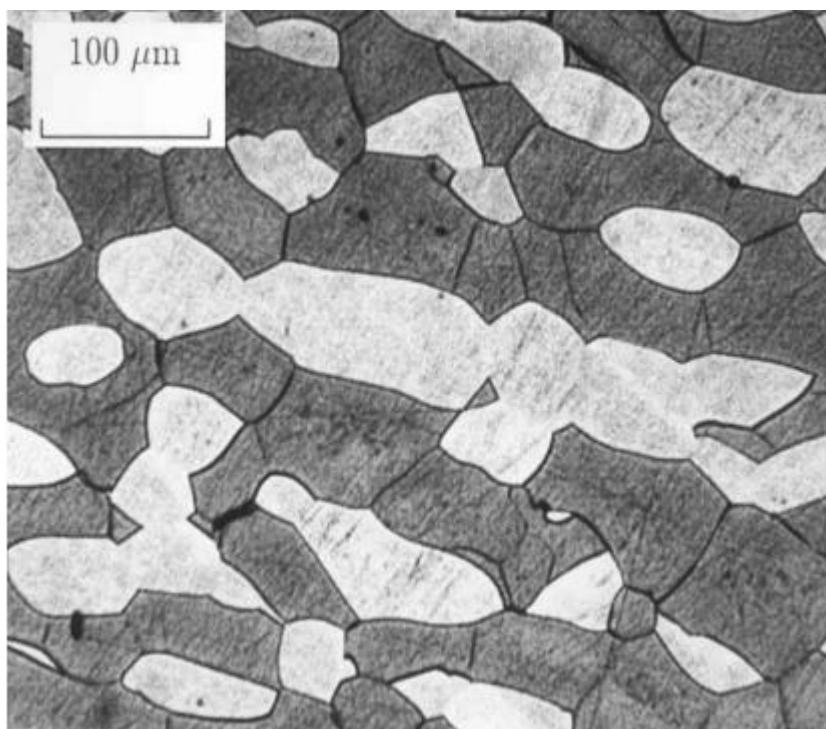
Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika:

- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnoj okolini
- imaju lošu otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje
- mogu se kaliti jer imaju transformaciju $\gamma - \alpha$
- imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama
- obično se koriste u poboljšanom stanju.

2.1.4. Dupleks nehrđajući čelici (austenitno-feritni s > 40 % δ ferita)

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu s 40 - 60 % ferita. Čelik s 22 - 24 % kroma i 6 - 8 % nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan na okvirno 1000 °C sastojat će se od ferita i austenita. Zbog toga se odstupa od nužnog uvjeta na opću koroziju, ali je povećana otpornost na rupičastu i napetosnu koroziju. [3]

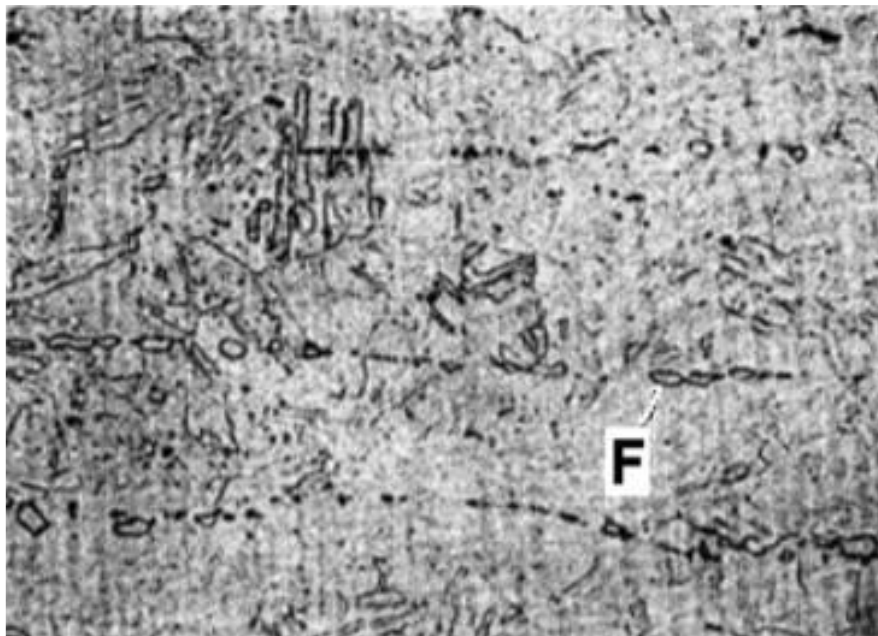
Kad su prisutni i ostali legirajući elementi tada vrijedi da dodatak molibdena, silicija, titana i niobija djeluje slično kao porast sadržaja kroma, dok dodatak mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000 °C poraste udio ferita, a smanjuje se udio austenita. Radi toga čelik s 22 % kroma i 8 % nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. Česta potreba legiranja dupleks čelika javlja se zbog održavanja dovoljno visokog udjela austenita, što je posebice važno tijekom zavarivanja (u ZT zavarenog spoja). Previsoki udio ferita može uzrokovati pojavu korozije te povećanje krhkosti. Sniženi udio nikla u dupleks čelicima (u odnosu na čelik 1.4301) potrebno je nadomjestiti dodatkom dušika ili mangana. Omjer austenita i ferita ovisi i o temperaturi toplinske obrade. Pri temperaturi gašenja ispod 1050 °C zaostaje dio neotopljene sigma faze. Budući da iznad 1100 °C dolazi do znatnog porasta sadržaja ferita, dupleks čelici se uglavnom ne zagrijavaju iznad 1100 °C. [9]



Slika 2.7 Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [3]

2.1.5. Precipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici

Precipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici dijele se na tri vrste: austenitne, poluaustenitne i martenzitne. Kako bi se postigla željena svojstva mora se osigurati nastanak potrebnih faza i precipitata te je potrebna optimalna ravnoteža kemijskog sastava. Elementi poput aluminija, bakra, titana i molibdena se dodaju kako bi došlo do reakcije precipitacijskog očvrtnuća. Precipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici imaju slična ili bolja mehanička svojstva od martenzitnih nehrđajućih čelika i korozivnu postojanost koja je slična austenitnom nehrđajućem čeliku 1.4301. Pri primjeni ove vrste nehrđajućih čelika moraju se dopustiti sve vrste toplinske obrade i postupaka zavarivanja koji su potrebni za razvoj i zadržavanje svojstava. Toplinska obrada potrebna za precipitacijsko očvrtnuće ovisi o vrsti legure. [6]

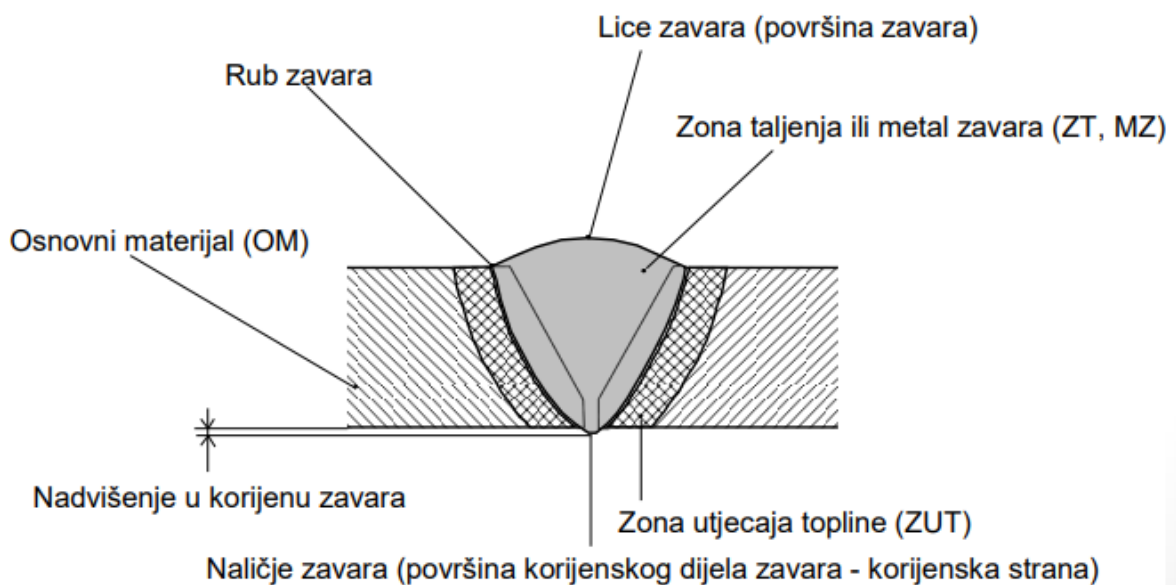


Slika 2.8 Mikrostruktura precipitacijski očvrtnutog nehrđajućeg čelika [3]

3. Zavarivanje i zavarljivost

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala. Zavarivanjem se mogu spajati metalni i nemetalni materijali. Metal se smatra zavarljivim kada primjenom određenog postupka zavarivanja dobivamo kontinuirani, homogeni zavareni spoj koji zadovoljava predviđene zahtjeve i koji ima zahtijevana mehanička i druga potrebna svojstva. Tijekom zavarivanja se zona spoja dovodi u tekuće ili plastično stanje. Zavareni spoj je nerastavljiv. [10]

Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja i zone utjecaja topline. Zona taljenja je dio zavarenog spoja koji se tijekom zavarivanja tali, i u kojem dolazi do kristalizacije i skrućivanja. Sastoji se od osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline je dio osnovnog materijala u kojem je došlo do promjene kristalne strukture utjecajem topline unesene zavarivanjem. Širina zone utjecaja topline ovisi o unosu topline, a najčešće je 2-8 mm (Slika 3.1). [2]



Slika 3.1 Prikaz zavarenog spoja i njegovih dijelova [2]

Zavarljivost može biti:

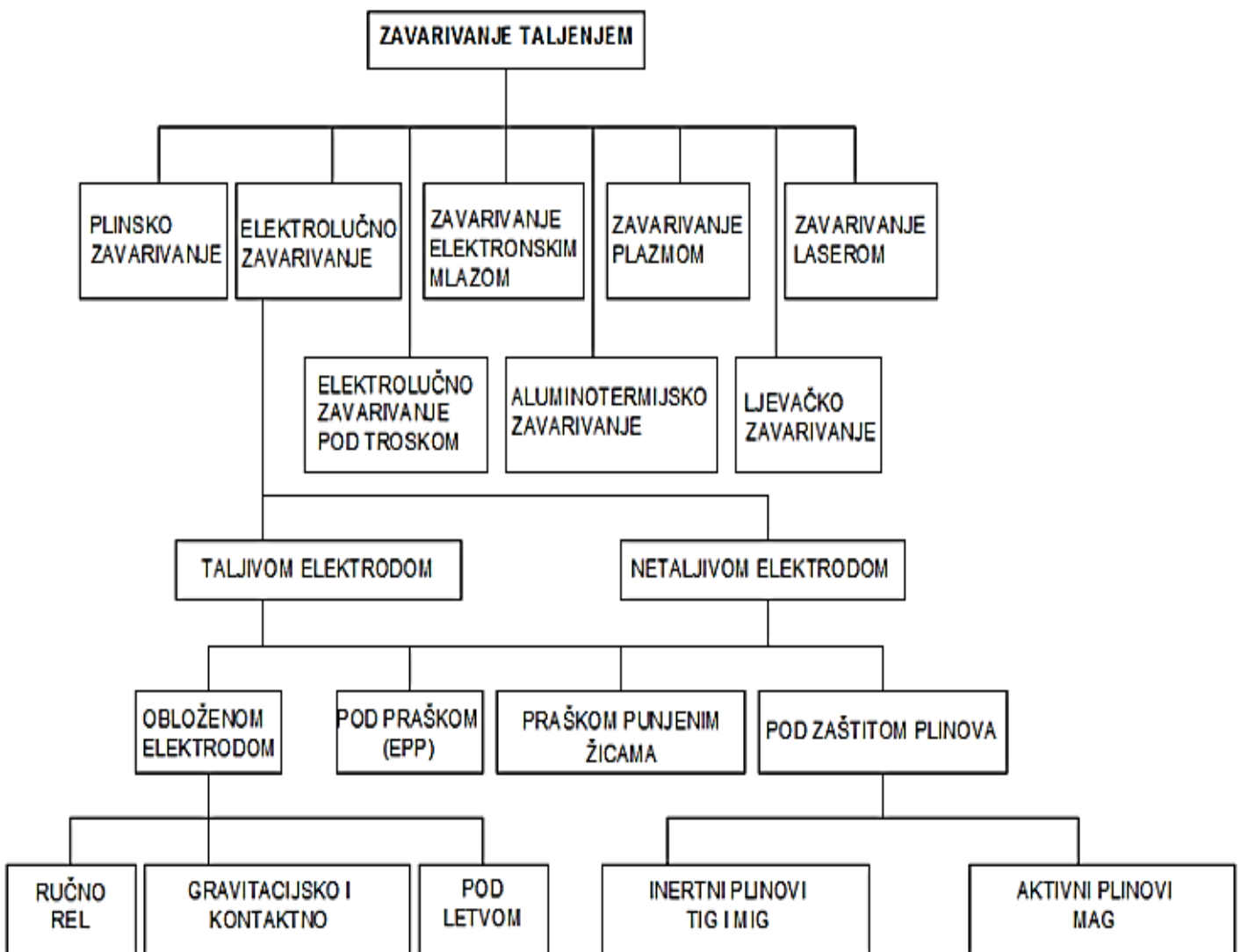
- Dobra – ako se može zavarivati bez specijalnih predradnji i mjera opreza
- Slaba – ako su potrebne specijalne predradnje i mjere opreza (npr. predgrijavanje zbog mogućnosti nastanka pukotina)
- Jako slaba – ako su potrebne takve predradnje i mjere opreza da praktički nije moguće izvesti zavarivanje koje bi bilo ekonomski prihvatljivo

3.1. Podjela postupaka zavarivanja

Postupke zavarivanja razlikujemo prema načinu spajanja:

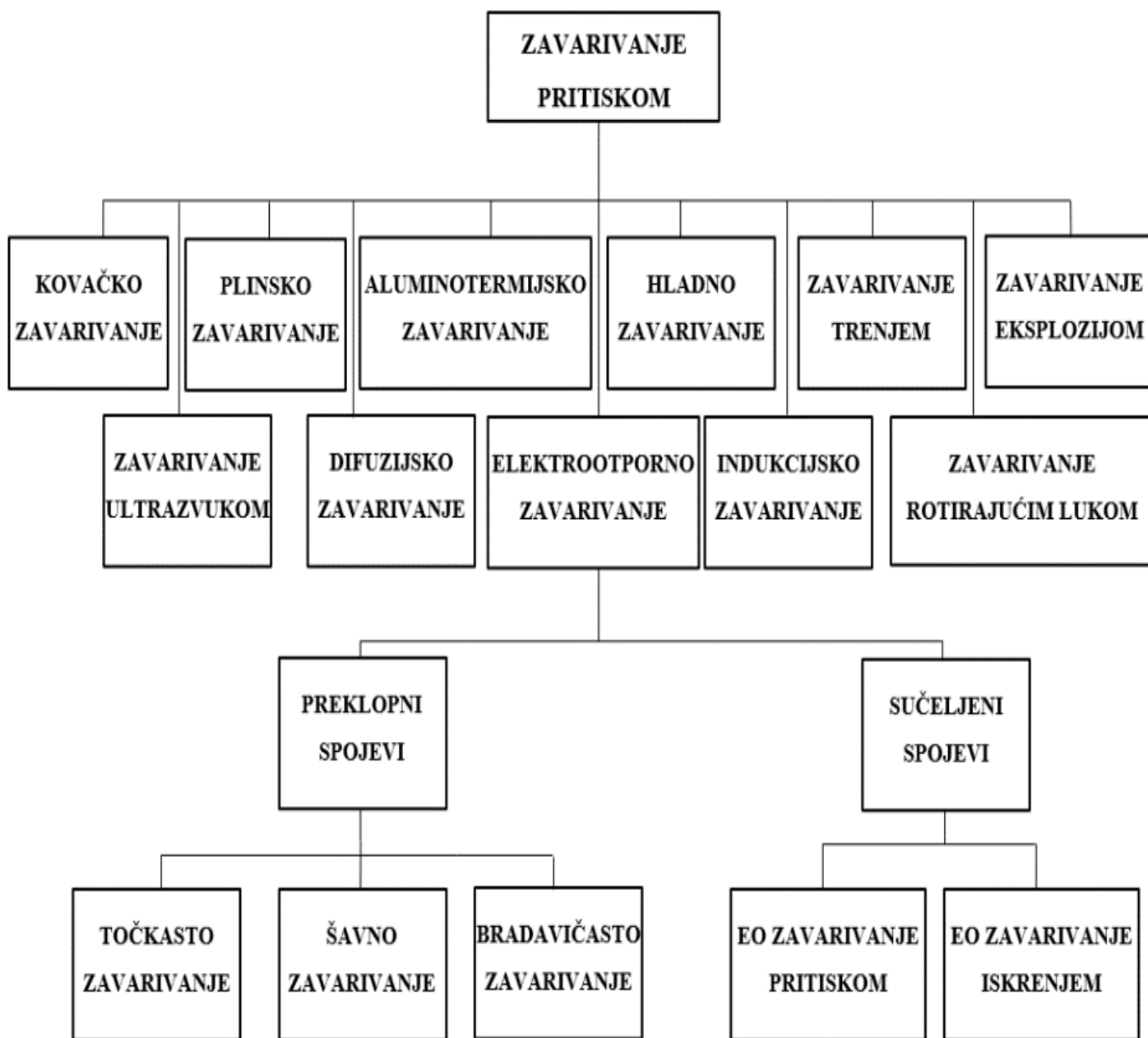
- zavarivanje taljenjem (Slika 3.2)
- zavarivanje pritiskom (Slika 3.3).

Zavarivanje taljenjem je zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega. Kod zavarivanja taljenjem koristi se toplinska energija za ostvarivanje spoja.



Slika 3.2 Zavarivanje taljenjem [11]

Zavarivanje pritiskom je zavarivanje materijala u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja pomoću pritiska ili udarca. Za ostvarivanje spoja koristi se toplinsko-mehanička ili mehanička energija.



Slika 3.3 Zavarivanje pritiskom [11]

3.2. Priprema za zavarivanje nehrđajućih čelika

Prilikom zavarivanja nehrđajućeg čelika od velike važnosti je čistoća površine i njezina priprema. Zbog velike osjetljivosti na druge ugljične čelike, alati poput čekića i četki moraju se koristiti samo na nehrđajućim čelicima. Bilokakvi tragovi ugljičnog čelika koji završe u zavaru nehrđajućeg čelika će izazvati koroziju. Također, brušenje ugljičnog čelika u blizini nehrđajućeg čelika može izazvati koroziju. Prašina ugljičnog čelika može sletjeti na površine nehrđajućeg čelika i dovesti do korozije, te se zbog takvih slučajeva radni prostori ugljičnog i nehrđajućeg čelika trebaju držati odvojenim.

Drugi važni faktor kod pripreme za zavarivanje je biranje odgovarajućeg dodatnog materijala za zavarivanje, što znači da se mora znati koja vrsta osnovnog materijala se zavaruje. U mnogim slučajevima koristi se dodatni materijal sa istom oznakom kao i osnovni.

Brušenje je potrebno izvesti abrazivnim alatom bez prisustva željeza. Četkanje se vrši četkama od nehrđajućeg čelika. Brusni diskovi, listovi pile, turpije, žičane četke ili alati za rezanje koji su se koristili za ugljične čelike ne smiju se koristiti na nehrđajućim čelicima. Dimenzije profila utora moraju se održavati kako je navedeno u normama. Površinski oksidi moraju se ukloniti mehaničkim metodama, kemijskim čišćenjem ili na neki drugi način. Površine moraju biti čiste i bez površinskih oksida, organskih onečišćenja, diskontinuiteta boje i materijala koji bi mogli utjecati na kvalitetu zavara. Usklađenost s ovim zahtjevima čistoće od najveće je važnosti za zavarivanje nehrđajućeg čelika.

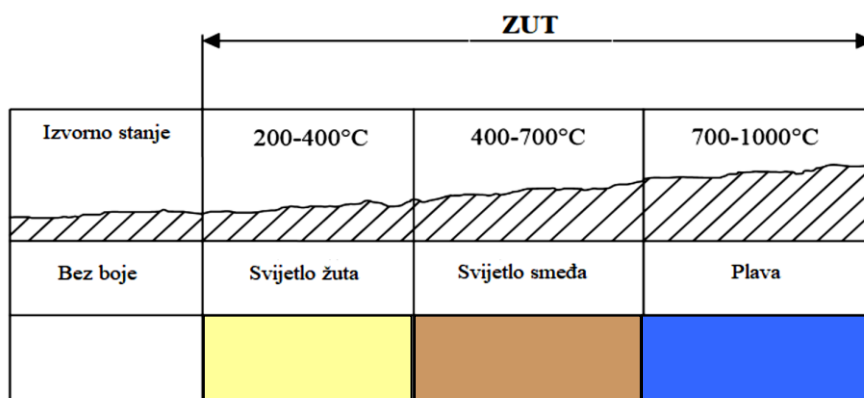
Također, vrlo je bitno pratiti temperaturu osnovnog i dodatnog materijala. Ukoliko se ne uspije ostati unutar potrebnih temperaturnih parametara, moguće su pojave raznih problema zbog kvalitete zavarenog spoja.



Slika 3.4 Primjer oksidacije [10]

3.3. Zavarivanje nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici se mogu zavarivati koristeći izmjeničnu i istosmjernu struju, primjenom što kraćeg električnog luka. Unos topline treba biti ograničen jer može utjecati na korozijsku otpornost i dovesti do izobličenja materijala. Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika dolazi do obojenosti zavara i područja oko zavara zbog oksidacije. Stvara se debeli sloj kromovog oksida koji uzrokuje osiromašenje površine kromom, te iz tog razloga dolazi do nastanka korozije. Kod viših temperatura dolazi do stvaranja debljeg sloja oksida. Otpornost na koroziju i debljina oksidnog sloja ne mogu se direktno izmjeriti, no mogu se okvirno pretpostaviti. Što je sloj oksida deblji, to je boja tamnija (Slika 3.5). Do debljine od 20 nm oksidni sloj ima metalni sjaj. Pasivni krom-oksidni sloj na površini nastaje sam nakon približno šest tjedana. Kako bi se sa zavarenih dijelova nakon zavarivanja uklonila troska i srh s materijala, te očuvala korozijska postojanost, potrebno ga je jetkati i pasivirati s posebnim kemikalijama pripremljenim za tu svrhu. [1]



Slika 3.5 Okvirni prikaz promjene boje oksidnog sloja povećanjem temperature [12]

Pojedinačne karakteristike i svojstva nehrđajućih čelika vidljiva su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Karakteristike i svojstva nehrđajućih čelika [12]

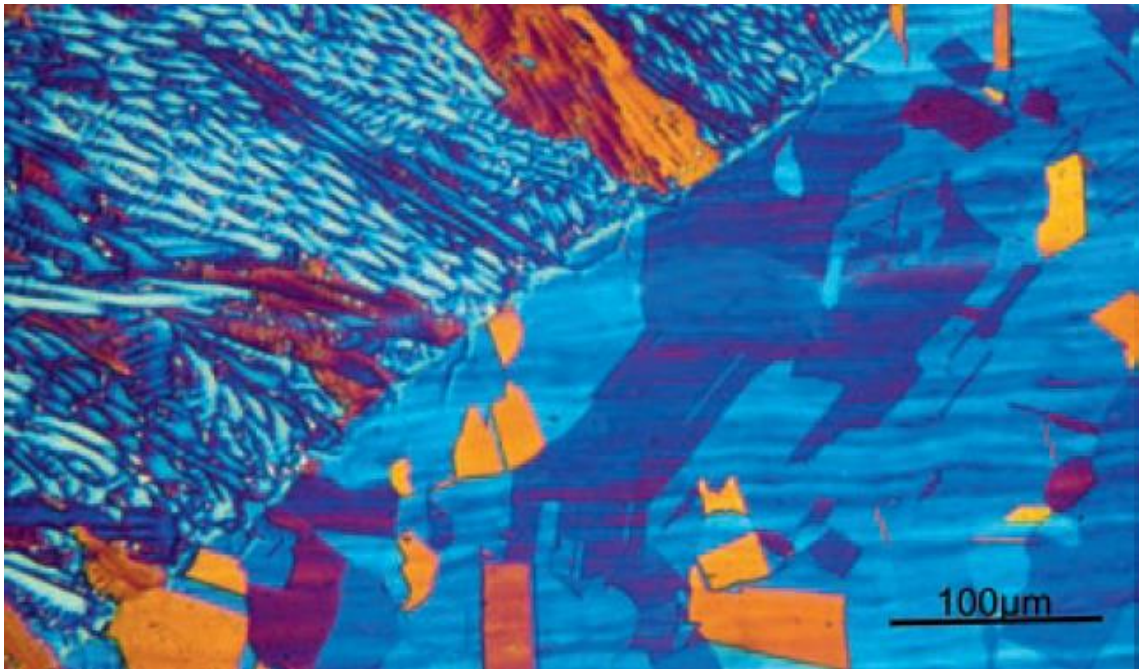
	FERITNI	AUSTENITNI	MARTENZITNI	DUPLEKS	PRECIPITACIJSKI OČVRSNUTI
MAGNETNA SVOJSTVA	da	ne	Da	Da	da
ZAVARLJIVOST	niska	vrlo visoka	niska	visoka	visoka
OTPORNOST VISOKIM TEMP.	visoka	vrlo visoka	niska	niska	niska
OTPORNOST NISKIM TEMP.	niska	vrlo visoka	niska	srednja	niska
DUKTILNOST	srednja	vrlo visoka	niska	srednja	srednja
KOROZIJSKA POSTOJANOST	srednja	visoka	srednja	vrlo visoka	srednja

Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika je ograničena zbog izrazite sklonosti prema pogrubljenju strukture, što dodatno može dovesti do ubrzanijeg izlučivanja krhkih intermetalnih faza (npr. sigma faza) u području visokotemperaturnog dijela zone utjecaja topline. Nešto bolja zavarljivost, kao i poboljšana korozijska postojanost, dobiveni su kod tzv. superferitnih čelika. Superferitni čelici osim povišenog udjela kroma (19 – 30 %) te dodatnog legiranja molibdenom, imaju vrlo niski udjel ugljika i dušika ($C + N < 0,01 - 0,02 \%$). [5]



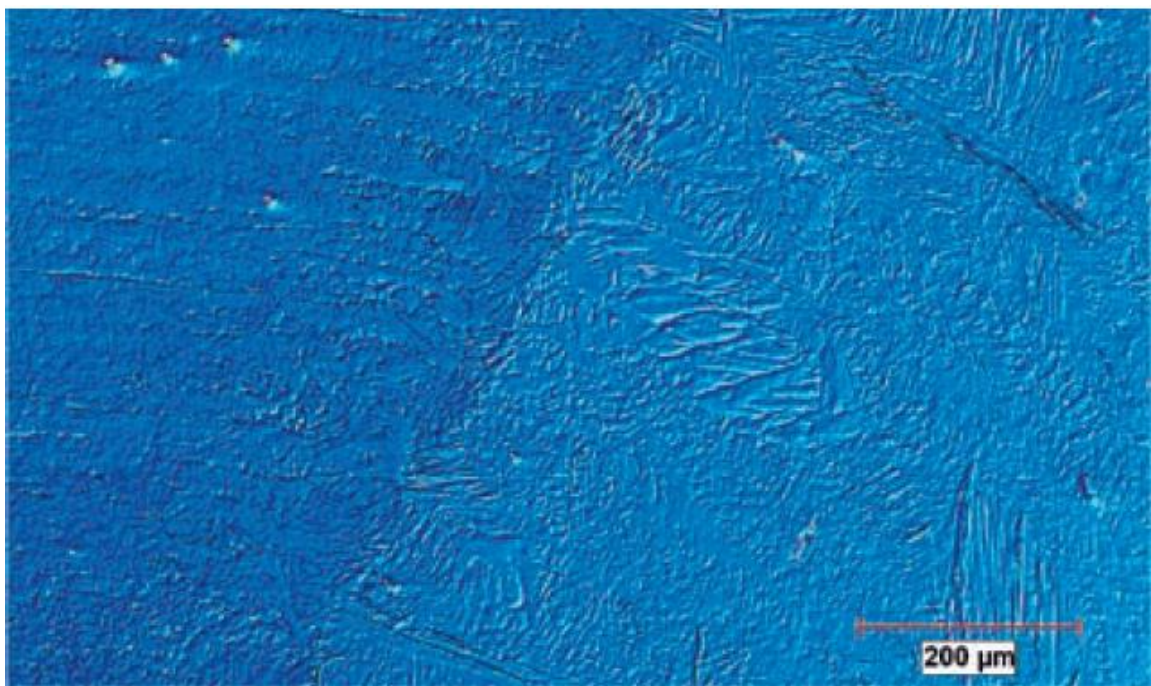
Slika 3.6 Mikrostruktura zavara feritnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]

Austenitni čelici imaju dobru zavarljivost uz iznimku čelika koji sadrže sumpor ili selen, kao čelici za strojnu obradu. Nema potrebe za predgrijavanjem prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost pojave senzibilizacije, tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 - 850 °C što može dovesti do pojave interkristalne korozije. Zavarljivost ovih konstrukcijskih materijala traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću prema deformacijama kao posljedica zavarivanja. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara koje nastaju kao posljedica nečistoća u materijalu te uslijed izražene sklonosti deformacijama, odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala (4 - 12 % delta ferita) te samom tehnikom kao i ostalim uvjetima zavarivanja. [5]



Slika 3.7 Mikrostruktura zavara austenitnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]

Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika zahtijeva toplinske postupke prije (predgrijavanje 200 - 300 °C) i poslije postupka zavarivanja (popuštanje 700 - 750 °C) zbog svojstva zakaljivosti na zraku. Za zavarivanje se koriste dodatni materijali isti ili slični osnovnom materijalu ili se koriste austenitni dodatni materijali. Za izradu zavarenih konstrukcija rabe se čelici s manje od 0,15 % C. [5]



Slika 3.8 Mikrostruktura zavara martenzitnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]

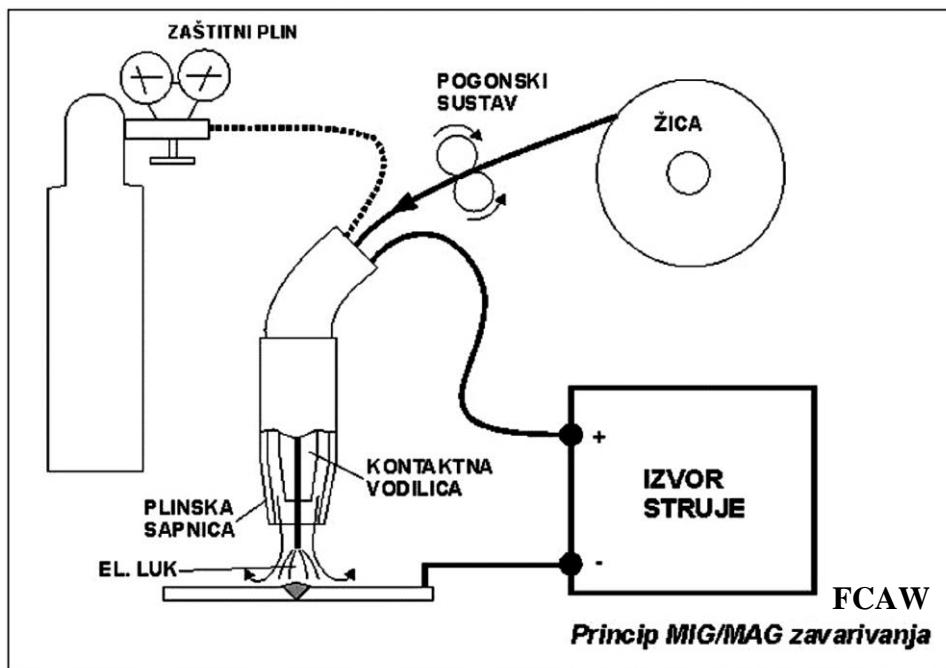
Za zadržavanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje dupleks čelika, a legirani su s nekoliko postotaka nikla više u odnosu na dodatni materijal. Mnogi rezultati su postignuti u izučavanju utjecaja zaštitnih plinova kod zavarivanja dupleks čelika. Ukoliko se u zaštitni plin dodaje dušik, utvrđen je pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture. Feritizacija koja je posljedica zavarivanja, u svakom slučaju djeluje štetno, jer povećani udjel feritne strukture (do 80 % i više) dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom pojasu, do smanjenja korozijske postojanosti i ostalih problema. Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja kod dupleks čelika. Zavarivanje je nužno izvoditi pri kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline i parametara zavarivanja. [5]



Slika 3.9 Mikrostruktura zavara dupleks čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]

3.4. Postupci zavarivanja nehrđajućih čelika

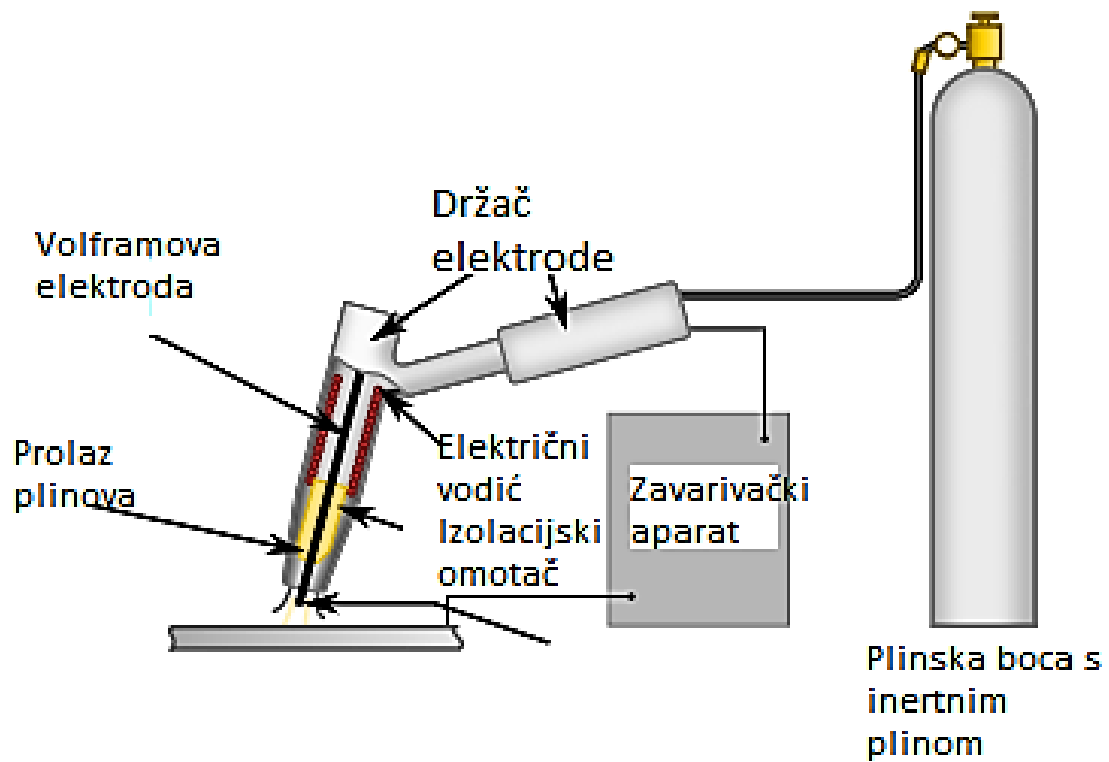
Za zavarivanje nehrđajućih čelika od metoda zavarivanja spajanjem koriste se REL, MIG, MAG, FCAW (zavarivanje praškom punjenom žicom), TIG, plazma zavarivanje, EPP i lasersko zavarivanje. Od metoda zavarivanja pritiskom koriste se elektrootporno točkasto, šavno i visokofrekventno zavarivanje.



Slika 3.10 Shematski prikaz MIG/MAG postupka i zavarivanja praškom punjenom žicom [4]



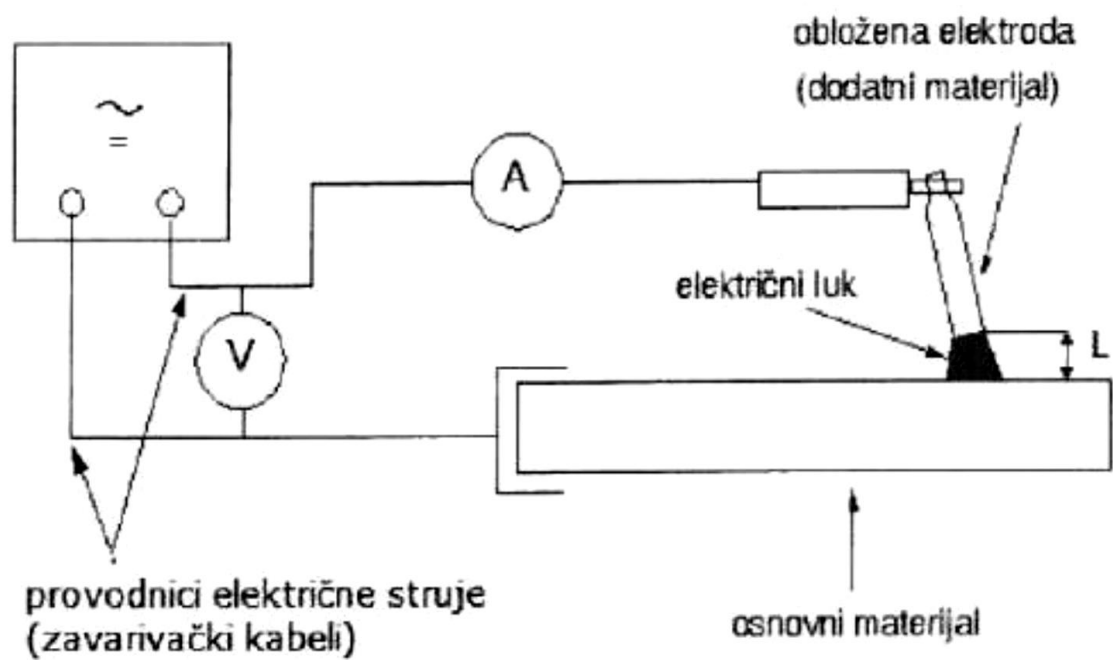
Slika 3.11 Klupa od nehrđajućeg čelika završena MIG postupkom [13]



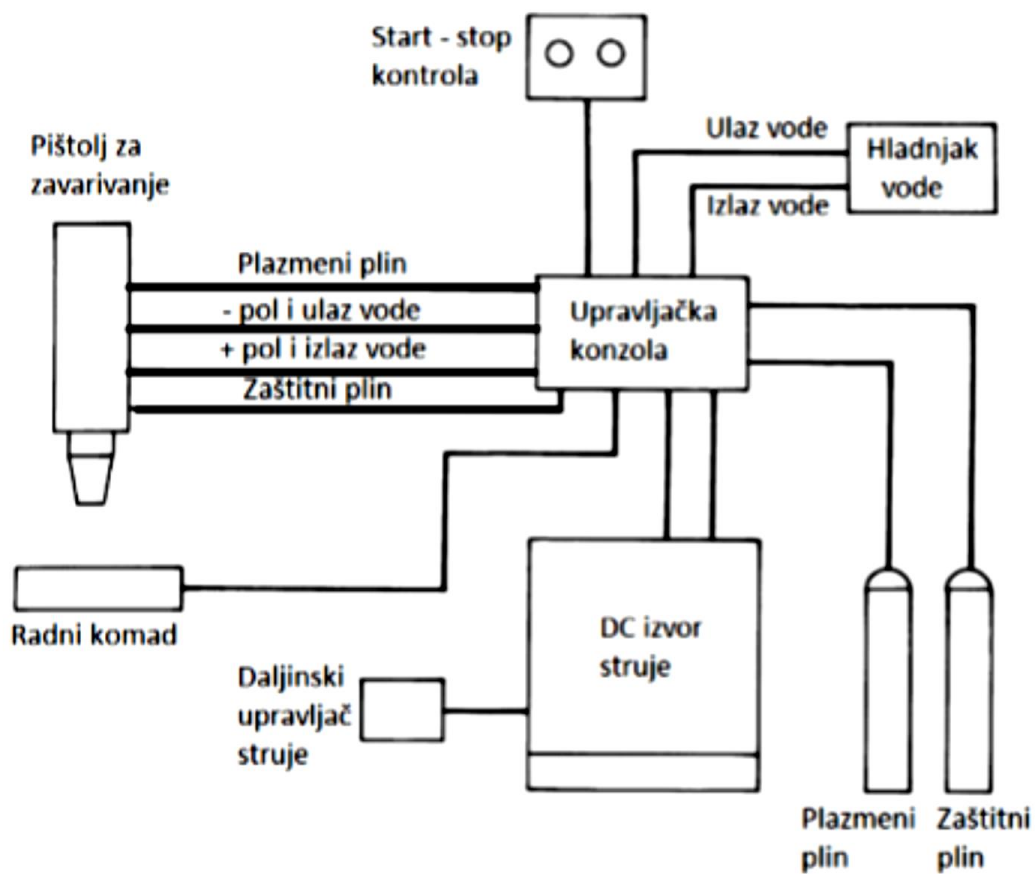
Slika 3.12 Shematski prikaz TIG zavarivanja [14]



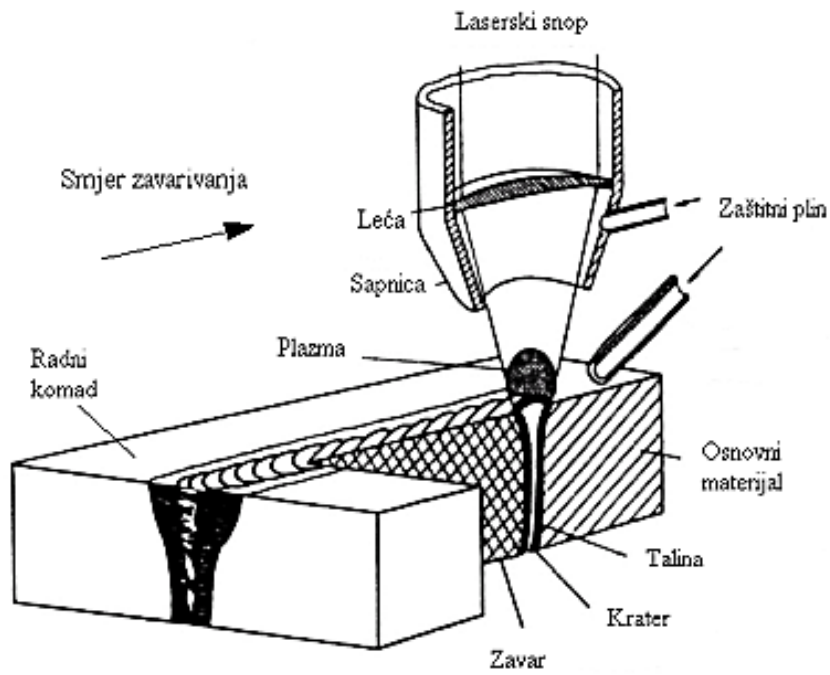
Slika 3.13 Primjer TIG zavarivanja ispušne cijevi od nehrđajućeg čelika [15]



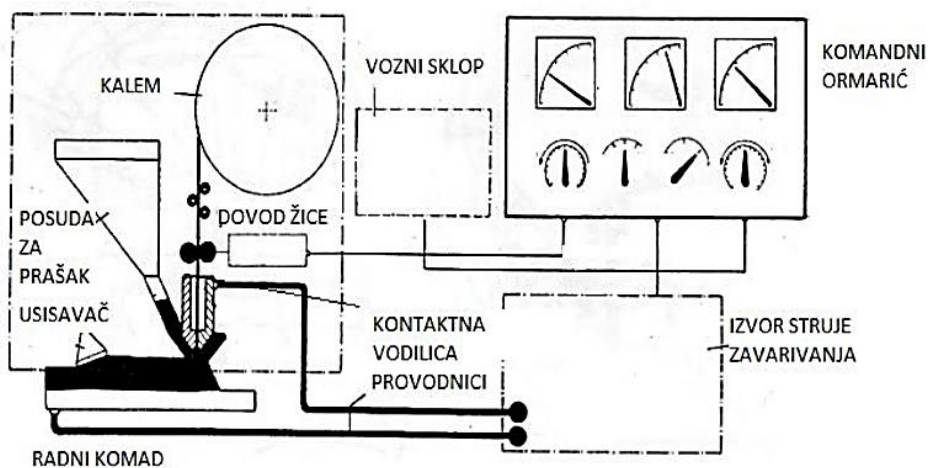
Slika 3.14 Shematski prikaz REL zavarivanja [16]



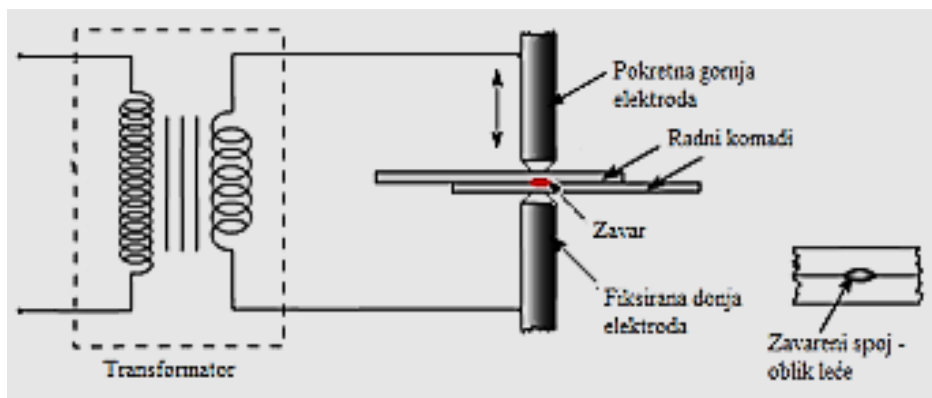
Slika 3.15 Shematski prikaz plazma zavarivanja [17]



Slika 3.16 Shematski prikaz laserskog zavarivanja [18]



Slika 3.17 Shematski prikaz EPP zavarivanja [19]



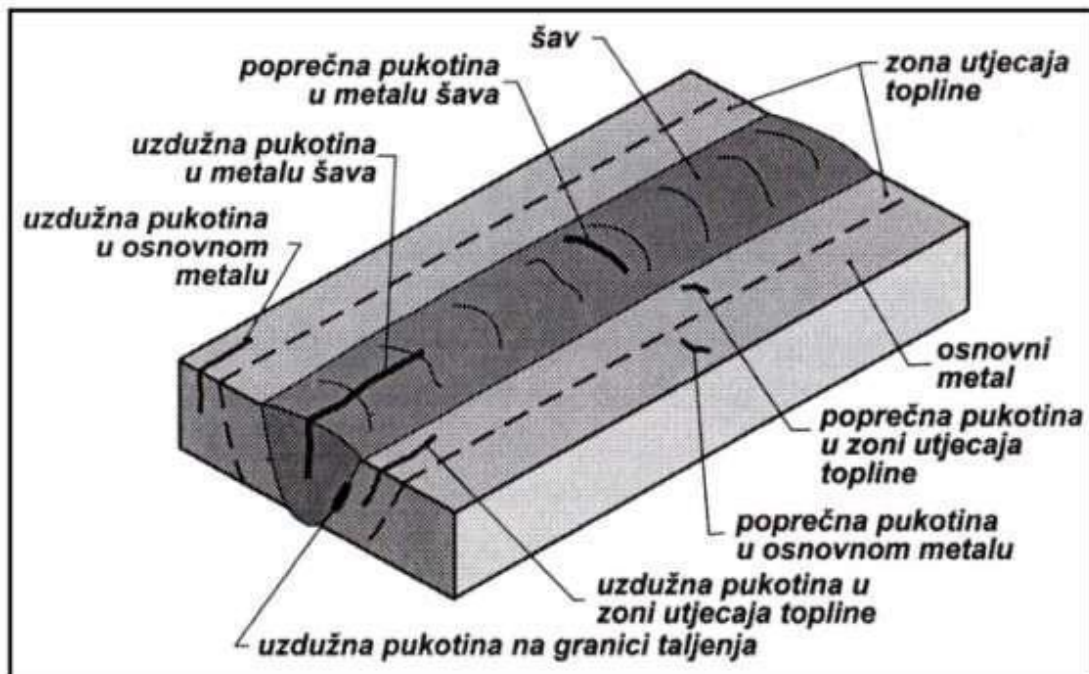
Slika 3.18 Shematski prikaz elektrootpornog zavarivanja [20]

3.5. Česte greške kod zavarivanja nehrđajućih čelika

Razumijevanje čestih grešaka prilikom zavarivanja je prvi korak prema njihovoj prevenciji. Zavarivanje nehrđajućih čelika gotovo se ne razlikuje od zavarivanja ugljičnih čelika, samo je potrebno više pažnje i kontrole prilikom zagrijavanja i hlađenja. Posebno treba obratiti pažnju na pravilan izbor dodatnog materijala s obzirom na koji osnovni materijal se primjenjuje.

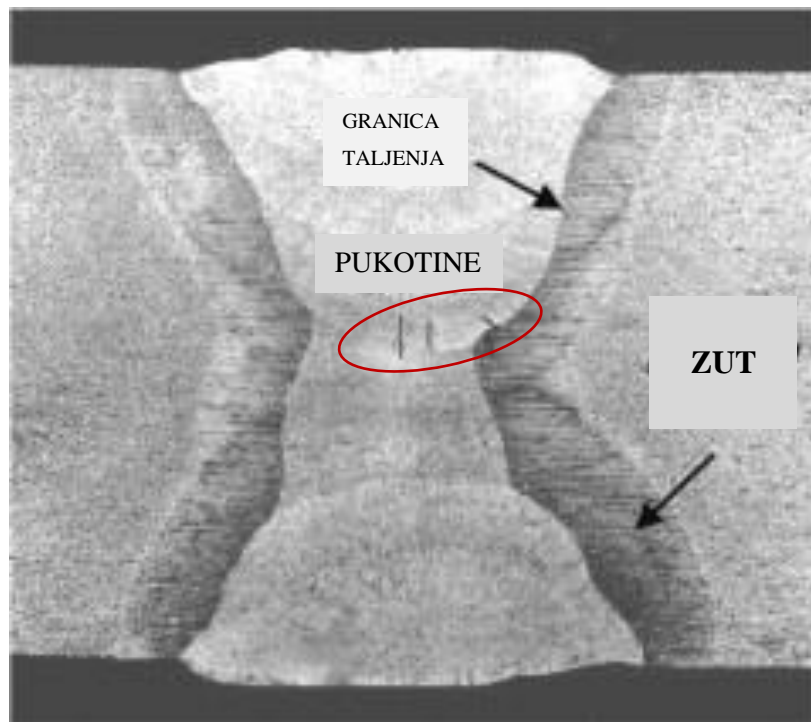
Najčešće greške prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika su pukotine (Slika 3.19), čak i prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, koji se koriste najviše od svih. To se dešava jer austenitnim čelicima nedostaje ferita koji otapa nečistoće, a njihova prisutnost bi rezultirala pukotinama. Kako bi se izbjegle pukotine u tim metalima, posebno za potpuno austenitne strukture, preporučeno je odabir dodatnog materijala koji sadrži ferit.

Kod feritnih nehrđajućih čelika mogu se pojaviti pukotine zbog pretjeranog pogrubljenja zrna što dovodi do slabije čvrstoće u zoni utjecaja topline. Prilikom zavarivanja tankih presjeka nisu potrebne nikakve dodatne mjere opreza, dok kod debljih presjeka materijala ili čvrsto upregnutih spojeva smanjenjem unosa topline može se smanjiti zona utjecaja topline, te ujedno i njezina osjetljivost na puknuće. Također, korištenje austenitnog dodatnog materijala može povećati čvrstoću konačnog zavara.



Slika 3.19 Moguća mjesta pojava pukotina [21]

Martenzitni nehrđajući čelici vrlo su sklони hladnim pukotinama kao posljedica vodika, što se također događa kod niskolegiranih čelika. Općenito se rizik od nastanka pukotina povećava s udjelom ugljika. Opasnost od pojave pukotina u martenzitnim nehrđajućim čelicima može se suzbiti postupkom zavarivanja koji daje metal zavara s niskim udjelom vodika, poput TIG-a ili MIG-a, ili upotrebom punila kontroliranih vodikom. Nadalje, tretmani prije i poslije zavarivanja, posebno za deblje presjeke i materijale s većim udjelom ugljika, pomoći će ojačati strukturu, omogućiti vodikovu difuziju iz metala zavara i smanjiti rizik od pucanja. Mikrostruktura zavara nehrđajućeg čelika pretežno ovisi o kemijskom sastavu koji se može procijeniti pomoću Schaeffler-DeLongovog dijagrama te o procesu hlađenja nakon zavarivanja.

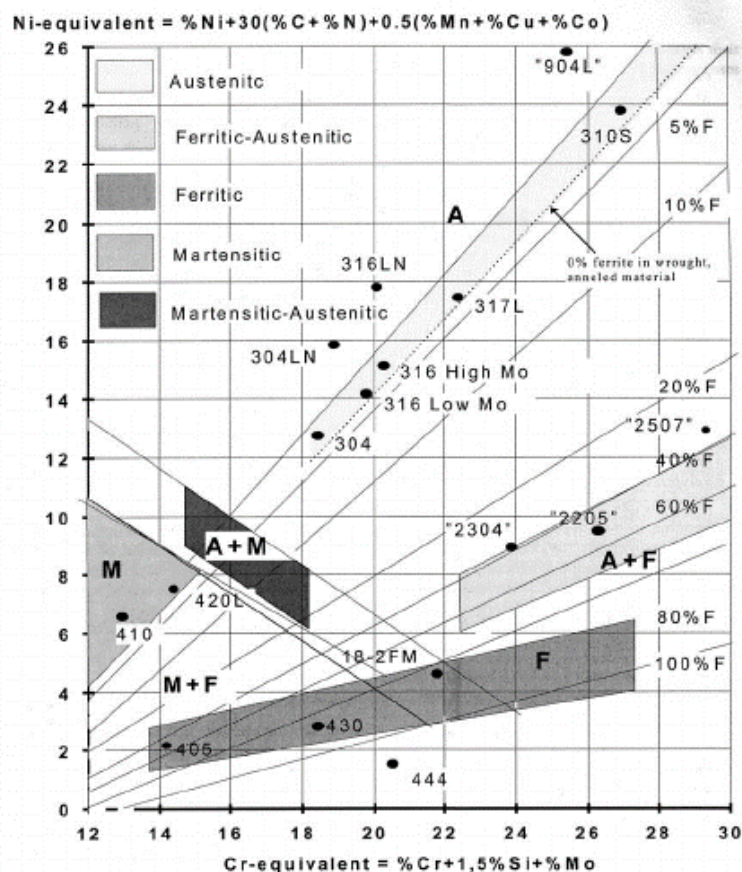


Slika 3.20 Prikaz vodikom uzrokovanih hladnih pukotina u zavaru [22]

4. Dodatni materijali

Svojstva i kvaliteta zavarenog spoja kod različitih vrsta čelika najviše ovisi o odabiru dodatnog materijala. Izbor dodatnog materijala posebno otežavaju bitno različita svojstva osnovnih materijala. Dodatni materijal može po svojim svojstvima biti manje ili više sličniji legiranom osnovnom materijalu ili ne mora uopće biti sličan nijednom osnovnom materijalu, ovisno o vrsti čelika koji se zavaruje, kao i uvjetima gdje će se koristiti. Pravilnim odabirom dodatnog materijala treba se onemogućiti nastanak difuzije koja uzrokuje krhkost i pojavu pukotina. [14]

Nadzor samog protaljivanja samo je jedan od faktora koji utječu na odabir dodatnog materijala. Ako je velika razlika u talištima čelika koji će se zavariti, temperatura na kojoj se skrućuje metal zavara treba biti u osnovi bliža onoj od čelika s nižom temperaturom taljenja. Ako je temperatura skrućivanja metala zavara znatno iznad temperature skrućivanja jednog od osnovnih metala, postoji mogućnost nastanka pukotina u zoni utjecaja topline metala koji se posljednji skrućuje. Općenito prilikom odabira dodatnog materijala potrebno je osigurati tražena mehanička svojstva i mikrostrukturu zavarenog spoja te otpornost na koroziju, krhkost i toplinski umor. Pri izboru dodatnih materijala, za predviđene strukture u zavaru moguće je kao pomoć primjenjivati Schaeffler-DeLongov ili WRC dijagram. [23]



Slika 4.1 Schaeffler-DeLongov dijagram [24]

Dodatni materijali za zavarivanje su:

- obložene elektrode
- žičane elektrode
- prah
- prahom punjena žica
- zaštitni plinovi.



Slika 4.2 Prikaz asortimana dodatnog materijala tvrtke Lincoln Electric [11]

4.1. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika

Prilikom izbora dodatnog materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika, najveća paleta dodatnih materijala je kod elektroda. Elektrode omogućuju legiranje i iz obloge. Uobičajene vrste obloženih elektroda za zavarivanje austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika su s rutilnom oblogom. Elektrode za zavarivanje feritnih i martenzitnih materijala su često s bazičnom oblogom.

Nehrđajuće elektrode mogu biti obložene na nehrđajuću žicu jednakog ili sličnog sastava, ili na nelegiranu elektrodnu žicu. U posljednjem slučaju, veće je legiranje iz obloge, elektrode su deblje obložene, što znači da imaju veću iskoristivost.

Kod zavarivanja istovrsnih nehrđajućih materijala obično su dodatni materijali jednakog sastava ili nešto više legirani od osnovnog materijala, jer bi preveliko odstupanje u legiranju između osnovnih i dodatnih materijala moglo u korozivnim medijima uzrokovati nastajanje galvanske korozije. [1]

Za skoro svaki austenitni nehrđajući čelik postoji odgovarajući dodatni materijal, samo što se mnoge vrste proizvode samo kod nekolicine tvrtki. Većina legura dodatnog materijala koje su dostupne kao obložene elektrode su dostupne i u obliku pune žičane elektrone, žice s metalnom jezgrom ili prahom punjene žice. Ako odgovarajući dodatni materijal iste kategorije nije dostupan, odabire se onaj koji je više legirani od osnovnog materijala. Kada se zahtijevaju svojstva maksimalne čvrstoće i korozijske postojanosti, odabir dodatnog materijala bi trebao biti isti ili slični osnovnom materijalu.

Preporučeno je da se austenitni precipitacijski očvršnuti čelici nakon zavarivanja ne obrađuju toplinski zbog mogućih pojava pukotina. Ti materijali se teško zavaruju, tj. smatraju se nezavarljivim. Za takve slučajeve se mogu koristiti dodatni materijali na bazi nikla i konvencionalnih austenitnih legura, pogotovo ako visoka čvrstoća zavara nije potrebna.

Za zavarivanje osnovnog martenzitnog i poluaustenitnog materijala, zavar treba naknadno obraditi toplinskim procesom starenja. Ukoliko to nije moguće, komponente zavara treba prije obraditi otopinom, te nakon zavarivanja podvrgnuti procesu starenja.

Kod feritnih nehrđajućih čelika se često radi povećanja duktilnosti izabiru nehrđajući austenitni dodatni materijali.

Prilikom zavarivanja dvaju različitih osnovnih nehrđajućih materijala međusobno, izabiru se dodatni materijali, koji su po svom sastavu bliže ili jednako legirani kao više legirani osnovni materijal.

Za zavarivanje stabiliziranog i nestabiliziranog osnovnog materijala, preporučuje se primjena stabiliziranih dodatnih materijala, sa čime se smanjuje vjerojatnost nastajanja interkristalne korozije.

Kod zavarivanja nehrđajućih materijala s nikalnim čelicima, preporučuju se dodatni materijali na bazi nikla.

Zavarivanje nehrđajućih materijala s nelegiranim, toplinski postojanim ili sitnozrnatim čelicima često rezultira nastankom krhkih struktura, ukoliko se ne primjenjuje dodatni materijal, ili ukoliko se izaberu uobičajeni nehrđajući dodatni materijali. [1]

Tablica 4.1 prikazuje preporučene dodatne materijale za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 4.1 Preporuka DM prema OM austenitnih nehrđajućih čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
201	308	Tip 308 materijala često se naziva i 18-8 i 19-9 kompozicijom. Prave analize zavara zahtijevaju maksimalno 0.08 % C, minimalno 19 % Cr i minimalno 9 % Ni. Tip 310 je moguće koristiti, no postoji opasnost da pokupi silicij od OM što može uzrokovati tople pukotine.
202		
301	308	
302		
304		
305		
308		
302B	309	
304L	347 308L	
303	312	
303Se		
309	309	
309S		
310	309	
310S	310 316	
316	310	Zavari izrađeni elektrodama tipa 316, 316L, 317, 317-Cb i 318 povremeno može pokazati lošu otpornost na koroziju u zavarenom stanju. U takvim slučajevima otpornost zavara na koroziju metal se može obnoviti toplinskim tretmanima. Gdje toplinska obrada nakon zavarivanja nije moguća, drugi metali mogu biti posebno odabrani kako bi zadovoljili zahtjeve otpornosti na koroziju.
316L	316-Cb 316L	
317	317	
317L	317-Cb	
321	321 347	Obložene elektrode tipa 321 ne proizvode se redovito jer se titan ne može lako oporaviti tijekom taloženja.
347	347	Potreban je oprez pri zavarivanju debljih presjeka zbog mogućih pukotina u ZUT.
348	347	Ta ograničen na 0,10 maksimalno, a Co ograničen na 0,20 maksimalno za nuklearne potrebe.

Tablica 4.2 prikazuje preporučene dodatne materijale za zavarivanje feritnih nehrđajućih čelika.

Tablica 4.2 Preporuka DM prema OM feritnih nehrđajućih čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
405	405-Cb	Žarenje poboljšava duktilnost toplinski zahvaćenih zona OM i metala zavara. Metal zavarivanja tipa 405 sadrži kolumbij umjesto aluminija za smanjenje očvrnuća.
	430	
	309	Ovi austenitni zavareni metali su mekani i duktilni. Međutim, toplinski zahvaćena zona OM ima ograničenu duktilnost.
	310	
	410-NiMo	
430	430	Žarenje koje se koristi za poboljšanje duktilnosti zavarenih spojeva. Zavareni metal je mekan i duktilni, ali toplinski zahvaćene zone OM imaju ograničenu duktilnost.
	308	
	309	
	310	
430F	430	Primjenjuju se napomene na obične metale tipa 430.
430F Se	308	Primjenjuju se napomene na obične metale tipa 430.
	309	
	312	
446	446	Zavareni metal tipa 308 može se koristiti, ali neće pokazivati otpor jednak OM. Mora se uzeti u obzir razlika u koeficijentima proširenja osnovnog i zavarenog metala.
	308	
	309	
	310	

Tablica 4.3 prikazuje preporučene dodatne materijale za zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 4.3 Preporuka DM prema OM martenzitnih nehrđajućih čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
403 410	410	Žarenje omekšava i daje duktilnost toplinski zahvaćenim zonama i zavaru. Zavareni metal reagira na toplinsku obradu na sličan način kao OM.
	309	Ovi austenitni zavareni metali mekani su i duktilni u zavarenom spoju. Međutim, zone zahvaćene toplinom OM bit će ograničene duktilnosti.
	310	
	410-NiMo	
416	410	Primjenjuju se napomene na OM tipa 410.
416 Se	308	Primjenjuju se napomene na OM tipa 410.
	309	
	312	
420	420	Izbjegava pažljivo zagrijavanje i toplinsku obradu nakon zavarivanja pucanje.
431	410	Izbjegava pažljivo zagrijavanje i toplinsku obradu nakon zavarivanja pucanje.
	308	Zahtijeva pažljivo zagrijavanje. Ponovno servisiranje u zavarenom stanju zahtijeva razmatranje očvrnutih zona pod utjecajem topline.
	309	
	310	

4.2. Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

Mnoge tvrtke razvijaju svoje dodatne materijale za zavarivanje nehrđajućih čelika prema specifikacijama već postojećih normi. Neke od njih su: HRN EN ISO 14343:2017 – „Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Žičane elektrode, trakaste elektrode, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i vatrootpornih čelika“, HRN EN ISO 3581:2016 – „Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i vatrootpornih čelika“, HRN EN ISO 17633:2018 – „Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Žice punjene praškom i šipke za elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim plinom i bez zaštitnog plina za nehrđajuće čelike i čelike otporne na visoke temperature“ i druge. U normama su definirani sastavi pojedinih dodatnih materijala i njihova primjena uz odgovarajući osnovni materijal kao što će biti navedeno nadalje u radu. [26]

NORME				
EN ISO 3581-A	AWS / ASME SFA-5.4			
E 18 8 Mn B 22	~ E307-15			

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE				
Bazično obložena elektroda za zavarivanje nehrđajućih Cr i Cr-Ni čelika, čelika slabe zavarljivosti te čelika različitih strukturnih faza (čelici za poboljšanje, nelegirani i niskolegirani čelici, manganski čelici). Elektroda se primjenjuje i za navarivanje elastičnog međusloja kod tvrdog navarivanja, te za navarivanje korozijski postojanih i na trošenje otpornih navara. Zavar iz austenitnog Cr-Ni-Mn čelika je nemagnetičan, otporan na koroziju do 800°C. Struktura metala zavara je austenitna.				

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA				
$R_{0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_5 %	KV (20°C) J	
> 350	590 - 690	> 35	> 80	

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA					
	C	Mn	Si	Cr	Ni
%	0,12	6,0	1,0	18,5	8,0

PREPORUČENA JAKOST STRUJE ZAVARIVANJA					
Ø mm	2,5	3,2	4,0	5,0	
A	65 - 85	90 - 110	125 - 145	150 - 170	

PAKIRANJE				
Dimenzija elektrode mm	Količina u toni cca kom	Težina kutije kg	Težina omotnog pakiranja kom x kg/kom = kg	
Ø 2,5 x 300	65 000	1,3	15 x 1,3 = 19,5	
Ø 3,2 x 350	33 000	1,2	17 x 1,2 = 20,4	
Ø 4,0 x 350	22 000	1,2	16 x 1,2 = 19,2	
Ø 5,0 x 450	11 300	5,2	5 x 5,2 = 26,0	

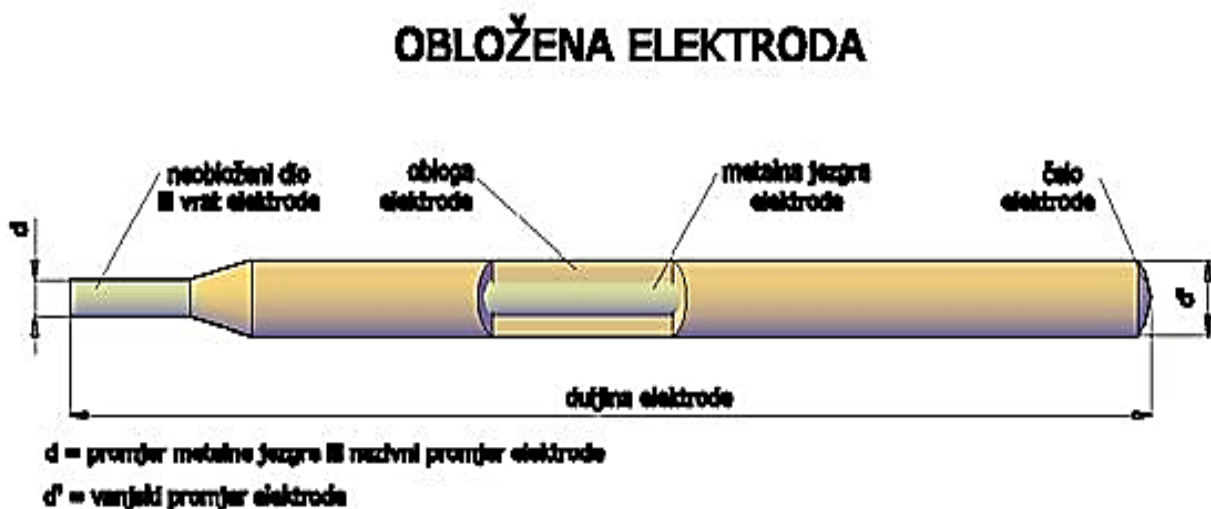
Slika 4.2 Primjer specifikacije elektrode prema normi HRN EN ISO 3581:2016 [27]

4.2.1. Obložene elektrode

Pri taljenju i kemijskim reakcijama mineralne obloge obložene elektrode nastaju plinovi i troska koji obavljaju zaštitu električnog luka i taline zavara od okolnog zraka. Najviše se primjenjuje kod postupka elektrolučnog ručnog zavarivanja. Sastavljena je od metalne jezgre na koju je nanesa obloga. [28]

Kvaliteta metalne jezgre prilagođena je sastavu izratka, dok je kvaliteta obloge prilagođena sljedećim funkcijama:

- stabilizacija električnog luka (povećana sposobnost ioniziranja dodatkom oksida natrija, kalcija, kalija, titanija i drugih)
- legiranje (feromangan, ferosilicij, krom, nikal, molibden, vanadij, aluminij, bakar, ugljik, i drugo)
- otplinjavanje taline (kisik se uklanja s titanijem, aluminijem, silicijem, manganom; vodik se uklanja s kalcijevim floridom)
- rafinacija (smanjenje količine sumpora i fosfora) taline zavara.



Slika 4.3 Prikaz sastava obložene elektrode [28]

Obloga elektrode kod procesa zavarivanja vrši električnu, fizikalnu i metaluršku funkciju.

Električna funkcija, koja se sastoji u osiguranju lakog uspostavljanja i stabilizaciji električnog luka, postiže se stvaranjem plinova s velikom sposobnošću ionizacije prilikom taljenja obloge koja sadrži spojeve natrija i kalija.

Fizikalna funkcija obloge sastoji se u omogućavanju i olakšavanju izvođenja zahvata zavarivanja u prisilnom položaju i u zaštiti taline, kapljica metala u prelasku, kao i zavara od preneglog hlađenja. U tu svrhu, sastavom obloge regulira se viskozitet troske na način da se povećanjem stupnja bazičnosti povećava viskozitet, a time i mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima. Stvorena troska treba ujedno štiti talinu metala od štetnih plinova iz zraka svojim plutanjem po površini taline kao i kapljice metala, za vrijeme prolaska kroz električni luk obavijajući ih. Uz navedeno, taljenjem obloge moraju se stvarati plinovi u obliku zavjese kojom se dodatno štiti taline i prelazne kapi metala od plinova iz zraka.

Metalurška funkcija obloge je u njezinu metalurškom djelovanju na zavareni spoj u toku procesa zavarivanja legiranjem, otplinjavanjem i rafinacijom. Legiranjem putem obloge vrši se nadoknađivanje legirajućih elemenata koji izgaraju u toku procesa zavarivanja, kao i dodavanje legirajućih elemenata u talinu radi poboljšavanja svojstva zavarenog spoja.

Pod funkcijom otplinjavanja podrazumijeva se redukcija kisika i vodika iz taline zavara. U tu svrhu služe dezoksidanti poput Ti, Al, Si, Mn i drugi koji se oslobađaju tokom topljenja elektrode i s kisikom stvaraju okside (npr. SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO) koji prelaze u trosku te dodani kalcijev fluorid (CaF_2) koji se veže s vodikom i potom prelazi u trosku.

Pod rafinacijom (čišćenjem) podrazumijeva se uklanjanje sumpora i fosfora iz taline zavara. Za tu svrhu služe dodatni oksidi poput CaO i MnO koji se oslobađaju tokom topljenja obloge i vežu sa sumporom i fosforom iz taline, te takvi ulaze u sastav troske. [29]

Uobičajeni promjeri obloženih elektroda kod ručnog elektrolučnog zavarivanja (REL) su:

- 2 mm i 2,5 mm; duljine 200 mm, 300 mm ili 350 mm
- 3,25 mm; 4 mm; 5 mm; 6 mm, 8 mm i 10 mm; duljine 350 mm, i 450 mm ili veće.

Obložene elektrode se još prema namjeni razlikuju na:

- elektrode za zavarivanje
- za navarivanje
- za žlijebljenje
- za rezanje.

Prema tehnološkim osobinama, razlikuju se:

- elektrode s dubokim provarom
- za posebne radne zahtjeve (zavarivanje u okomitom položaju, iznad glave, zavarivanje korijena zavarenog spoja)
- elektrode s velikim rastalnim učinkom (s visokom korisnošću).

Podjela obloženih elektroda prema vrsti i metalurškoj karakteristici obloge:

- kisela obloga - oznaka A
- bazična obloga - oznaka B
- celulozna obloga - oznaka C
- oksidirajuća obloga - oznaka O
- titanska (rutilna) obloga - oznaka R
- ostale (različite od prethodnih) - oznaka V
- dodatak željeznog praška u oblogu – uz osnovnu oznaku dodaje se i oznaka Fe

Obloga bazičnih elektroda sastoji se većim dijelom od vapnenca, dolomita i magnezija, te kalcijeva fluorida, kalcijeva karbonata, titanova dioksida, silikata i dezoksidanata, radi redukcije kisika, vodika, sumpora i fosfora iz taline tokom trajanja procesa zavarivanja. Rezultat vezanja tih štetnih sastojaka u trosku je u smanjenoj sklonosti stvaranja pukotina u zavaru, manjoj poroznosti i manjem sadržaju nemetalnih uključaka, odnosno poboljšanju njegovih mehaničkih svojstava, posebno istezanja i udarne žilavosti. Nedostaci sastava takve obloge su u otežanom čišćenju troske, u sklonosti pojavi poroznosti u korijenu zavara i nešto grubljem izgledu površine zavara. Radi visokog sadržaja kalcijevog fluorida oslabljena je stabilnost električnog luka i povišena je točka taljenja obloge. To dovodi do nestabilnosti električnog luka što može biti uzrok pojavi poroznosti u zavarenom spoju. Nadalje, bazična obloga je vrlo hidroskopna pa je potrebna zaštita od vlage kao potencijalnog uzročnika poroznosti zavara. Elektrode se suše u posebnim pećima na temperaturi od 200 °C u trajanju od najmanje dva sata.

Rutilne obloge imaju dobra mehanička svojstva. Koriste se za sve položaje zavarivanja te se može s njima raditi na istosmjernoj i izmjeničnoj struji. Zavarenim spojevima daju lijep izgled, troska im se lako čisti, daju vrlo dobru stabilnost električnom luku i nisu sklone stvaranju pora pri povećanju dužine električnog luka. Nedostatak im je u smanjenju istezljivosti i žilavosti zavara, što kod zavarivanja vrlo krutih konstrukcija i debelih materijala može dovesti do stvaranja pukotina uzrokovanih zaostalim unutarnjim naprezanjima. Žilavost zavara na niskim temperaturama znatno je slabija nego kod bazičnih elektroda. [29]

Tablica 4.4 prikazuje preporučene dodatne materijale za zavarivanje nehrđajućih čelika.

Tablica 4.4 Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika [30]

OM		DM		
EN 10088		EN 1600	EN 12072	EN 12073
Naziv	Broj	Obložene elektrode	Žice*	Praškom punjene žice
X5CrNi18-10	1.4301	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi18-9	1.4307	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi19-11	1.4306			
X5CrNiTi18-10	1.4541	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	E 19 13 4 N L	G 19 13 4 L	T 13 13 4 N L
X10CrNi18-8	1.4310	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNiN18-7	1.4318	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	E 22 12	G 22 12 H	T 22 12 H
X8CrNi25-21	1.4845	E 25 20	G 25 20	T 25 20
X25CrNiMo18-15-4	1.4438	E 19 13 4 N L	G 19 13 4 L	T 13 13 4 N L
X2CrTi12	1.4512	E 19 9 L	G 19 9 L	T 13 Ti
X6Cr17	1.4016	E 17 or 19 9 L	G 17 or 19 9 L	T 17 or 19 9 L
X3CrTi17	1.4510	E 23 12 L	G 23 12 L	T23 12 L
X2CrMoTi18-2	1.4521	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrTiNb18	1.4509	E 23 12 L	G 23 12 L	T 23 12 L
X6CrMo17-1	1.4113	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 Nb
X2CrNiN23-4	1.4362	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X12Cr13	1.4006	E 13 or 19 9 L	G 13 or 19 9 L	T 13 or 19 9 L
X20Cr13	1.4021	E 13 or 19 9 L	G 13 or 19 9 L	T 13 or 19 9 L
X30Cr13	1.4028	E 13 or 19 9 L	G 13 or 19 9 L	T 13 or 19 9 L

* – Oznaka G za MIG/MAG, W za TIG, P za plazma i S za EPP

4.2.2. Zaštitni plin

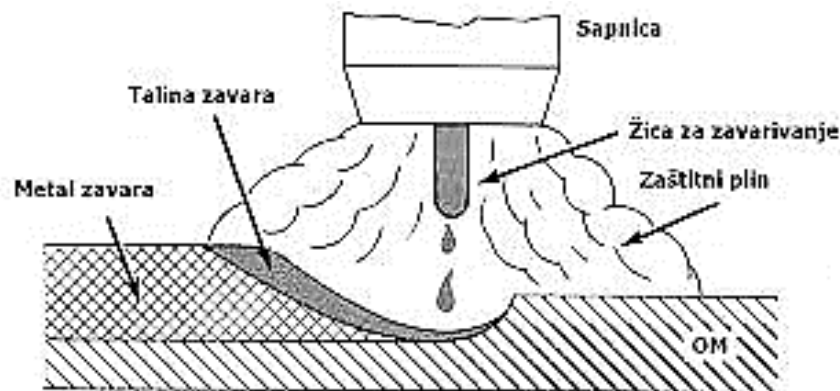
Zaštitni plin se koristi kod postupaka elektrolučnog zavarivanja:

- zavarivanja TIG postupkom
- zavarivanja MIG postupkom
- zavarivanja MAG postupkom.

Na kvalitetu zavarenog spoja kod ovih postupaka znatno utječe zaštitni plin. U počecima uvođenja postupka zavarivanja u atmosferi zaštitnog plina uobičajeno je bilo svega nekoliko pojedinačnih plinova, na primjer kod zavarivanja MIG postupkom čisti argon, a kod zavarivanja MAG postupkom čisti ugljikov dioksid. Danas prevladavaju mješavine plinova. Njihova količina standardiziranih plinskih mješavina se znatno povećala jer se kao dijelovi u mješavini ne primjenjuju samo argon i ugljikov dioksid, već i kisik, helij, vodik i dušik. Podjela različitih zaštitnih plinova dana je u standardu HRN EN ISO 14175:2008. [31]

Odabir zaštitnog plina kod zavarivanja nehrđajućih čelika ima znatni utjecaj na sljedeće faktore [30]:

- efikasnost zaštite (kontrolirana atmosfera zaštitnog plina)
- metalurška i mehanička svojstva (gubitak legirajućih elemenata, prihvata plinova iz atmosfere)
- otpornost na koroziju (površinska oksidacija)
- geometriju zavara
- izgled površine
- stabilnost električnog luka
- prijenos metala (ako ga ima)
- okoliš (emisija para i plinova).



Slika 4.4 Zaštitni plin kod MIG / MAG [31]

Tablica 4.5 prikazuje odabir zaštitnih plinova s obzirom na postupak zavarivanja.

Tablica 4.5 Zaštitni plinovi s obzirom na postupak zavarivanja [30]

Postupak zavarivanja	Zaštitni plin	Prateći plin
TIG	Ar Ar + H (20 %) – * Ar + He (70 %) Ar + He + H * Ar + N ₂ **	Ar N ₂ ** N ₂ + 10 % H ₂ *
Plazma	isto kao TIG	isto kao TIG
MIG/MAG	98 % Ar + 2 % O ₂ 97 % Ar + 3 % CO ₂ 95 % Ar + 3 % CO ₂ + 2 % H ₂ * 83 % Ar + 15 % He + 2 % CO ₂ 69 % Ar + 30 % He + 1 % O ₂ 90 % He + 7,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	isto kao TIG
EPP	nema 97 % Ar + 3 % CO ₂ 80 % Ar + 20 % CO ₂	nema isto kao TIG
Laser	He Ar	isto kao TIG

* - Mješavine s vodikom se ne smiju koristiti za zavarivanje feritnih, martenzitnih ili dupleks nehrđajućih čelika

** - Za zavarivanje austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika koji sadrže dušik, može se dodati dušik u zaštitne plinove

5. Zaštita od korozije i njena prevencija nakon zavarivanja

U normalnim atmosferskim uvjetima ili okruženjima prisutnim vodom, nehrđajući čelici će zadržati svoju korozijsku postojanost ukoliko su korišteni odgovarajući materijali, procesi proizvodnje i naknadni tretmani nakon zavarivanja. Ipak, u pojedinim uvjetima mogu zahrđati. Proizvodi od nehrđajućeg čelika zahtijevaju čišćenje kako bi zadržali svoj netaknuti izgled i korozijsku postojanost. Neodržavanje često dovodi do nakupina korozivnih čestica koje dovode do pojave mrlja i potiču razvoj korozije. Kako bi se osigurala korozijska postojanost u zahtjevnim, agresivnim okruženjima, koriste se visokolegirani nehrđajući čelici.



Slika 5.1 Krov Chrysler zgrade izrađen od nehrđajućeg čelika [32]

Na slici 5.1 prikazan je krov Chrysler zgrade u New Yorku koji je izrađen od AISI 302 nehrđajućeg čelika. U gotovo 100 godina povijesti, krov je čišćen samo tri puta usprkos teškim uvjetima u kojima se nalazi. [32]

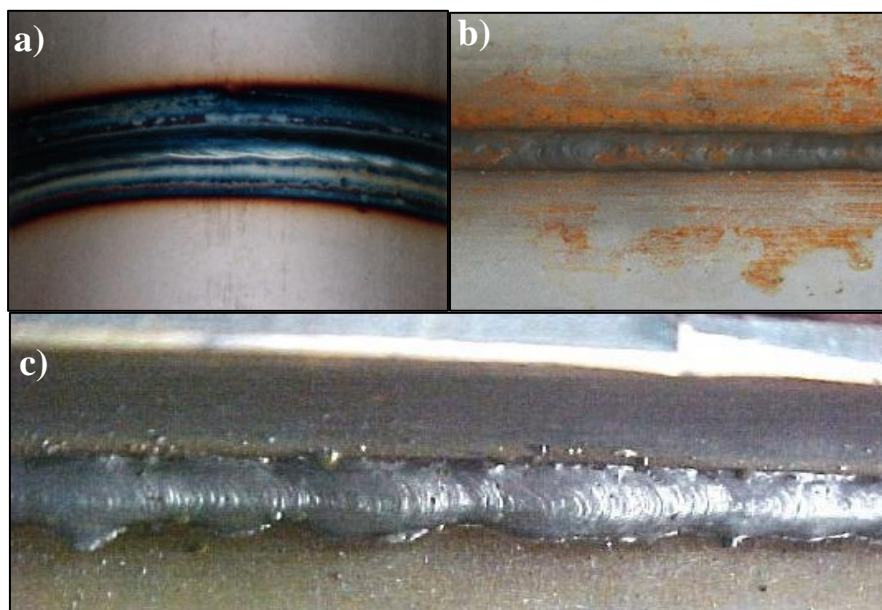
5.1. Uzročnici korozije nakon zavarivanja

Zavarivanje je jedna od najčešćih vrsta spajanja i izrađivanja metalnih proizvoda. Iako koristan, ovaj postupak može ozbiljno oštetiti antikorozivna svojstva površina od nehrđajućeg čelika. Taljenje, kao posljedica visokih temperatura tijekom zavarivanja, lišava čelik pasivnog sloja, a time i njegovu korozivsku postojanost.

Zbog toga je važno obratiti pozornost na uklanjanje korozije, unakrsnu kontaminaciju i toplinska obojenja (oksidaciju). Ako se korozija već pojavila na zavaru, potrebno ju je potpuno ukloniti i riješiti se svih kontaminirajućih čestica koje nastaju kao posljedica industrijske obrade metala. Također se moraju ukloniti toplinska obojenja koja se pojavljuju oko zavara i unutar zone utjecaja topline. Uz sve navedeno treba voditi računa o repasivizaciji površine. U normalnim uvjetima, zaštitni pasivni sloj će se samoobnoviti ako je blago oštećen. Međutim, kod zavarivanja mogu se desiti razne komplikacije koje otežaju ili potpuno onemogućuju repasivizaciju. [33]

Tipične površinske nepravilnosti:

- oksidacija radi visokih temperatura
- nepravilnosti zavara
- kontaminacija željezom
- gruba površina
- organska kontaminacija.



Slika 5.2 Prikaz pojedinih površinskih nepravilnosti:

a) oksidacija uz zavar b) kontaminacija željezom c) nedovoljno taljenje prilikom zavarivanja [33]

5.2. Završne obrade zavara radi prevencije korodiranja

Mogu se koristiti različite mehaničke i kemijske metode, ili njihove kombinacije, za čišćenje i zaštitu nehrđajućih čelika. Prilikom korištenja mehaničkih metoda čišćenja kao posljedica često ostane gruba površina. S druge strane, kemijske metode proizvode najbolje rezultate i uklanjaju sve vrste nečistoća s površine, no njihova primjena je relativno ograničena iz ekoloških razloga.

Najčešće metode prevencije korodiranja su:

- pjeskaranje
- sačmarenje
- četkanje
- odmašćivanje
- kemijsko nagrivanje
- elektrokemijsko poliranje. [33]

U tablici 5.1 predočene su pojedine metode uklanjanja onečišćenja koje tvrtka Strojopromet d.o.o. koristi za prevenciju korodiranja.

Tablica 5.1 Primjer preventivnih metoda korodiranja tvrtke Strojopromet [34]

VRSTE ONEČIŠĆENJA	UKLANJANJE
-mrlje od onečišćene vode -prašina -čada	Trljanje mekom suhom krpom, ispiranje vodom (preferirati vruću vodu).
-otisci prstiju -mrlje od ulja i mast	Odmašćivanje, ispiranje sa deterdžentom bez abraziva (vruća voda). Za polirane površine koristiti omekšanu pročišćenu vodu i blagi šampon.
-slijepljeni dijelovi folije za omatanje -oznake od markera -kapljice boje	Organskim otapalima ili destilatima nafte (bezolovni benzin), nitro razrijeđivačima, acetonom i alkoholom. Ne upotrebljavati sredstva koja sadrže kloride i druga neprovjerena sredstva. Nanošenjem laganih uljnih ili voštenih sredstava, te sprejeva radi konzerviranja površine
Čvrsto prijanjajuća onečišćenja -beton -žbuka -djelomično oksidi od zavarivanja	Ispiranje sredstvima koja sadrže abrazive, iza toga ispiranje vodom i naknadno sušenje. Čišćenje brusnim materijalima za nehrđajući čelik: - klasično čišćenje (brusno platno), papir, fiber – prednost mineral cubitron – scotch-brite proizvodima 3M – proizvodima novih tehnologija na bazi minerala cubitron ili nagrivanjem (bajcanjem) kemijskim sredstvima uz naknadno temeljito ispiranje vodom do neutralnog PH
ELEKTROKEMIJSKO ČIŠĆENJE	
-korozija srednje jakosti -oksidni od zavarivanja -ozbiljna površinska korozija	Kombinacijom postupaka mehaničkog čišćenja površine i nagrivanja (bajcanja) kemijskim sredstvima, uz temeljito ispiranje vodom.
-ogrebotine	Uklanjanje mehaničkom obradom (strojno ili ručno) do ujednačavanja površine (postupno u nekoliko faza). Vrlo je upitno postići površinu identičnu prvotnoj prije oštećenja, čak i naknadnim poliranjem.

6. Eksperimentalni dio

6.1. Opis eksperimentalnog rada

Eksperimentalni rad proveden je na Sveučilištu Sjever. MAG postupkom su zavarena dva uzorka nehrđajućeg čelika s praškom punjenom žicom. Nakon zavarivanja obradak je izrezan tračnom pilom na tri dijela. Manji uzorak je nakon rezanja brušen i poliran. Zatim se izradak promatrao na mikroskopu. Zapažanja će biti navedena u sljedećim poglavljima.

6.2. Osnovni i dodatni materijal za zavarivanje

Kao osnovni materijal korišten je nehrđajući čelik X5CrNi18–10 (slika 6.1). To je konvencionalni austenitni nehrđajući čelik s dobrom otpornošću na kiseline. Ovaj materijal ima široku primjenu zbog svoje izvrsne otpornosti na koroziju, dobre hladne deformabilnosti i zavarljivosti.

Dimenzije ispitnih uzoraka:

- cijev kvadratnog presjeka – 200 mm duljine, 50 mm širine, 50 mm visine, 4 mm debljine stijenke
- lim pravokutnog presjeka – 260 mm duljine, 50 mm širine, 10 mm visine



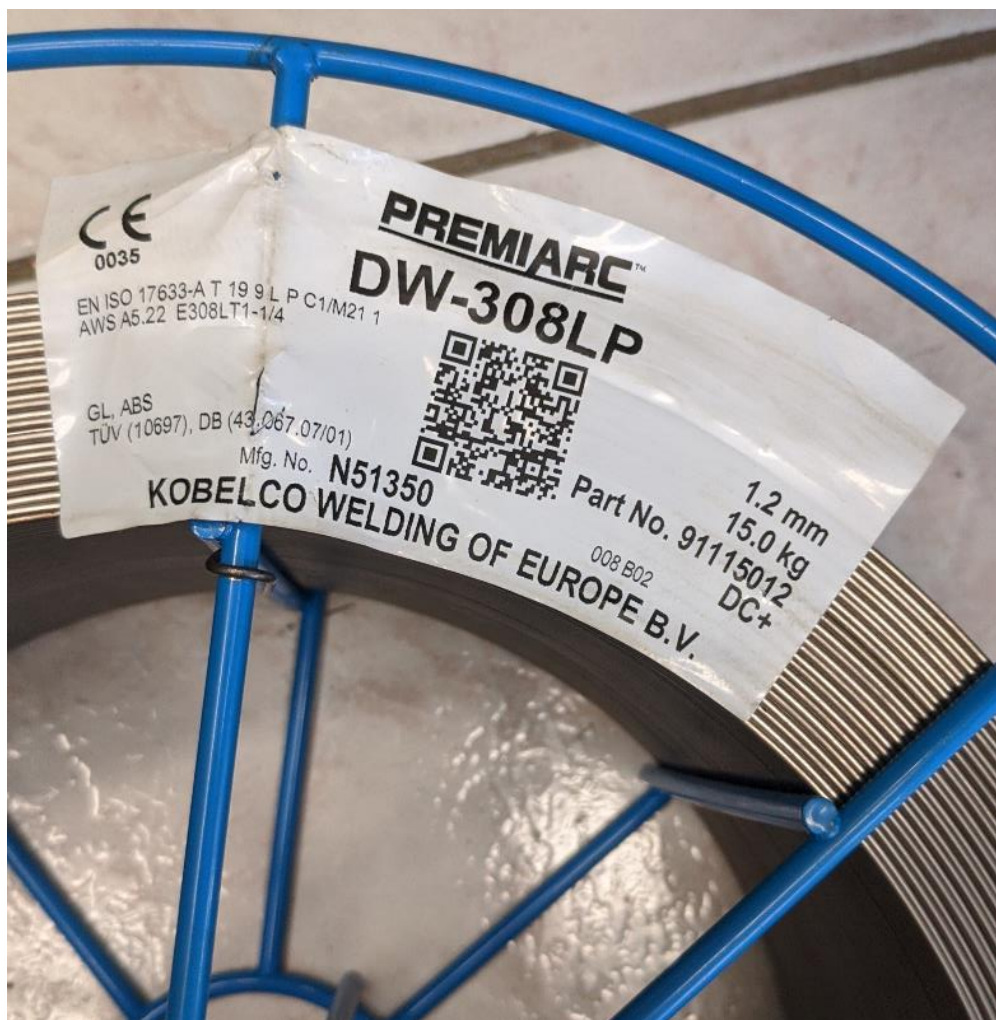
Slika 6.1 Ispitni uzorci nehrđajućeg čelika X5CrNi18–10

Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNi18–10 prema EN 10088-1 prikazan u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNi18–10

Naziv	Broj	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu
X5CrNi18–10	1.4301	0,07	1,00	2,00	0,045	0,015	17,5 - 19,5	-	8,0 - 10,5	0,10	-

Za dodatni materijal je korištena 1,2 mm praškom punjena žica 19 9 L (ISO 14343-A) proizvođača Kobelco Welding of Europe B.V. (slika 6.2). To je rutilna praškom punjena žica koja djeluje stabilnim lukom, bez prskanja te stvara svijetle, glatke površine zavara. Prema EN ISO 17633-A namijenjena je za zavarivanje nehrđajućih čelika tipa AISI 304L uz zaštitni plin M21 (82 % Ar, 18 % CO₂) kao što je i urađeno u ovom eksperimentu.



Slika 6.2 Praškom punjena žica 308L

Kemijski sastav dodatnog materijala (19 9 L) prikazan je u tablici 6.2.

Tablica 6.2 Kemijski sastav dodatnog materijala 308L

Oznaka prema ISO 14343-A	Oznaka prema ISO 14343-B	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
19 9 L	308L	0,03	0,7	1,7	0,019	0,004	9,9	19,5

6.3. Oprema korištena u eksperimentalnom radu

Oprema korištena u ovom eksperimentu:

- izvor struje za zavarivanje
- automat za pravocrtno zavarivanje
- tračna pila
- stroj za poliranje
- mikroskop

6.3.1. Izvor struje za zavarivanje

U ovom eksperimentu za MAG zavarivanje koristio se Varmig 230 Supermig proizvođača Varstroj (Slika 6.3). Varmig je poluautomatski izvor struje za elektrolučno zavarivanje u zaštiti zaštitnih plinova. Kao zaštitni plin se koristi CO₂, Ar ili mješavina tih plinova koja ovisi o sastavu materijala koji se zavaruje. Aparat je namijenjen za zavarivanje tanjih i debljih limova te za kvalitetno zavarivanje u strojno-prerađivačkoj industriji. Tehničke specifikacije aparata navedene su u tablici 6.3.



Slika 6.3 Varmig 230 Supermig izvor struje za zavarivanje

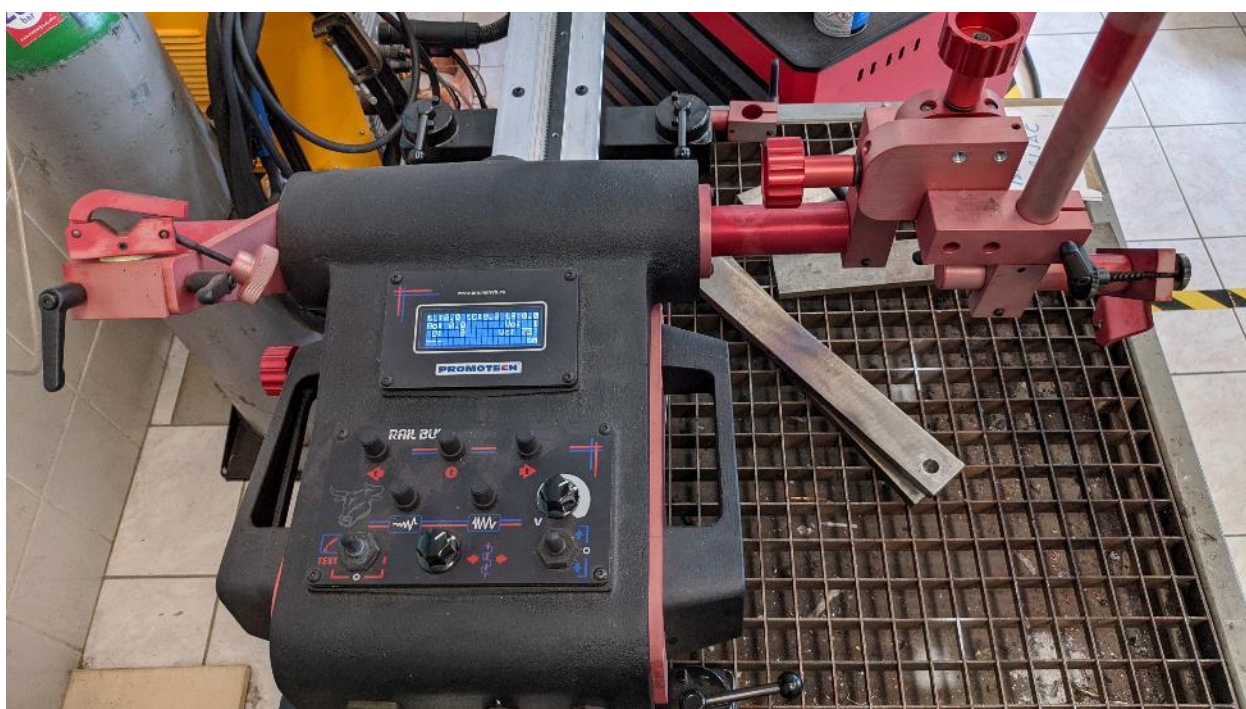
Tablica 6.3 Tehničke specifikacije Varmig 230 Supermig

Priključni napon	3x 400 V / 50 Hz
Max. priključna snaga	9,2 kVA
Osigurač spori	16 A
Napon praznog hoda	17 – 40 V
Struja zavarivanja	15- 230 A
Napon zavarivanja	14,8 – 25,5 V
Intermitencija	35 % - 230 A 60 % - 170 A 100 % - 135 A
cos φ	0,83 (135 A)
Regulacija struje zavarivanja	10 stupnjeva
Promjer žice Ø	0.6 – 1,2 mm
Vrijeme točkanja	0,5 – 2 s
Hlađenje	ventilator

U ovom eksperimentu koristio se Ferromix C 18 zaštitni plin proizvođača Messer koji se sastoji od 18 % CO₂ i 82 % Ar. Zaštitni plin može utjecati na čvrstoću, duktilnost, tvrdoću te otpornost na koroziju zavara. Stoga je prema preporuci EN ISO 17633:2017 korišten M21 (EN ISO 14175:2008) zaštitni plin.

6.3.2. Automat za pravocrtno zavarivanje

Kao automat za pravocrtno zavarivanje (eng. track welding carriage) koristio se Rail Bull proizvođača Promotech. To je uređaj koji pomoću vodilice pravocrtno pomiče pištolj tijekom zavarivanja. Namijenjen je za zavarivanje i rezanje pločevina i limova te kružno zavarivanje radijusa većih od 5000 mm. Ugrađen sustav njihanja omogućuje male pokrete pištolja lijevo-desno tijekom zavarivanja. Također se može postaviti i na zakrivljenu površinu pomoću fleksibilnih vodilica. Koristi se i na magnetičnim te ne magnetičnim površinama pomoću magneta ili vakuumskih prihвата. Može se postaviti za zavarivanje u PA, PB, PC, PD, PE, PF i PG položaju.



Slika 6.4 Rail Bull automat za pravocrtno zavarivanje

6.3.3. Ostala oprema

Uz navedeni izvor struje i automat za zavarivanje, od uređaja su se još koristili tračna pila (Slika 6.6), stroj za poliranje (Slika 6.7) te mikroskop za promatranje zavara.



Slika 6.5 Tračna pila THOMAS 210S



Slika 6.6 Stroj za poliranje MINITECH 250 SP1

6.4. Postupak eksperimentalnog rada

6.4.1. Priprema ispitnog uzorka za zavarivanje

Eksperimentalni dio ovog završnog rada započeo je pripremom osnovnog materijala. Kako bi se uklonile nečistoće i nepravilnosti površina, osnovni materijal je ručno brušen sve do metalnog sjaja (Slika 6.1).

Prvi korak je bio staviti osnovni materijal u PA kutni položaj (45°) te ga učvrstiti pripojem (Slika 6.8).



Slika 6.7 Osnovni materijal pripojen u PA položaju

6.4.2. Zavarivanje ispitnog uzorka

Ruka automata u kojoj je stegnut pištolj je namještena tako da je kut nagiba pištolja 10° u odnosu na vertikalnu os (Slika 6.9). Automat se kretao s lijeva na desno brzinom od 30 cm/min.



Slika 6.8 Namještanje automata za zavarivanje u PA položaju

Ostali parametri zavarivanja su navedeni u tablici 6.4.

Tablica 6.4 Parametri zavarivanja

Struja zavarivanja	150 A
Napon zavarivanja	22,5 V
Promjer žice Ø	1,2 mm
Brzina dobave žice	6 m/min
Brzina zavarivanja	30 cm/min
Smjer zavarivanja	s desna na lijevo
Udaljenost sapnice od obratka	10 mm u oba prolaza
Položaj zavarivanja	PA (1F - kutno)
Kut nagiba pištolja	10°
Protok zaštitnog plina	11 l/min

Prolazom bez uključivanja izvora struje za zavarivanje se testirala pravocrtnost gibanja pištolja duž obrataka. Zatim su se namjestili parametri zavarivanja te se zavarila prva strana. Zavar je bio zadovoljavajuće kvalitete te se troska glatko odvojila (Slika 6.10).



Slika 6.9 Odvojena troska nakon prvog zavara

Nakon zavarivanja obradak se trebao ohladiti kako sljedeći prolaz s druge strane ne bi utjecao na strukturu zavara. Mjerenje temperature se vršilo kontaktnim termometrom. Nakon što se obradak ohladio do 30 °C zavarila se druga strana obratka te se većina troske također lako odvojila (Slika 6.11).



Slika 6.10 Odvojena troska nakon drugog zavora

Zatim su se žičanom četkom kompletno očistili zavori od troske i tragova oksidacije kao što je vidljivo na slikama 6.12 i 6.13.



Slika 6.11 Očišćen prvi zavar



Slika 6.12 Očišćen drugi zavar

6.4.3. Priprema ispitnog uzorka za promatranje

Sljedeći korak u ovom eksperimentu je bio odrezati obradak na manje dijelove kako bi se lakše rukovalo ispitnim uzorkom tijekom promatranja strukture zavora (Slika 6.14).



Slika 6.13 Rezanje obratka tračnom pilom

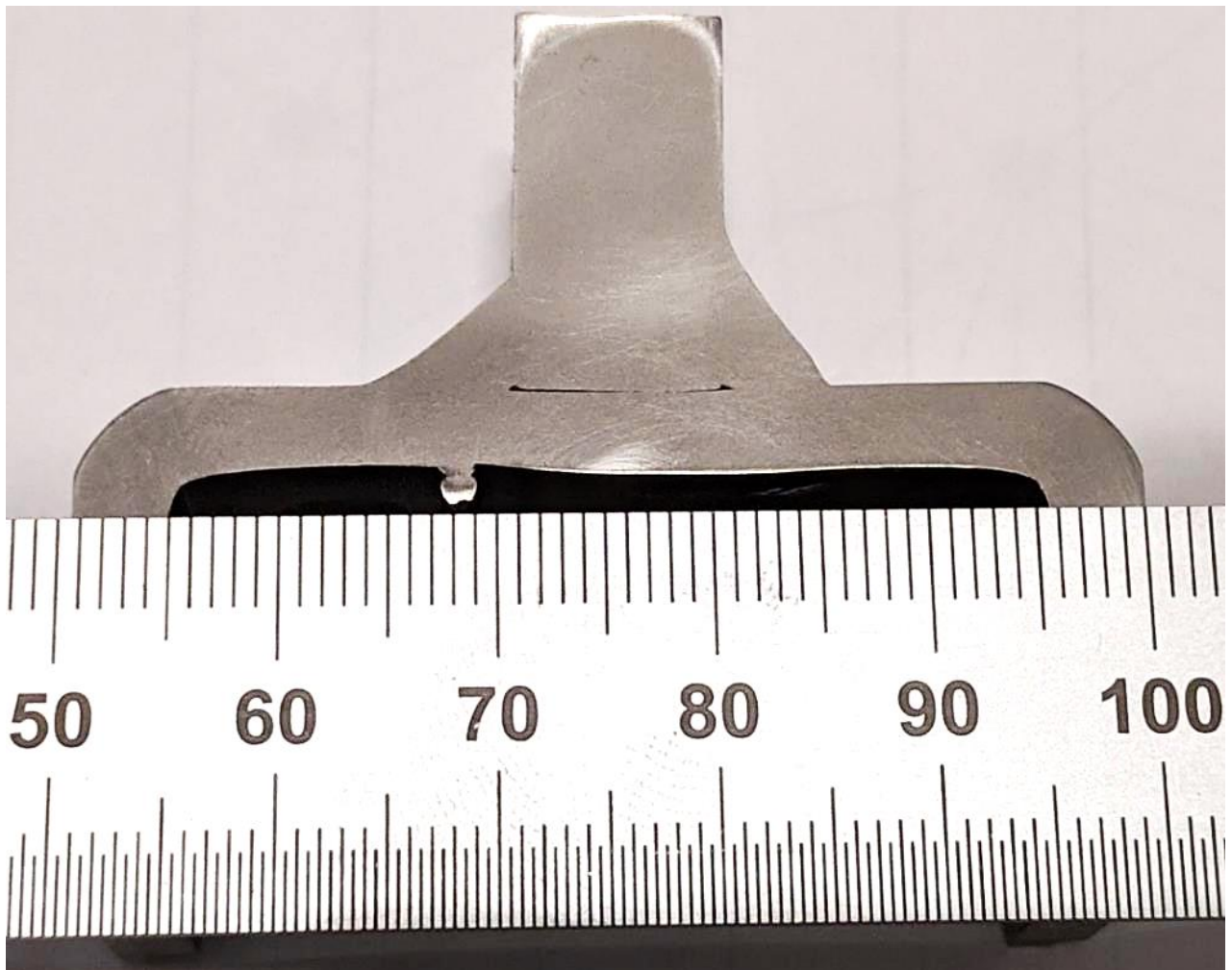
Obradak se tračnom pilom izrezao na tri dijela kako bi se dobio ispitni uzorak širine 15 mm (Slika 6.15).



Slika 6.14 Izrezani ispitni uzorak

Budući da je tračna pila ostavila grubu strukturu površine, slijedilo je poliranje ispitnog uzorka postepenim granulacijama brusnog papira. Brusni papir je stavljen na kolo te je sa donje strane pridržan gumom kako bi se izbjeglo proklizavanje. Na aparatu za poliranje se namjestila brzina 100 okr/min, vrijeme poliranja 5000 s te se pustila voda kao sredstvo podmazivanja tijekom obrade. Proces je započeo brusnim papirom granulacije P180 (ISO 6344). Zatim su redom slijedili P320, P600, P1200 i P2000.

Nakon poliranja se još vršilo elektrokemijsko nagrizanje ispitnog uzorka u 19 % otopini HCl (klorovodične kiseline). Kao napon je služila baterija od 9 V. Negativni pol se spojio na pločicu bakra uronjenu u HCl, a pozitivni pol na ispitni uzorak. Nagrizanje je trajalo 30 s nakon čega je dobivena čista i glatka površina (Slika 6.16)



Slika 6.15 Ispitni uzorak nakon elektrokemijskog nagrizanja

6.4.4. Zapažanja

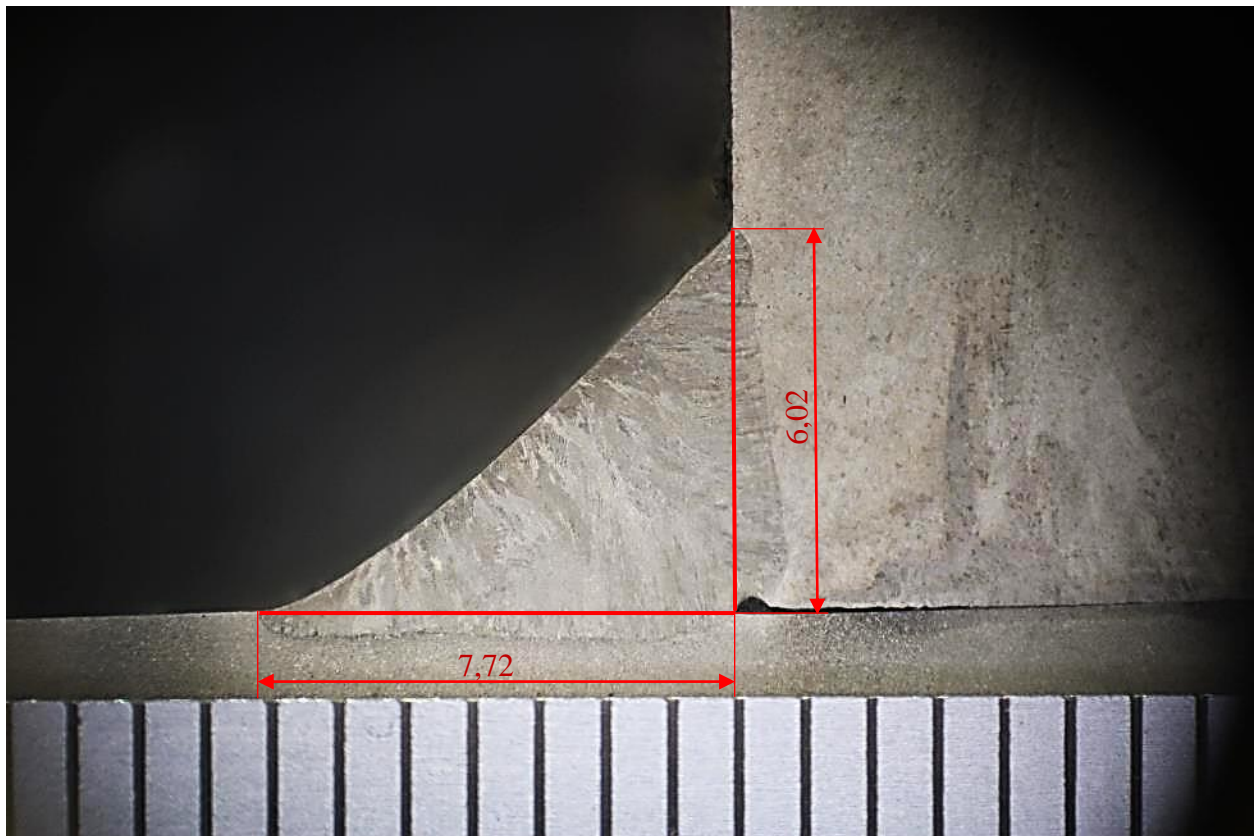
Nakon navedenih procesa ispitni uzorak je bio spreman za promatranje pod mikroskopom. Prvim povećanjem 7 puta su se proučile obje strane zavara. Greške su kategorizirane prema HRN EN ISO 6520-1:2008 - Zavarivanje i srodni procesi – Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima.

Odmah je uočen nedovoljan provar (oznaka greške 402) u korijenu šava što je rezultiralo prazninom između dijelova osnovnog materijala (Slika 6.17).

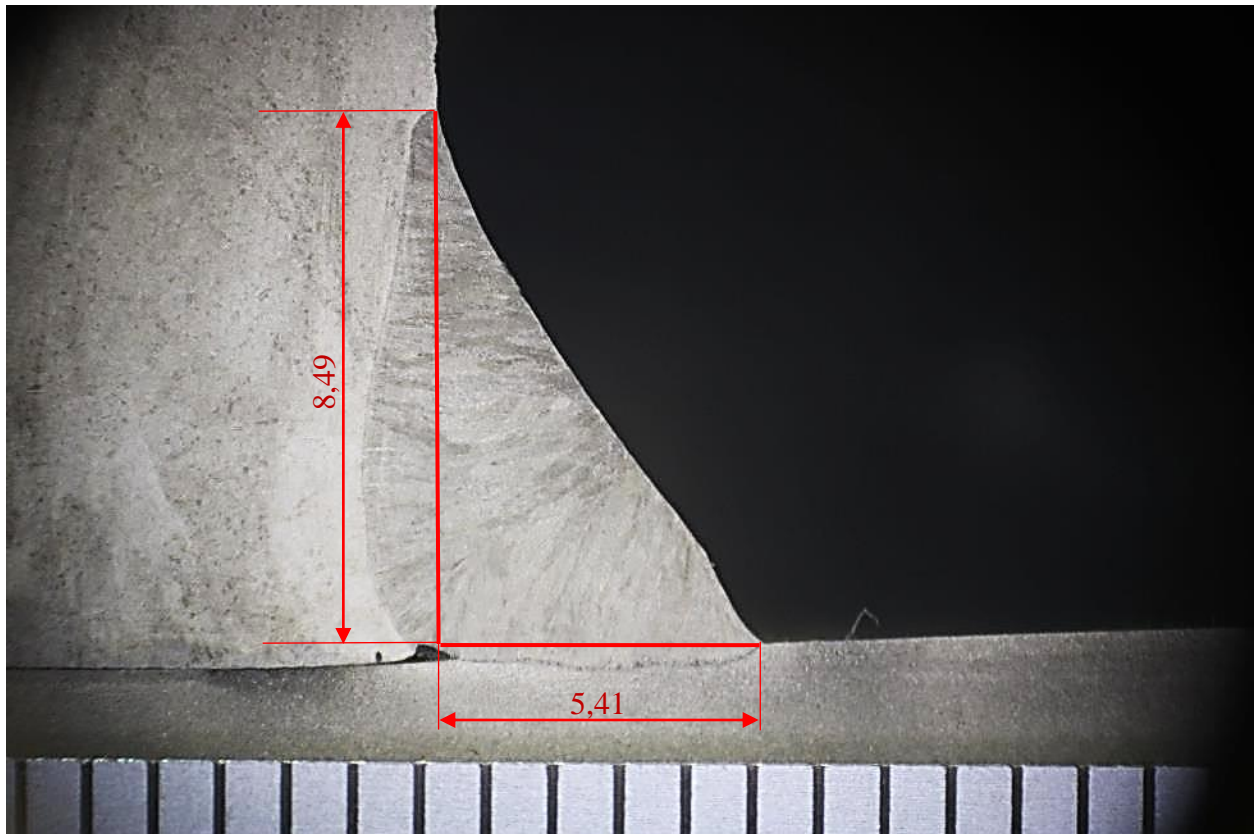


Slika 6.16 Makro prikaz spoja ispitnog uzorka

Također su se kao greške uočile nesimetričnosti lijevog i desnog zavara (oznaka greške 512). U korijenu zavara su vidljivi manji rubni zajedni (oznaka greške 5013). Makroizbrusak lijevog i desnog zavara pod povećanjem 12 puta vidljiv je na slikama 6.18 i 6.19.



Slika 6.17 Makroizbrusak lijevog zavara



Slika 6.18 Makroizbrusak desnog zavara

7. Zaključak

Potreba za nehrđajućim čelicima kao tehničkim materijalima svakodnevno raste. Zastupljeni su gotovo u svakoj industriji, stoga je njihov način spajanja u razne svrhe je od velike važnosti. Kao jedan od takvih glavnih postupaka je zavarivanje. Nisu svi čelici jednako zavarljivi. Kako bi se nadmašile te prepreke potreban je pravilan odabir osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje.

Ukoliko se zavaruju istovrsni nehrđajući čelici, obično je i dodatni materijali jednakog sastava ili nešto više legirani od osnovnog materijala. Preveliko odstupanje uglavnom dovodi do nastanka korozije ili nekog drugog problema. Prilikom zavarivanja gdje se spajaju različiti osnovni materijali, treba dobro pripaziti kod odabira dodatnih materijala i postupka zavarivanja.

Ovisno o postupku zavarivanja, osnovnom materijalu i odabiru dodatnog materijala, ako nema potrebe za specijalnim svojstvima spoja, neki postupci nisu preporučljivi radi praktičnosti izvedbe ili nedostupnog (ujedno i skupog) dodatnog materijala. Takva situacija je i kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika koji uglavnom imaju najšire područje primjene. Za svaki austenitni nehrđajući čelik postoji odgovarajući dodatni materijal, samo što se mnoge vrste proizvode samo kod nekolicine tvrtki. Većina legura dodatnog materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika je dostupna u obliku obloženih elektroda, punih žičanih elektroda, žica s metalnom jezgrom ili prahom punjenih žica.

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada nisu se izbjegle pogreške u zavaru, iako su svi parametri zavarivanja teoretski točno određeni. Manjim povećanjem jakosti struje i točnijim nagibom pištolja prilikom zavarivanja povećala bi se dubina prodiranja dodatnog materijala te se mogla ispraviti simetričnost i oblik zavara. Dakle, pravilnim odabirom osnovnog i dodatnog materijala može se uvelike olakšati postupak zavarivanja nehrđajućih čelika, no ne smije se zanemariti ni bitno iskustvo zavarivača.

Kako bi nehrđajući čelik stvarno ostao nehrđajući nakon zavarivanja, ovisno o uvjetima u kojima se primjenjuje, treba ga povremeno očistiti odgovarajućim metodama.



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Dominik Hrman pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom „Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Dominik Hrman

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Dominik Hrman neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom „Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika“ čiji sam autor.

Student:
Dominik Hrman

(vlastoručni potpis)

8. Literatura

- [1] IRT3000, „Nehrđajući dodatni materijali - izazov ili klasika“, 23.02.2018., https://irt3000.si/hr/vijesti/2018022307401673/neh%C4%91aju%C4%87i_dodatni_materijali__izazov_ili_klasika/, dostupno 12.09.2021.
- [2] Zavarljivost – Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarljivost>, dostupno 12.09.2021.
- [3] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indorf, Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.
- [4] EN 10088-1:2014, Stainless steels - Part 1: List of stainless steels
- [5] V. Š. Prof.dr.sc. Ivan Juraga, „4. SEMINAR - Čelici otporni na koroziju“, FSB, http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4_SEMINAR/1_RAD.pdf, dostupno 14.09.2021.
- [6] Steel Metallurgy | PDF | Heat Treating | Steel, <https://www.scribd.com/document/372705781/Steel-Metallurgy>, dostupno 21.09.2021.
- [7] Steelinex : Stainless steel 1.4301 / AISI 304 | Steelinex, <https://www.steelinox.nl/en/qualities/stainless-steel/1.4301-aisi-304-x5crni18-10>, dostupno 21.09.2021.
- [8] M. Barišić: Svojstva nehrđajućih čelika, Završni rad, VUKA, Karlovac, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:847872>, dostupno 21.09.2021.
- [9] dr.sc.Stjepan Kožuh, SPECIJALNI ČELICI -skripta-, 2010.
- [10] Zavarivanje – Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>, dostupno 21.09.2021.
- [11] M. Gojić, Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2008.
- [12] G. Rihar, M. Uran, i M. Jovanovic, „Remote visual examination of stainless pipelines for pharmaceutical industry“, 8th Int. Conf. Slov. Soc. Non-Destructive Test. Appl. Contemp. Non-Destructive Test. Eng., izd. April, 2005.
- [13] „Steel Bench“. <https://www.lincolnelectric.com/en-au/support/welding-projects/Pages/steel-bench.aspx>, dostupno 14.01.2022.
- [14] Zavarivanje TIG postupkom – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom, dostupno 27.09.2021.
- [15] TIG Welding Stainless Exhaust | Twin Turbo Mustang - YouTube, 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=aH-TelhEhyo>, dostupno 14.01.2022.
- [16] M. Despot, Usporedba mehaničkih svojstava zavarenog spoja kod REL-a koristeći različite dodatne materijale, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:690893>, dostupno 27.09.2021.

- [17] I. Hajdu: Primjena aktivacijskog premaza pri plazma zavarivanju austenitnih čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [18] B. Bauer, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, Doktorski rad, Zagreb, 2006.
- [19] M. Živčić, Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP, FSB, Diplomski rad, Zagreb, 2015.
- [20] I. Garašić: ELEKTROTPORNO ZAVARIVANJE, prezentacija, 2000.
- [21] Problematika podvodnog zavarivanja cjevovoda čelika X70 - PDF Бесплатно скидање, <https://docplayer.rs/206723541-Problematika-podvodnog-zavarivanja-cjevovoda-čelika-x70.html>, dostupno 27.09.2021.
- [22] S. Tandberg, OFFSHORE STRUCTURES FOR THE NORTH SEA HAZ HARDNESS REQUIREMENTS AND PRACTICAL IMPLICATIONS, Weld. Energy-Related Proj., str. 279–287, 1984, doi: 10.1016/B978-0-08-025412-8.50032-2
- [23] B. Mateša, I. Samardžić, i M. Dunder, Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, Slavonski Brod, str. 233–243, 2011.
- [24] Schaeffler-Delong diagram, predicting the phase structure for different... | Download Scientific Diagram, https://www.researchgate.net/figure/Schaeffler-Delong-diagram-predicting-the-phase-structure-for-different-alloys-and_fig1_228624267, dostupno 27.09.2021.
- [25] AISI, A DESIGNERS' HANDBOOK SERIES No9002 WELDING OF STAINLESS STEELS AND OTHER JOINING METHODS, 1988.
- [26] EN ISO 14343:2017, Welding consumables - Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels - Classification
- [27] R. S. Bansode i ostali, „Elektrode Zagreb“, Comput. Ind. Eng., sv. 2, izd. January, str. 6, 2018, <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf><http://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html><https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022><https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper><https://tore.tuhh.de/hand>, dostupno 23.09.2021.
- [28] Elektrode za zavarivanje – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrode_za_zavarivanje, dostupno 27.09.2021.
- [29] A. Šestan, Tehnologija materijala i obrade, Rijeka, 1988.
- [30] D. Hilton, Mig Welding of Stainless Steel, 1985.
- [31] Zaštitni plin – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Zaštitni_plin, dostupno 23.09.2021.

- [32] Stainless Steel in Architectural Applications, PDF,
https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Architectural_Applications.pdf, dostupno 20.01.2021.
- [33] Outokumpu, Handbook of Stainless Steel, str. 1–89, 2013,
<http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>, dostupno 18.01.2022.
- [34] Čišćenje i održavanje površina inox-nehrđajućih-korozijски postojanih čelika,
<https://strojopromet.com/ciscenje-i-odrzavanje-povrsina-inox-nehrdajucih-korozijски-postojanih-celika/>, dostupno 13.01.2022.

Popis slika

<i>Slika 2.1 Proces pasivizacije [3]</i>	2
<i>Slika 2.2 Schaefflerov strukturni dijagram [3]</i>	3
<i>Slika 2.3 Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3]</i>	4
<i>Slika 2.4 Shematski prikaz utjecaja udjela nikla na proširivanje austenitnog područja kod austenitnih nehrđajućih čelika [5]</i>	6
<i>Slika 2.5 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [3]</i>	7
<i>Slika 2.6 Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [3]</i>	10
<i>Slika 2.7 Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [3]</i>	11
<i>Slika 2.8 Mikrostruktura precipitacijski očvrnutog nehrđajućeg čelika [3]</i>	12
<i>Slika 3.1 Prikaz zavarenog spoja i njegovih dijelova [2]</i>	13
<i>Slika 3.2 Zavarivanje taljenjem [11]</i>	14
<i>Slika 3.3 Zavarivanje pritiskom [11]</i>	15
<i>Slika 3.4 Primjer oksidacije [10]</i>	16
<i>Slika 3.5 Okvirni prikaz promjene boje oksidnog sloja povećanjem temperature [12]</i>	17
<i>Slika 3.6 Mikrostruktura zavara feritnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]</i>	18
<i>Slika 3.7 Mikrostruktura zavara austenitnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]</i>	19
<i>Slika 3.8 Mikrostruktura zavara martenzitnog čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]</i>	19
<i>Slika 3.9 Mikrostruktura zavara dupleks čelika, osnovni metal desno, ZUT lijevo [12]</i>	20
<i>Slika 3.10 Shematski prikaz MIG/MAG postupka i zavarivanja praškom punjenom žicom [4]</i> ..	21
<i>Slika 3.11 Klupa od nehrđajućeg čelika zavarena MIG postupkom [13]</i>	21
<i>Slika 3.12 Shematski prikaz TIG zavarivanja [14]</i>	22
<i>Slika 3.13 Primjer TIG zavarivanja ispušne cijevi od nehrđajućeg čelika [15]</i>	22
<i>Slika 3.14 Shematski prikaz REL zavarivanja [16]</i>	23
<i>Slika 3.15 Shematski prikaz plazma zavarivanja [17]</i>	23
<i>Slika 3.16 Shematski prikaz laserskog zavarivanja [18]</i>	24
<i>Slika 3.17 Shematski prikaz EPP zavarivanja [19]</i>	24
<i>Slika 3.18 Shematski prikaz elektrootpornog zavarivanja [20]</i>	24
<i>Slika 3.19 Moguća mjesta pojava pukotina [21]</i>	25
<i>Slika 3.20 Prikaz vodikom uzrokovanih hladnih pukotina u zavaru [22]</i>	26
<i>Slika 4.1 Schaeffler-DeLongov dijagram [24]</i>	27
<i>Slika 4.2 Prikaz asortimana dodatnog materijala tvrtke Lincoln Electric [11]</i>	28
<i>Slika 4.3 Prikaz sastava obložene elektrode [28]</i>	34
<i>Slika 4.4 Zaštitni plin kod MIG / MAG [31]</i>	38

<i>Slika 5.1 Krov Chrysler zgrade izrađen od nehrđajućeg čelika [32]</i>	40
<i>Slika 5.2 Prikaz pojedinih površinskih nepravilnosti: a) oksidacija uz zavar b) kontaminacija željezom c) nedovoljno taljenje prilikom zavarivanja [33]</i>	41
<i>Slika 6.1 Ispitni uzorci nehrđajućeg čelika X5CrNi18–10</i>	44
<i>Slika 6.2 Praškom punjena žica 308L</i>	45
<i>Slika 6.3 Varmig 230 Supermig izvor struje za zavarivanje</i>	46
<i>Slika 6.5 Rail Bull automat za pravocrtno zavarivanje</i>	48
<i>Slika 6.6 Tračna pila THOMAS 210S</i>	49
<i>Slika 6.7 Stroj za poliranje MINITECH 250 SP1</i>	49
<i>Slika 6.8 Osnovni materijal pripojen u PA položaju</i>	50
<i>Slika 6.9 Namještanje automata za zavarivanje u PA položaju</i>	50
<i>Slika 6.10 Odvojena troska nakon prvog zavara</i>	51
<i>Slika 6.11 Odvojena troska nakon drugog zavara</i>	52
<i>Slika 6.12 Očišćen prvi zavar</i>	52
<i>Slika 6.13 Očišćen drugi zavar</i>	52
<i>Slika 6.14 Rezanje obratka tračnom pilom</i>	53
<i>Slika 6.15 Izrezani ispitni uzorak</i>	53
<i>Slika 6.16 Ispitni uzorak nakon elektrokemijskog nagrizanja</i>	54
<i>Slika 6.17 Makro prikaz spoja ispitnog uzorka</i>	55
<i>Slika 6.18 Makroizbrusak lijevog zavara</i>	56
<i>Slika 6.19 Makroizbrusak desnog zavara</i>	56

Popis tablica

<i>Tablica 2.1 Primjer pojedinih vrsta feritnih nehrđajućih čelika [3]</i>	5
<i>Tablica 2.2 Primjeri austenitnih čelika i njihova svojstva [7]</i>	9
<i>Tablica 3.1. Karakteristike i svojstva nehrđajućih čelika [12]</i>	17
<i>Tablica 4.1 Preporuka DM prema OM austenitnih nehrđajućih čelika [25]</i>	30
<i>Tablica 4.2 Preporuka DM prema OM feritnih nehrđajućih čelika [25]</i>	31
<i>Tablica 4.3 Preporuka DM prema OM martenzitnih nehrđajućih čelika [25]</i>	32
<i>Tablica 4.4 Preporučeni dodatne materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika [30]</i>	37
<i>Tablica 4.5 Zaštitni plinovi s obzirom na postupak zavarivanja [30]</i>	39
<i>Tablica 5.1 Primjer preventivnih metoda korodiranja tvrtke Strojopromet [34]</i>	43
<i>Tablica 6.1 Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNi18–10</i>	44
<i>Tablica 6.2 Kemijski sastav dodatnog materijala 308L</i>	45
<i>Tablica 6.3 Tehničke specifikacije Varmig 230 Supermig aparata za zavarivanje</i>	47
<i>Tablica 6.4 Parametri zavarivanja</i>	51