

Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju nehrđajućih čelika

Golubić, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:915688>

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

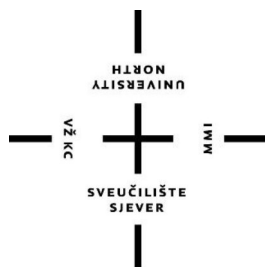
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





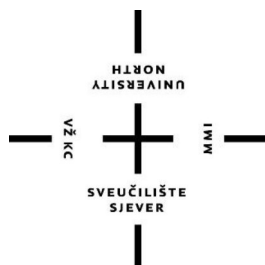
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 336/PS/2020

**Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju nehrđajućih
čelika**

Mihael Golubić, 2107/336

Varaždin, listopad 2020. godine



Sveučilište Sjever

Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 336/PS/2020

Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju nehrđajućih čelika

Student

Mihael Golubić, 2107/336

Mentor

Matija Bušić, doc. dr. sc.

Varaždin, listopad 2020. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Mihael Golubić

MATIČNI BROJ 0336021172

DATUM 2020

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Selection of shielding gases for TIG welding of stainless steels

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Zlatko Botak
2. doc.dr.sc. Matija Bušić
3. prof.dr.sc. Živko Kondić
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki
5. _____

Zadatak završnog rada

BROJ 336/PS/2020

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti tehnologiju TIG zavarivanja. Potrebno je proučiti i opisati izvore struje i opremu koja se koristi za TIG zavarivanje. Potrebno je na temelju dostupnih normi opisati preporuke za oblikovanje spojeva koji se zavaruju ovom tehnologijom. Ustanoviti vrste pogrešaka koje se najčešće pojavljuju nepravilnim izvođenjem TIG zavarivanja. Detaljno opisati vrste nehrđajućih čelika i njihova svojstva i primjenu. Opisati problematiku zavarivanja i svojstva zavarenih spojeva nehrđajućih čelika. Opisati vrste zaštitnih plinova za TIG zavarivanje i posebno obraditi zaštitne plinove koji se koriste za nehrđajuće čelike. Donijeti vlastiti zaključak o prikladnosti pojedinih zaštitnih plinova za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

ZADATAK URUČEN

22. 10. 2020.



M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na iskazanom povjerenju i vodstvu tokom izrade ovog rada.

Također bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali kroz pisanje ovog rada i sve godine studiranja.

Sažetak

U ovom radu će se govoriti o nehrđajućim čelicima, njihovim vrstama, za što se primjenjuju pojedine vrste nehrđajućih čelika, njihovoj zavarljivosti, TIG zavarivanju i opremi koja je potrebna za ovaj postupak te o prednostima i nedostacima tog postupka. Kako se nehrđajući čelici najviše zavaruju TIG postupkom, govorit će se o nekim specifičnostima kod zavarivanja nehrđajućih čelika i odabiru zaštitnog plina. Kako bi se osigurala sigurnost i nosivost spoja govorit će se o mogućim greškama koje se javljaju u samom spoju te kakve sve vrste spojeva postoje i gdje se pojedini spoj primjenjuje.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, nehrđajući čelik, zaštitni plinovi

Summary

In this paper we will discuss about stainless steels, their types, their application and their weldability. Then we will talk about TIG welding and the equipment needed for this process, advantages and disadvantages of this process. As stainless steels are mostly welded by the TIG process, we will talk about some specifics in the welding of stainless steels and the choice of shielding gas. In order to ensure the safety of the welded joint, we will talk about possible errors that may occur in the joint and what kind of joints are used in welding.

Key words: TIG welding stainless steel, shielding gas

Pregled korištenih oznaka i kratica

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
T	mm	Debljina materijala
R_m	MPa	Max vlačna čvrstoća
$R_{p0.2}$	MPa	Granica elastičnosti
M_s	°C	Temperatura početka stvaranja martenzita pri „dubokom“ hlađenju
M_d	°C	Temperatura početka stvaranja martenzita pri hladnom deformiranju
Q	l/mm	Protok plina
d_{DM}	mm	Promjer dodatnog materijala
d_e	mm	Promjer elektrode
v_{pel}	mm/s	Brzina pomicanja električnog luka
v_z	m/h	Brzina zavarivanja

AC - Izmjenična struja

Ar - Argon

DC - Istosmjerna struja

H - Vodik

He - Helij

MIG - Metal Inert Gas

N - Dušik

TIG - Tungsten Inert Gas

ZT - Zona taljenja

ZUT - Zona utjecaja topline

CO₂ - Ugljikov dioksid

O₂ - Kisik

Ni - Nikal

Cr - Krom

Mo - Molibden

Ti - Titanij

Nb - Niobij

S - Sumpor

Cu - Bakar

Mn - Mangan

WIG - Wolfram Inert Gas

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

VDEh - Verein Deutscher Eisenhüttenleute

HRN - Hrvatske norme

KV - Udarna radnja loma

ELC - Extra Low Carbon

A₅ - Relativno produljenje

HB - Tvrdoća po Brinellu

Sadržaj

1.	Uvod	11
2.	Nehrđajući čelici	12
2.1.	Feritni nehrđajući čelici.....	12
2.2.	Austenitni nehrđajući čelici.....	14
2.3.	Dupleks nehrđajući čelici	18
2.4.	Martenzitni nehrđajući čelici.....	19
2.5.	Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici.....	20
2.6.	Primjena nehrđajućih čelika	20
3.	Zavarljivost nehrđajućih čelika	23
3.1.	Zavarljivost feritnog nehrđajućeg čelika.....	24
3.2.	Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika	24
3.3.	Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika.....	25
3.4.	Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.....	26
4.	TIG zavarivanje	28
4.1.	Oprema za TIG zavarivanja	29
4.2.	Parametri zavarivanja.....	36
4.3.	Primjena TIG zavarivanja	38
4.4.	Specifičnost TIG zavarivanja nehrđajućih čelika.....	39
4.5.	Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju	40
5.	Zavareni spoj	47
5.1.	Vrste zavarenih spojeva	47
5.2.	Greške u zavarenim spojevima.....	51
6.	Zaključak	59
7.	Literatura	61

1. Uvod

Željezo i najčešća legura željeza, čelik, s gledišta korozije su relativno loši materijali jer korodiraju na zraku i u kiselinama. Unatoč tome, postoji skupina legura na bazi željeza, legure željeza – kroma (Fe–Cr), često s dodatkom nikla (Ni), poznate kao nehrđajući čelik, koji ne korodira u morskoj vodi i otporan je na koncentrirane kiseline. Upravo ta jedinstvena univerzalna korisnost, u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima i karakteristikama izrade, daje nehrđajućim čelicima prednost ispred nekih drugih materijala. Upotreba nehrđajućeg čelika je mala u usporedbi s korištenjem ugljičnih čelika, ali pokazuje stalan rast.[1] Postoji više vrsta nehrđajućih čelika koji su navedeni i detaljnije obrađeni u radu.

TIG zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja koji koristi luk između netaljive volframove elektrode i obratka. Postupak se koristi sa zaštitnim plinom, a može se koristiti sa ili bez dodatnog materijala. Zbog visoke kvalitete zavara koji se mogu proizvesti TIG postupkom, postupak je postao nezamjenjivo sredstvo mnogih proizvođača uključujući one u zrakoplovnoj, nuklearnoj i pomorskoj industriji.[2]

Od početka TIG zavarivanja učinjena su mnoga poboljšanja u samom postupku i opremi. Izvori struje za zavarivanje razvijeni su posebno za taj postupak. Razvijeni su pištolji s vodenim i plinskim hlađenjem. Volfram elektrode su legirane s malim količinama aktivnih elemenata poboljšavajući tako pokretanje luka, stabilnost luka i vijek trajanja elektroda. [2]

Nehrđajući čelici najviše se zavaruju TIG postupkom, jer TIG postupak donosi bitne prednosti kao što je zaštita električnog luka i taline kod zavarivanja. O svim specifičnostima i problematici zavarivanja nehrđajućih čelika TIG postupkom govorit će se dalje u radu.

2. Nehrđajući čelici

Pod nehrđajuće čelike ili korozijski postojane čelike podrazumijevaju se čelici s najmanje 12 % kroma (moderni nehrđajući čelici sadrže do 30 % kroma), za razliku od običnog čelika koji brzo oksidira na zraku (oksid je crvene boje) ako nije na neki način zaštićen od korozije. Osim što se može legirati s najmanje 12 % kroma, kako bi čelik bio korozijski postojan (pasivan), mora postojati homogena monofazna feritna, austenitna ili martenzitna mikrostruktura. Ta struktura mora postojati da bi se izbjegla opasnost od nastajanja područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase.[3]

Uz krom otpornost na koroziju može se povećati s dodatkom nikla. Kombiniranjem kroma i nikla mogu se razviti čelici tipa 18/8 (18 % Cr i 8% Ni), koji imaju austenitnu mikrostrukturu, a otporni su na kiseline. Legiranje s molibdenom omogućuje lakšu pasivizaciju te isto tako poboljšava otpornost na koroziju i otpornost na jamičastu koroziju Cr-Ni čelika. Pasivizacija je stanje u koje neki neplemeniti metali (na primjer krom, željezo, nikal, kobalt, volfram, molibden, aluminij) mogu privremeno prijeći, pri čemu postaju korozijski (kemijski) otporni poput plemenitih metala (platina, zlato, srebro). Primjerice, komad željeza pošto je kratko vrijeme bio uronjen u koncentriranu dušičnu kiselinu, postaje netopljiv u sumpornoj kiselini, a iz otopine srebrne soli ne izlučuje metalno srebro, pa željezo tako postaje plemenitije od srebra. Kod legiranja s jakim karbidotvorcima (npr. titanij, niobij) dolazi do legure koja omogućuje izbjegavanje pojave interkristalne korozije. Općenito vrijedi da skupina korozijski postojanih čelika mora sadržavati[3]:

feritotvorce: krom, silicij, aluminij, molibden, niobij, titanij, vanadij;

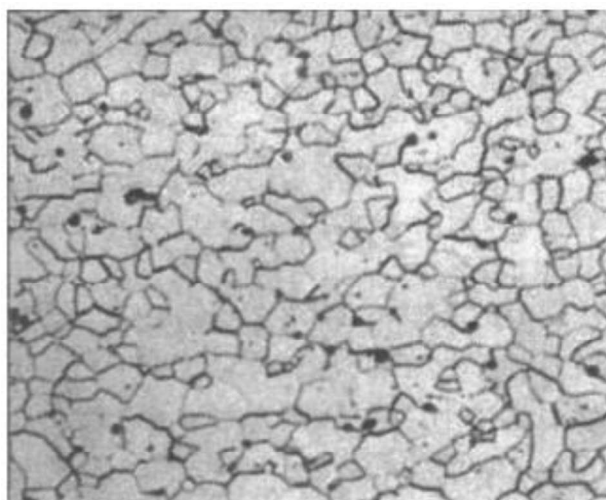
austenitotvorce: nikal, mangan, bakar, (kobalt), dušik.

Prema mikrostrukturi nehrđajuće čelike možemo podijeliti u slijedeće osnovne grupe [4]:

1. feritni nehrđajući čelici,
2. austenitni nehrđajući čelici,
3. austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici,
4. martenzitni nehrđajući čelici i
5. precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici.

2.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici imaju sastav manje od 0,1 % ugljika i 13 do 17 % kroma te zbog toga zadržavaju svoju feritnu mikrostrukturu (slika 1) kod povišenih temperatura, tj. ne mogu se zakaliti jer nemaju sposobnost fazne transformacije i usitnjenja kristalnog zrna [5].



Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3]

Glavna svojstva feritnih nehrđajućih čelika su [5]:

- relativno su 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 nastanka krhke σ -faze (FeCr) pri dugom držanju od 520 do 850 °C,

- mekani su,
- magnetični su,
- teže ih je oblikovati deformiranjem,
- mogu se bolje obraditi obradama odvajanjem čestica od austenitnih čelika,
- imaju slabu postojanost prema kloridnim otopinama (kao što je morska voda),
- relativno su otporni na napetosnu koroziju, čak i u kloridnim otopinama,
- dodatkom Mo umjereno su postojani na rupičastu koroziju,
- nisu otporni na rastaljene metale – aluminij, antimon i olovo, soli i reducirajuće medije ,
- povoljnija cijena u odnosu na ostale nehrđajuće čelike,
- lomljivi su pri niskim temperaturama.

Tablica 1 Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [3]

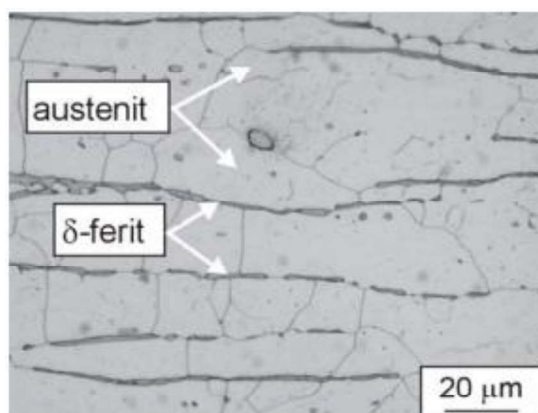
Oznaka čelika VDEh (HRN)	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			Posebna otpornost i primjeri primjene
		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_5 %	

X6 Cr 17 (Č4174)		450-600	270	20	Korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji.
X6 CrMo 17	1,1 Mo	450-650	270	20	Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora.
X8 CrTi 17 (Č4971)	0,7 Ti	450-600	270	20	Kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire.
X8 CrNb 17	0,9 Nb	450-600	270	20	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove).
X8CrMoTi 17	1,75 Mo 0,65 Ti	500-600	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	550	12	Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora.
X12CrMoS17	0,25 Mo 0,20S	700-850	450	12	Za obradbu odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

VDEh je istraživački institut u Düsseldorfu, Njemačka koji sudjeluje u standardizaciji čeličnih proizvoda. U tablicama su navedene njihove oznake za nehrđajuće čelike.

2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici u većini slučajeva sadrže jako malo ugljika (< 0,15 %), te puno nikla i kroma – više od 18 % Cr i 8 % Ni, što omogućuje stvaranje proširene austenitne zone sve do sobne i niske temperature. Može se legirati s molibdenom, titanijem, niobijem, tantalom koji, iako pospješuju nastanak ferita, djeluju stabilizirajuće i umanjuju opasnost od interkristalne korozije. Povišeni maseni udio dušika uvelike povećava čvrstoću materijala i otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju, ali smanjuje deformabilnost i žilavost, tako da se uobičajno ograničuje udio dušika na maksimalno 0,4 %. Na slici 2 je prikazana mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [5].



Slika 2. Mikrostruktura austenitnog čelika AISI 316L [3]

Osnovna svojstva austenitnih čelika su [5]:

- imaju visoku otpornost na koroziju,
- nemagnetični su,
- imaju nisku granicu razvlačenja,
- imaju dobru oblikovljivost u hladnom stanju i imaju mogućnost da očvrstnu prilikom deformiranja,
- dodatnim legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem dobivaju dobru otpornost na puzanje pri temperaturama većim od 600 °C,
- imaju visoku žilavost pri niskim temperaturama,
- otporni su na lužine i soli, te organske i anorganske kiseline,
- podložni su interkristalnoj i napetosnoj koroziji u nekim određenim uvjetima.

Postoje i ELC austenitni čelici, odnosno čelici sa sniženim masenim udjelom ugljika manjim od 0,03 %C. Takvi čelici su otporniji na pojavu interkristalne korozije zbog manje mogućnosti pojave Cr – karbida, ali im je zato snižena čvrstoća i otpornost na puzanje. Zbog manjeg udjela ugljika, zavarljivost i oblikovljivost su znatno poboljšani u takvim čelicima [5].

Tablica 2 Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika s <10% delta ferita u mikrostrukturi [3]

Oznaka čelika		Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20 °C					Posebna otpornost i primjeri primjene
Oznaka čelika prema VDEh	HRN M_s M_d		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	HB	A_5 %	KV,J	
X12 CrNi 18 8	Č4571 $M_s = -58$ °C $M_d = +25$ °C	-	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. Otporan na različite organske i anorganske kisel -ineindustrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X5 CrNi 18 9	Č4580 $M_s = -32$ °C $M_d = +37$ °C	-	700	185	180	50	85	
X10 CrNiTi 18 9	Č4572 $M_s = -72$ °C $M_d = +14$ °C	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez topl. obradbe nakon zavarivanja, -mljekarstvo, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrija filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450°C.
X5 CrNiNb 18 9	Č4571 $M_s = -166$ °C $M_d = -25$ °C	0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu. Otporan prema neoksidirajućim kiselinama i prema točkastoj

X5 CrNiMo 18 10		2,25 Mo	700	205	180	45	85	<p>koroziji uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez topl. obradbe.</p> <p>-industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i pivovare. Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, topl. obradba nakon zavarivanja nepotrebna.</p> <p>-industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase</p>
X10 CrNiMoTi 18 10	Č4571 $M_s = -206$ °C $M_d = -48$ °C	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	

Tablica 3 Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika bez δ -ferita u mikrostruktur [3]

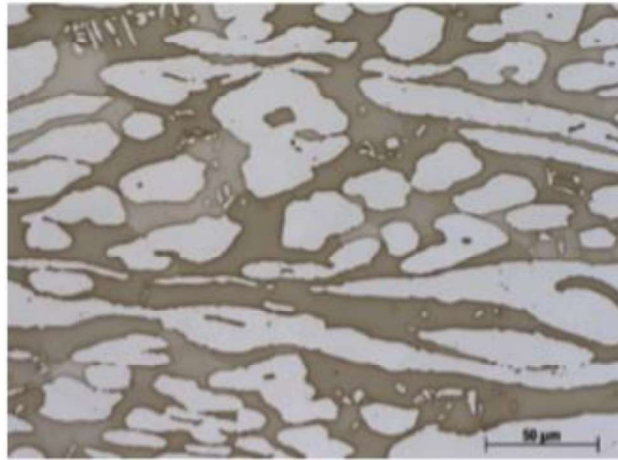
Oznaka čelika	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20 °C					Posebna otpornost i primjeri primjene
		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	HB	A ₅ %	KV,J	
X5 NiCrMoCuNb 20 18	2,25 Mo 2 Cu 0,4 Nb	740	225	190	40	82	<p>Posebno povišena postojanost prema sumpornoj i fosfornoj kiselini</p> <p>- industrija boja, umjetnih vlakana, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe</p> <p>Industrija tekstila, celuloze, boja, fotopribora i kemikalija, plast. masa, gume, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe</p>
X5 CrNiMoTi 25 25	2,25 Mo 0,25 Ti	740	225	190	40	69	

X5 NiCrMoCuNb 22 18	3,25 Mo 0,4 Nb 1,25 Cu	740	275	190	30	105	Industrija boja, plastike i nafte
X5 CrNiNb 18 9	0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu. 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. 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 i plast. mase
X5 CrNiMo 18 10	2,25 Mo	700	205	180	45	85	
X10 CrNiMoTi 18 10	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	

2.3. Dupleks nehrđajući čelici

Čelici iz skupine dupleks nehrđajućih čelika nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego imaju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu sa 40 do 60 % ferita. Na taj način se odstupa od nužnog uvjeta otpornosti na opću koroziju, ali je zato povećana otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju. [5]

Dupleks čelici mogu sadržavati od 22 do 24 % kroma te 6 do 8 % nikla. Kako imaju svoju specifičnu mikrostrukturu, dupleks čelici imaju više problema kod zavarivanja. Najveći problem kod zavarivanja je preveliko unošenje topline i pretvaranje austenita u ferit, čime čelik može postati veoma krhak. Na slici 3 prikazana je mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika.



Slika 3. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [1]

Kako se povisuje temperatura prilikom zavarivanja iznad 500 °C, u porastu je udio ferita, a smanjuje se udio austenita. Zbog toga čelik s 22% kroma i 8% nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu [5].

Osnovna svojstva dupleks nehrđajućih čelika su [5]:

- dobra otpornost na interkristalnu koroziju,
- povećana otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju,
- primjenjuju se do maksimalno 350 °C zbog krhkosti,
- imaju visoku čvrstoću.

2.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Kako bi se zakalili, martenzitni čelici moraju imati više ugljika, većinom između 0,15 i 1,0 % te preko 13 % kroma. Uz to mogu sadržavati i do 2,5 % nikla i 1,3 % molibdena.

Optimalna mehanička svojstva i korozijska otpornost ovih čelika postiže se kaljenjem i naknadnim popuštanjem.

Martenzitni nehrđajući čelici dijele se u dvije skupine [5]:

- konstrukcijski čelici koji sadrže do 0,3 % ugljika i popuštaju se pri povišenim temperaturama
- alatni čelici koji sadrže iznad 0,3 % ugljika i nakon kaljenja se popuštaju na niskim temperaturama i imaju veliku otpornost na abrazivno trošenje. Stvrdnuti alatni čelik s udjelom ugljika većim od 0,3% kaljen je na niskim temperaturama i ima veliku otpornost na habanje. Kako bi se postigao taj cilj, mikrostruktura martenzitnog čelika alata sadrži i karbide koji uvelike

pridonose tvrdoći i otpornosti na habanje. Međutim, to rezultira lošijom otpornošću na koroziju od konstrukcijskog martenzitnog nehrđajućeg čelika.

Martenzitni nehrđajući čelici imaju podosta bolju čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje u odnosu na austenitne i feritne čelike. [5]

2.5. Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici

Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvrnutih čelika (PH-čelici eng. Precipitation Hardenable ili Precipitation Hardened) nastojalo se postići visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Pored niskog masenog udjela ugljika i visokog stupnja legiranosti, visoko očvrnuće postiže se precipitacijom intermetalnih spojeva. [3].

2.6. Primjena nehrđajućih čelika

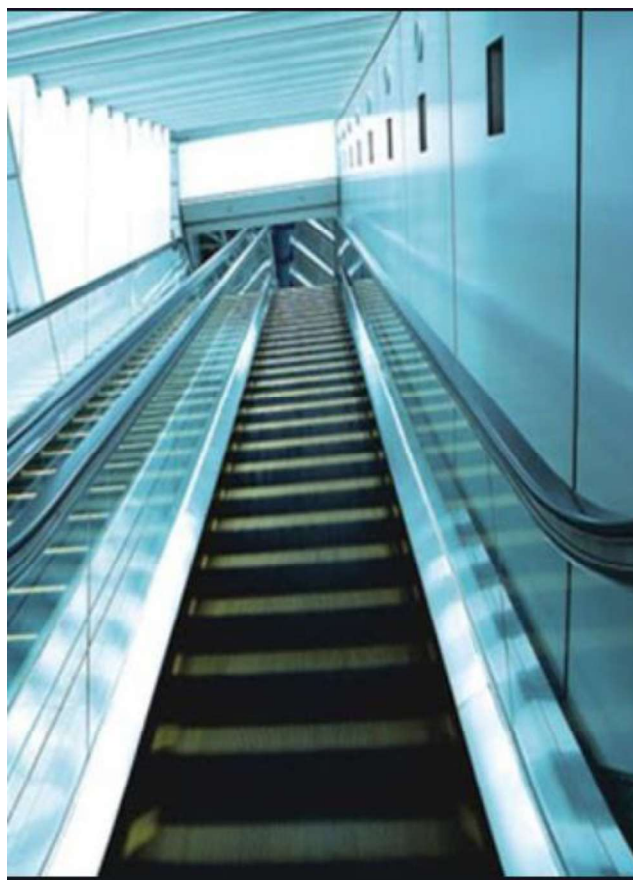
Prije 1980-ih, nehrđajući čelik primjenjivao se za manje građevne komponente poput nad vratnika, zidnih veza i podne ploče. Međutim, u posljednjih 20 godina širi se raspon različitih primjena.[6]

Ostvaren je znatan porast upotrebe nehrđajućeg čelika u primjeni kao što su vodovodna i klimatizacijska oprema, posebno u Skandinaviji, Njemačkoj i Italiji. U Švicarskoj je nacionalno tijelo za norme prihvatilo feritni čelik kao prikladan materijal za vodovod (slika 4). Učinkovite metode spajanja pomoću posebnih ventila smanjuju troškove prilikom instalacije cijevi. Smanjeni troškovi održavanja tijekom životnog ciklusa mogu rezultirati tome da nehrđajući čelik konkurira bakrenim ili čak plastičnim cijevima. [6]



Slika 4. Vodovodne cijevi od nehrđajućeg čelika [7]

U posljednjih 20 godina, značajni projekti infrastrukture i obnove gradova, ponajviše u Kini i Indiji, doveli su do mnogih primjena nehrđajućeg čelika. U zračnim lukama, željezničkim i autobusnim stanicama te trgovačkim centrima, nehrđajući čelik koristi se za krovove, ograde, pregrade, stubišta i pokretne stepenice (slika 5). Sjedala u javnim prostorima, oprema za igrališta i drugi urbani namještaj također se sve češće izrađuje od nehrđajućeg čelika.[6]



Slika 5. Pokretne stepenice od nehrđajućeg čelika [8]

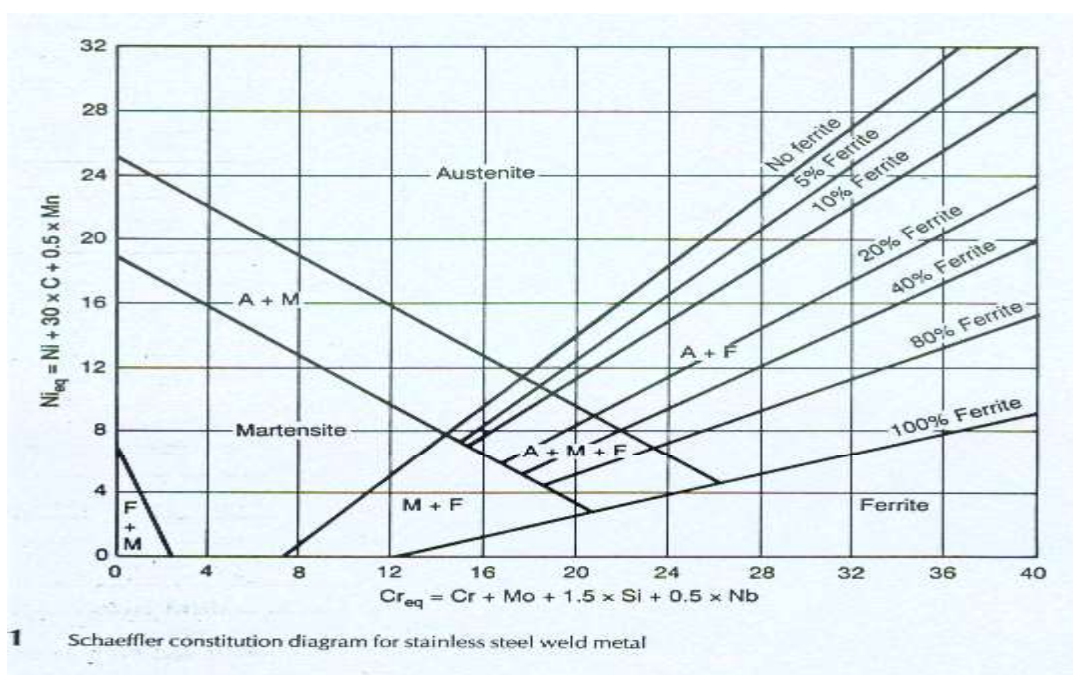
U proizvodnji nuklearne energije postoje brojne primjene nehrđajućeg čelika. Postoje značajne mogućnosti za primjenu nehrđajućih čelika u strukturi zgrade reaktora. Primjerice, postavljanje ploča iz nehrđajućih čelika sa vanjske i unutarnje strane zgrade između kojih se nalazi betonski zid omogućuje brže vrijeme izgradnje nego što bi bio slučaj da se zidovi rade iz armiranog betona. Ostale primjene uključuju reaktorske posude i obloge od nehrđajućeg čelika, tlačne kanale, cijevi za izmjenjivače topline i kondenzatore te obloge spremnika goriva.[6]

Rast potražnje za biogorivima pruža značajne mogućnosti za nehrđajući čelik zbog svoje otpornosti na koroziju. Već se uvelike koristi u izgradnji postojećih industrijskih postrojenja za biogoriva. Tipično postrojenje za biogorivo sastoji se od reaktora, rashladnih naprava, kotlova, procesnih cijevi, procesnih i komunalnih pumpi, spremnika i zavojnica za izmjenu topline, a sve je napravljeno od nehrđajućeg čelika. [6]

3. Zavarljivost nehrđajućih čelika

Smatra se da većina nehrđajućih čelika ima dobru zavarljivost i može ih se zavarivati s nekoliko postupaka zavarivanja, uključujući elektrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, elektronsko i lasersko zavarivanje, zavarivanje trenjem. Za bilo koji od ovih procesa, površine i dodatni materijal ne smiju imati nečistoća na površini. Koeficijent toplinske ekspanzije za austenitne čelike je 50% veći od ugljičnog čelika i to se mora uzeti u obzir za smanjenje izobličenja. Niska toplinska i električna vodljivost austenitnog nehrđajućeg čelika općenito je korisna u zavarivanju. Za zavarivanje je potrebno manje topline, jer se toplina ne provodi dalje od spoja tako brzo kao u ugljičnom čeliku. [9]

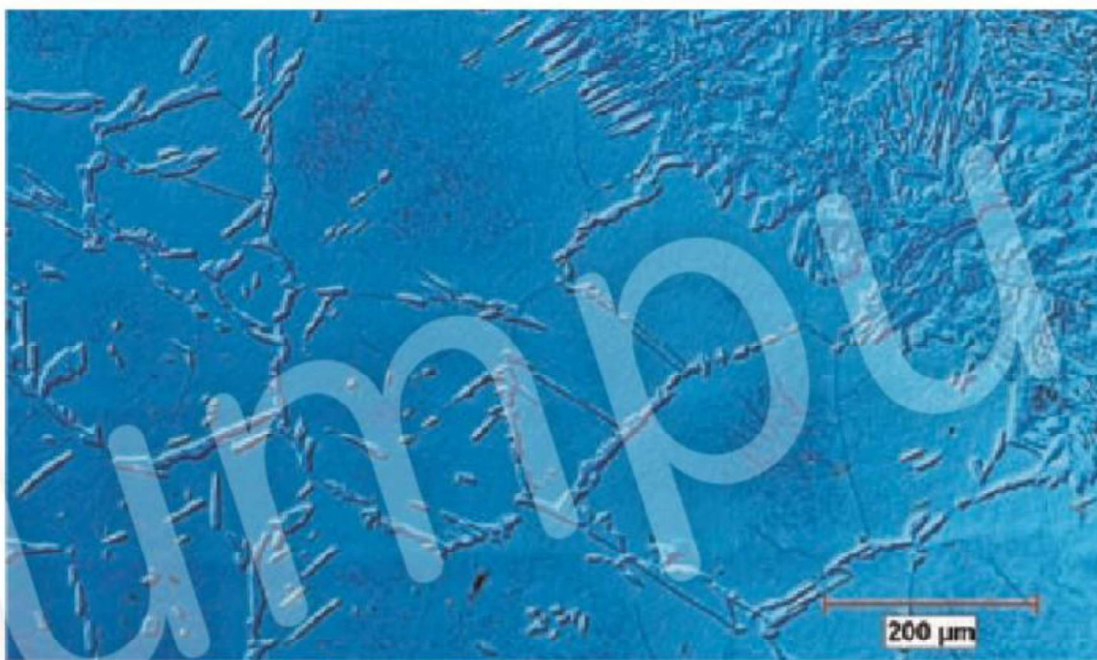
Mikrostruktura prilikom zavarivanja nehrđajućeg čelika u velikoj mjeri ovisi o kemijskom sastavu. Dijagrami Schaeffler-De Long (slika 6) može se upotrijebiti kao gruba procjena mikrostrukture zavara. Brzina hlađenja nakon zavarivanja ima veliki utjecaj na mikrostrukturu zavara.



Slika 6. Schaeffler-ov dijagram za nehrđajuće čelike [10]

3.1. Zavarljivost feritnog nehrđajućeg čelika

Glavno ograničenje kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika u usporedbi s ostalim nehrđajućim čelicima je nedostatak žilavosti u debljim dijelovima. Na svojstva zavara snažno utječu parametri zavarivanja. Poželjno je da se feritni čelici zavaruju minimalnim unosom topline kako bi se spriječio rast zrna u zoni utjecaja topline. Zbog niže toplinske ekspanzije i veće toplinske vodljivosti, izobličenja i izbočenja su tijekom zavarivanja manja u usporedbi s austenitnim ili dupleks nehrđajućim čelikom. Slika 7 prikazuje primjer mikrostrukture u zavarivanju feritnog nehrđajućeg čelika.[1]



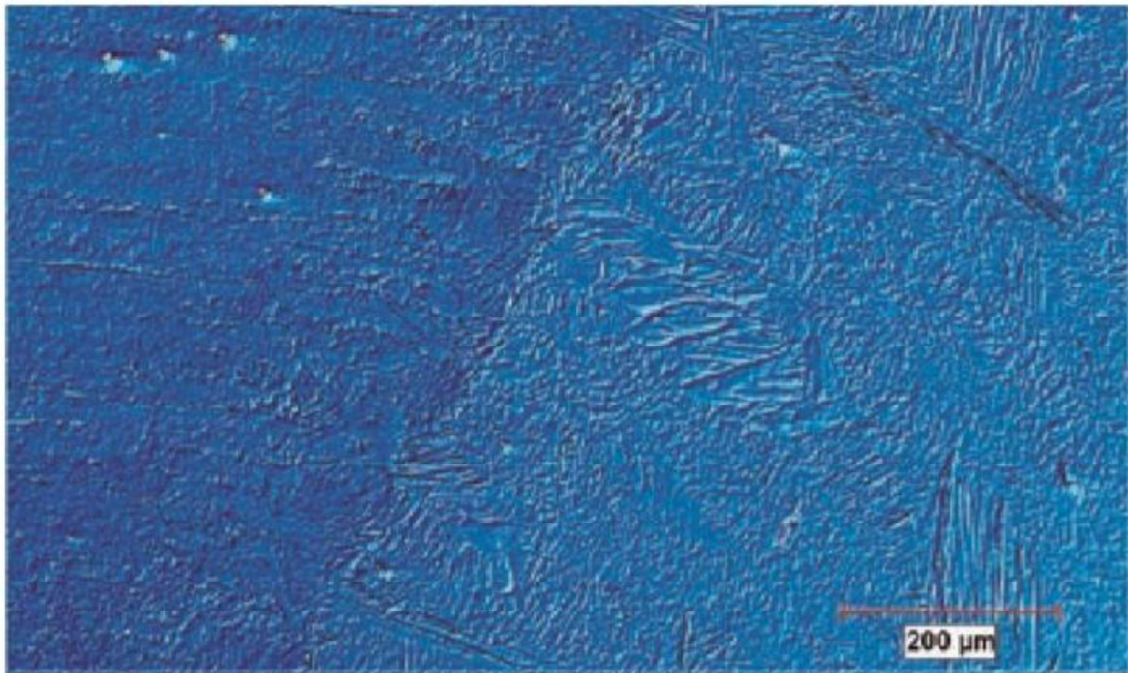
Slika 7. Mikrostruktura zavara feritnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]

3.2. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika

Martenzitni nehrđajući čelik teže je zavariv od ostalih vrsta nehrđajućeg čelika. Bez obzira na prethodno stanje, zavarivanje stvara tvrdnu martenzitnu zonu pored zavara koja je sklona pucanju. Tvrdoća se povećava sa sadržajem ugljika u čeliku i teže se zavaruje. Prisutnost vodika povećava rizik za pojavu hladnih pukotina.[1]

Unatoč tome, martenzitni čelici mogu se uspješno zavariti pod uvjetom da se poduzmu mjere opreza kako bi se izbjegle pukotine u zoni utjecaja topline. Za dobivanje kvalitetnih zavara obično je potrebno prethodno zagrijavanje te zagrijavanje nakon zavarivanja. Ako zagrijavanje prije i nakon zavarivanja nije moguće, za poboljšanje duktilnosti može se koristiti austenitni ili dupleks dodatni materijal.

Slika 8 prikazuje primjer mikrostrukture u zavaru martenzitnog čelika. [1]

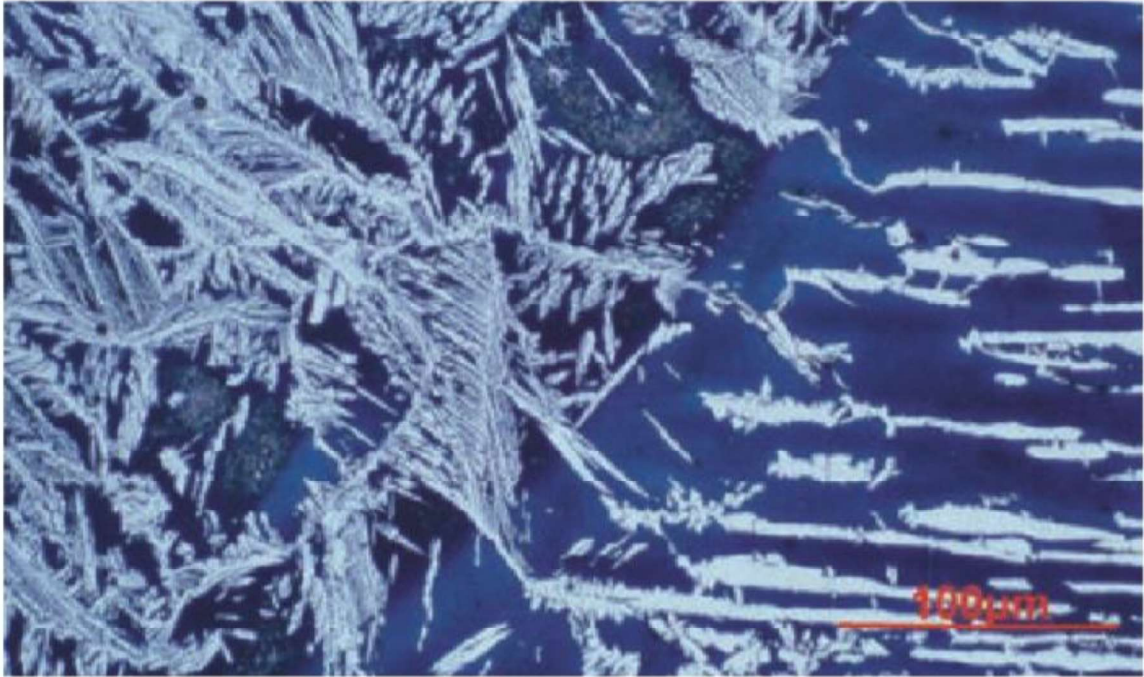


Slika 8. Mikrostruktura zavara martenzitnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]

3.3. Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika

Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika bolja je od zavarljivosti feritnih nehrđajućih čelika, ali nije tako dobra kao kod austenitnih čelika. Moderni dupleks čelici sa značajnim sadržajem dušika lako se mogu zavarivati.[1]

Parametri zavarivanja snažno utječu na svojstva zavara. Dupleks nehrđajući čelici učvršćuju se u potpunosti feritnom strukturom s austenitnom jezgrom. Koristi se dodatni materijal s većim sadržajem nikla kako bi se stvorila fazna ravnoteža slična onoj u osnovnom materijalu. Autogeno zavarivanje (bez dodatnog materijala) općenito se ne preporučuje za dupleks čelike. Slika 9 prikazuje primjer mikrostrukture u dupleksnom zavaru.[1]



Slika 9. Mikrostruktura zavora dupleks čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]

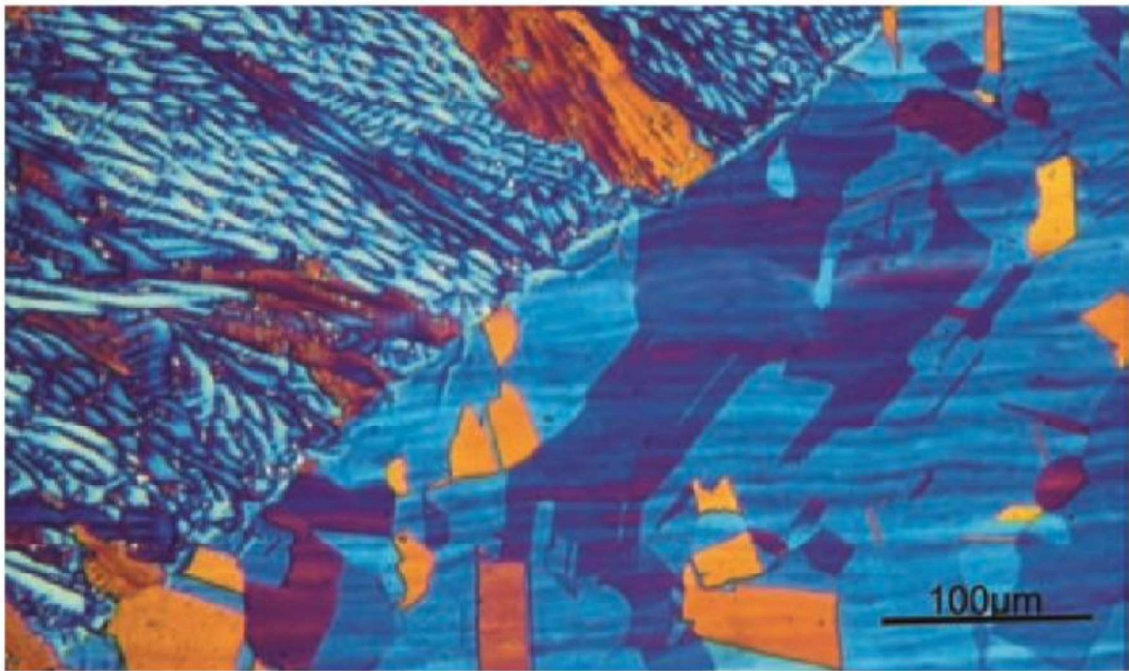
3.4. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelici imaju općenito izvrsna svojstva za zavarivanje. Razina unosa topline za najčešće austenitne čelike može biti i do 2,5 kJ / mm. Ako se zavarivanje provodi na stabiliziranim ili potpuno austenitnim čelicima, mogu biti potrebne nešto niže razine unosa topline kako bi se izbjegle pukotine (< 1,5 kJ / mm). Austenitni čelici imaju oko 50% veću toplinsku ekspanziju u odnosu na feritne i dupleks čelike, što znači da zbog zavarivanja mogu biti veće deformacije i veća naprežanja pri skupljanju.[1]

Dodatni materijal u većini slučajeva legiran je kromom, niklom i molibdenom da bi se povećala otpornost na koroziju.[1]

Austenitni čelici legirani manganom, Cr-Mn čelici imaju relativno visoku čvrstoću. Ovi čelici pokazuju niži stupanj zavarivanja od standardnih Cr-Ni skupina, uglavnom jer su osjetljiviji na vruće pukotine, odnosno pukotine u zavaru nastale tijekom skrućivanja.

Slika 10 prikazuje primjer mikrostrukture u austenitnom čeliku nakon zavarivanja.[1]



Slika 10. Mikrostruktura zavora austenitnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]

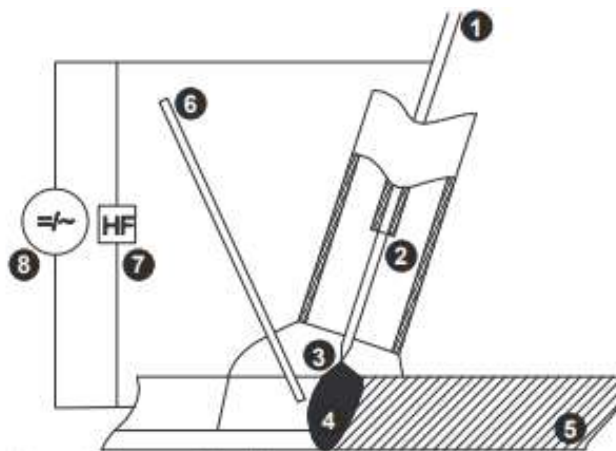
4. TIG zavarivanje

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). [11]

Oznaka TIG postupka zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063 je:[12]

- 141 za zavarivanje s žicom kao dodatnim materijalom
- 142 autogeno TIG zavarivanje
- 143 za zavarivanje s praškom punjenom žicom
- 145 za zavarivanje s reducirajućim plinom i žicom kao dodatnim materijalom
- 146 za zavarivanje s praškom punjenom žicom i reducirajućim plinom
- 147 za zavarivanje s aktivnim plinom (TAG zavarivanje)

Kod TIG postupka zavarivanja električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Rastaljeni materijal, ZUT i volframova elektroda zaštićeni su inertnim plinom. Proces zavarivanja može se izvoditi s primjenom dodatnog materija ili bez njega. Shematski prikaz TIG procesa zavarivanja prikazan je slikom 11 [11]



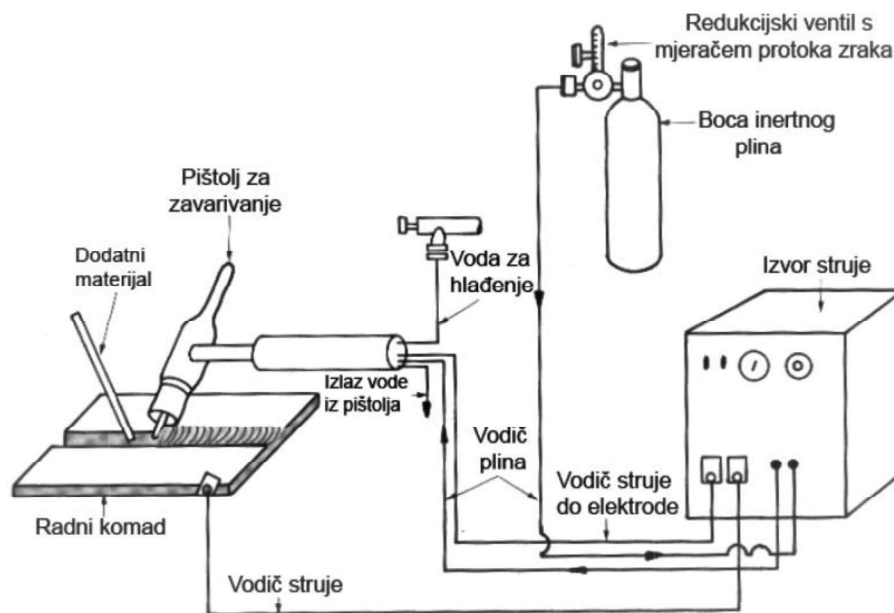
Slika 11. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [11]

- 1 – netaljiva elektroda,
- 2 – sapnica gorionika,
- 3 – električni luk,
- 4 – rastaljeni materijal,
- 5 – osnovni materijal,
- 6 – dodatni materijal,
- 7 – visokofrekventni generator,
- 8 – izvor struje.

Netaljiva elektroda služi isključivo za uspostavu električnog luka. Netaljiva elektroda svojom geometrijom može utjecati na karakteristiku električnog luka. Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus pola) malih su duljina, a sastoje se od oblaka iona koji udaraju u anodu tj. katodu te oslobađaju određenu količinu energije (topline). Područje stupa električnog luka, tj. njegova duljina, ovisi o naponu luka i obično odgovara promjeru elektrode. Temperatura koja nastaje tijekom TIG zavarivanja ovisi o osnovnim parametrima zavarivanja, vrsti zaštitnog plina i vrsti podloge, a može doseći više od 20 000 ° C na osi plazme luka.[11]

4.1. Oprema za TIG zavarivanja

Osnovni dijelovi od kojih se sastoji uređaj za ručno TIG zavarivanje su: izvor struje, sustav za dovod zaštitnog plina, pištolj za zavarivanje, volframova netaljiva elektroda. [2] Slika 12 prikazuje shematski prikaz TIG uređaja.

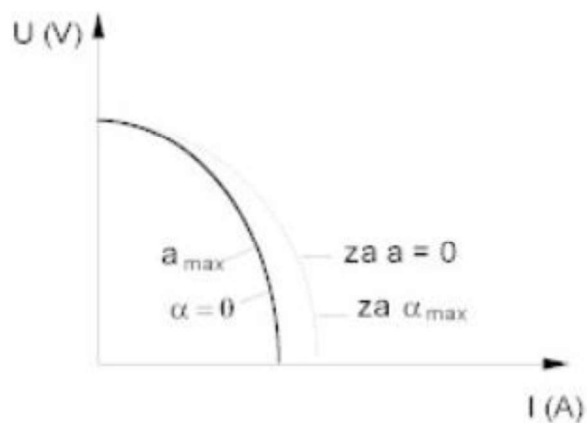


Slika 12. Shematski prikaz TIG uređaja [13]

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motorgeneratori i transformatori. Izbor vrste izvora struje ovisi uglavnom o tome što će se zavarivati. Izvor struje za ručno zavarivanje treba imati strmo padajuću statičku karakteristiku da se osigura približno konstantna struja zavarivanja, neovisno o promjenama

dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača. Kod mehaniziranog zavarivanja gdje je osigurana konstantna dužina električnog luka mogu se primijeniti i izvori s ravnom karakteristikom.[14]

Slika 13. prikazuje strmu karakteristiku izvora struje.



Slika 13. Karakteristika izvora struje [15]

Budući da se uspostavljanje električnog luka kratkim spojem kod TIG postupka izbjegava, izvori su dodatno opremljeni posebnim visokonaponskim visokofrekventnim generatorima. Kratak spoj volframove elektrode i radnog komada s jedne strane oštećuje vrh pa je stabilnost luka smanjena, a s druge strane dolazi do uključivanja volframa u osnovni materijal s nepovoljnim posljedicama po mehanička svojstva spoja. Da bi se uspostavio električni luk bez kontakta između vrha elektrode i radnog komada mora postojati vrlo visoki napon koji će omogućiti početnu ionizaciju. Visoki napon je nepoželjan s gledišta sigurnosti. Međutim, taj visoki napon visoke frekvencije od nekoliko MHz, zbog skin efekta nije opasan za radnika. Takav poseban izvor visokofrekventnog napona, neposredno smješten u sam izvor struje zavarivanja, paralelno je spojen u krug struje zavarivanja osiguravajući uspostavljanje električnog luka. [14]

U novije doba se proizvode i primjenjuju TIG uređaji kod kojih je moguće ostvariti impulse struje prema potrebi. Struja zavarivanja varira između maksimalne vrijednosti kad se tali osnovni materijal i minimalne kad se još održava stabilan električni luk.[14]

Slika 14. prikazuje uređaj izvora struje za TIG zavarivanje



Slika 14. Uređaj izvora struje za TIG zavarivanje [16]

Pištolj kod TIG zavarivanja drži elektrodu i pruža sredstva za dovod zaštitnog plina do zavara. Većina pištolja dizajnirana je za različite veličine elektroda te razne vrste i veličine sapnica. Pištolji su razvrstani u skladu s maksimalnom strujom zavarivanja koja se može koristiti bez pregrijavanja.

Većina pištolja za ručnu primjenu dizajnirana je s kutom glave (kut između elektrode i ručke) od približno 120°. Dostupni su i pištolji s glavom gdje se kut može podesiti, glava s kutem od 90° ili glava bez kuta (vrsta olovaka). Ručni TIG pištolji često su opremljeni pomoćnim prekidačima i ventilima pričvršćenim na ručici pištolja ili nožnom papučicom za kontrolu struje i protoka plina. [2]

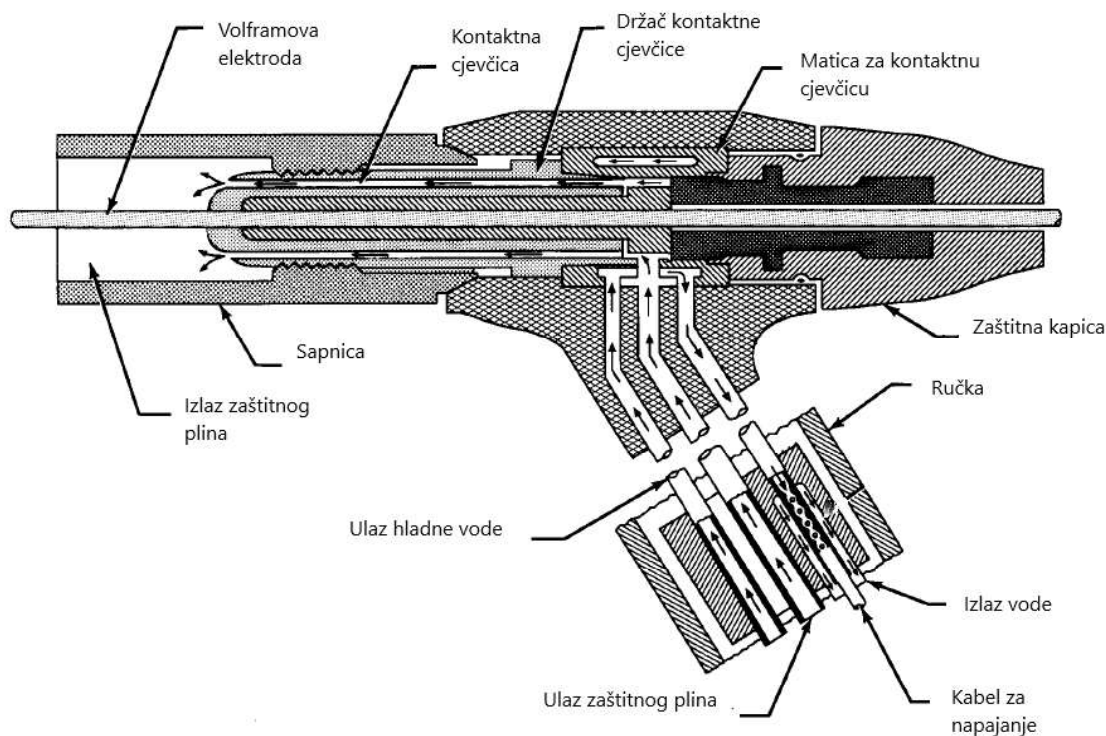
Postoje dvije skupine pištolja za TIG zavarivanje[2]:

1. Pištolji bez hlađenja rashladnom tekućinom,
2. Pištolji s hlađenjem rashladnom tekućinom.

Pištolji koji se hlade bez rashladne tekućine se hlade hladnim zaštitnim plinom koji izlazi iz sapnice. Takve elektrode primjenjuju se za struje zavarivanja do 200 ampera.[2]

Pištolji koji koriste rashladnu tekućinu (slika 16.) za hlađenje, koriste vodu koja prolazi kroz kanale u dršci pištolja. Voda za hlađenje dolazi kroz cijev za dovod tekućine, procirkulira kroz pištolj te se vraća natrag kroz cijev za odvod tekućine. Kabel za napajanje smješten je u crijevu za odvod vode kako bi se osigurala hladna voda za hlađenje pištolja, a prilikom povratka se hladi kabel za napajanje. Ovakvi pištolji dizajnirani su za veće struje zavarivanja nego pištolji slične veličine koji se hlade plinom. Tipične struje zavarivanja koje se primjenjuju kod ovakve izvedbe pištolja su u rasponu od 300 do 500 ampera, iako postoje neke izvedbe koje omogućuju primjenu

struja jakosti i do 1000 ampera. Većina mehaniziranih i automatiziranih primjena zavarivanja koristi pištolje sa rashladnom tekućinom. Većinom se za rashladnu tekućinu koristi voda ali može se s vodom umiješati antifriz kako ne bi došlo do smrzavanja ili korozije, a uz to antifriz podmazuje sve potrebne dijelove ako se radi o zatvorenom sustavu gdje se koristi pumpa, spremnik i radijator za odvod topline.[2]



Slika 15. Prikaz pištolja s vodenim hlađenjem u presjeku [2]

Zaštitni plin usmjerava se na zonu zavarivanja sapnicom koja se nalazi na vrhu pištolja. Također su ugrađeni u tijelo pištolja difuzori koji doziraju zaštitni plin u sapnicu. Namjena difuzora je da pomogne u stvaranju laminarnog toka kod izlaza plina. Sapnice za plin izrađene su od raznih materijala koji imaju veliku otpornost na toplinu te su različitih oblika, promjera i duljina. Sapnice se pričvrste na pištolj ili ih drži sila trenja. [2]

Sapnice su izrađene od raznih keramičkih materijala, obično od glinice visoke čvrstoće, metala, metalom obložene keramike, fuzijskog kvarca ili drugih materijala. Keramičke sapnice (slika 17) su najjeftinije i najviše se primjenjuju, ali su krhke i moraju se zamijeniti ako napuknu. Sapnice od fuzijskog kvarca su prozirne i omogućuju bolji pregled luka i elektrode. Međutim, zagađenje metalnim isparavanjima kod zavarivanja može uzrokovati da sapnice od fuzijskog kvarca postanu neprozirne a uz to krhke. Metalne sapnice s vodenim hlađenjem traju

dulje i koriste se uglavnom za mehanizirane i automatske primjene zavarivanja kod kojih se koriste velike struje zavarivanja. [2]



Slika 16. Sapnice za TIG zavarivanje iz glinice[17]

Plinska sapnica mora biti dovoljno velika da osigura pokrivanje taline i okolnog zagrijanog materijala kod zavarivanja. Promjer sapnice mora biti prikladan za volumen zaštitnog plina koji je potreban za zaštitu i u vjetrovitim slučajevima. Između promjera sapnice i protoka postoji osjetljiva ravnoteža. Ako je protok kod određenog promjera prekomjeran, učinkovitost zaštite je smanjena zbog turbulencije. Za velike protoke, koji su nužni kod velikih struja, potrebne su sapnice velikog promjera za smanjenje turbulencija. Odabir veličine sapnica ovisi o veličini elektrode, vrsti zavarenog spoja, području zavarenog spoja koje treba biti dobro zaštićeno i pristupu zavarenom spoju. Velike sapnice nude najbolju zaštitu zavarenog spoja, stoga treba koristiti najveću moguću veličinu. [2]

Sapnice su dostupne u različitim duljinama kako bi se prilagodile različitim geometrijama spojeva i kako bi se održao potreban razmak između sapnice i obratka. Dulje sapnice općenito stvaraju čvršći i manje turbulentni protok zaštitnog plina. [2]

Većina plinskih sapnica su cilindričnog oblika s ravnim ili suženim krajevima. Da bi se smanjila turbulencija zaštitnog plina, na raspolaganju su sapnice s unutarnjim usmjeravanjem. Sapnice su također dostupne s izduženim krajevima ili prigušenim krajevima koji pružaju dodatnu pokrivenost zadnjem dijelu taline kod zavarivanja. To omogućava vrućem metalu da se hladi u atmosferi inertnog plina. [2]

Na kraju otvora sapnice može se staviti mrežica koja služi za poboljšavanje stabilnosti protoka plina i na taj se način sprečava turbulencija, isto tako protok zaštitnog plina je stabilniji i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada. Prednost dugog stabilnog toka zaštitnog plina je pogodnost da elektroda može više stršati van iz pištolja, te to omogućuje zavarivaču veći pregled nad talinom. [2]

U TIG postupku volfram elektrode se ne troše ako se postupak pravilno koristi, jer se ne tope i ne prenose na zavar. Volframova elektroda postiže temperaturu taljenja zagrijavanjem uslijed

stvaranja otpora prolasku elektrona. Ako se koristi veća jakost struje od one preporučene za datu veličinu elektrode i konfiguracije vrha, uzrokovat će da volfram erodira ili se rastopi. Budući da elektrode ne smiju sadržavati površinske nečistoće ili nesavršenosti, proizvode se s kemijski očišćenim završetkom u kojem se površinske nečistoće uklanjaju nakon postupka oblikovanja, ili se površinske nesavršenosti uklanjaju brušenjem. [2]

Klasifikacije volframove elektrode temelje se na kemijskom sastavu elektrode, također se mogu identificirati po bojama za različite klase volframovih elektroda:[2]

- Čiste volframove elektrode (zelene boje) sadrže najmanje 99,5% volframa, bez namjernih legirajućih elemenata. Provodljivost električne struje čistih volframovih elektroda je manja od legiranih elektroda. Čisti volfram pruža dobru stabilnost električnog luka kad se koristi sa izmjeničnom strujom. Vrh elektrode održava čist, zaobljen kraj koji pomaže kod stabilnosti luka. Elektrode se također mogu koristiti s istosmjernom strujom, ali one ne daju karakteristiku luka koju nude elektrode legirane sa torijem, cerijem ili lantanom. Čiste volframove elektrode obično se smatraju jeftinim elektrodama i obično se koriste za zavarivanje aluminijskih i magnezijevih legura. [2]

- Volframove elektrode legirane torijem (žute i crvene boje) - termička emisija volframa može se poboljšati legiranjem volframa metalnim oksidima koji imaju vrlo niske radne funkcije. Kao rezultat, ove se elektrode mogu koristiti s većim strujama zavarivanja. Torijev oksid (ThO_2), jedan je od takvih legiranih elemenata. Dostupne su dvije vrste volframovih elektroda legiranih s torijem. Elektrode sadrže 1 % ili 2 % torija, ravnomjerno raspoređenog po cijeloj duljini elektroda. Ove volframove elektrode su superiorne u odnosu na čiste volframove elektrode na nekoliko načina. Volframove elektrode legirane torijem daju 20 % veću vodljivost struje. Obično imaju duži vijek trajanja i pružaju veću otpornost na onečišćenje zavara. Pomoću ovih elektroda pokretanje luka je lakše, a luk je stabilniji nego kod čistih volframovih ili volframovih elektroda legiranih cirkonijem. Ova vrste elektroda dizajnirana je za primjenu kod zavarivanja istosmjernom strujom i elektrodom na negativnom polu. Ove elektrode održavaju izoštrenu konfiguraciju vrhova tijekom zavarivanja, što je željena geometrija za zavarivanje istosmjernom strujom i elektrodom na minus polu. Rijetko se koriste s izmjeničnim naponom jer je teško održavati zaobljeni kraj koji je poželjniji za zavarivanje s izmjeničnom strujom. [2]

- Volframove elektrode legirane cerijem (narandaste boje) su elektrode razvijene kao moguća zamjena za elektrode legirane torijem, jer cerij za razliku od torija, nije radioaktivni element. U usporedbi s čistim volframom, elektrode legirane cerijem olakšavaju pokretanje luka, poboljšavaju stabilnost luka i smanjuju brzinu isparavanja ili izgaranja. Ove prednosti elektroda

poboljšavaju se proporcionalno udjelu cerija. Ove elektrode uspješno će raditi s izmjeničnim ili istosmjernim naponom bilo koje polarnosti. [2]

- Volframove elektrode s dodacima lantanovog oksida (plava, crna i zlatna boja) razvijene su otprilike u isto vrijeme kao i elektrode legirane cerijem. Prednosti i radne karakteristike ovih elektroda slične su elektrodama legiranim cerijem. Ove elektrode sadrže 1,5% disperziranog lantanovog oksida, što pojačava pokretanje i stabilnost luka, smanjuje brzinu erozije vrha i proširuje raspon jakosti struje. [2]

- Volframove elektrode legirane cirkonijem (smeđe boje) imaju karakteristike zavarivanja koje uglavnom spadaju između onih iz čistog volframa i volframovih elektroda legiranih torijem jer kombiniraju karakteristike stabilnosti luka i zaobljeni kraj tipičan za čisti volfram, s rasponom jakosti struje i početnim karakteristikama volframovih elektroda legiranih torijem. Imaju veću otpornost na onečišćenje od čistog volframa i preferiraju se za primjenu kada se vrši radiografsko testiranje na zavarenom spoju, gdje zagađenje volframom mora biti što manje.[2]

Prikaz volframovih elektroda označenih po bojama može se vidjeti na slici 18.



Slika 17. Vrste volframovih elektroda [19]

Oblik volframove elektrode važna je varijabla u TIG postupku. Kod zavarivanja izmjeničnom strujom čiste ili cirkonizirane volframove elektrode tvore hemisferni (zaobljeni) kraj. Za zavarivanje istosmjernom strujom obično se koriste volframove elektrode legirane torijem,

cerijem ili lantanom, a kraj elektrode obično je zašiljen do određenog kuta i često je skraćen. Iako se elektrode malog promjera mogu upotrijebiti s četvrtastim završetkom za zavarivanje istosmjernom strujom i elektrodom na negativnom polu, konični vrh elektrode daje poboljšane performanse zavarivanja. Vrhovi volframovih elektroda obično se pripremaju brušenjem, zaobljivanjem i kemijskim oštrenjem. Konusni vrh elektrode obično se priprema na svim, osim najmanjim elektrodama.[2]

4.2. Parametri zavarivanja

Odabir parametara prilikom zavarivanja određuje kakva će biti kvaliteta zavara nakon zavarivanja, pa stoga treba obratiti posebnu pozornost na njihov odabir.

Utjecajni čimbenici na kvalitetu zavara koji se mogu mijenjati i koji se odabiru prilikom TIG zavarivanja, a ovise o debljini materijala su:

1. Jakost struje,
2. Protok plina,
3. Promjer volframove elektrode,
4. Promjer dodatnog materijala,
5. Brzina električnog luka,
6. Brzina zavarivanja.

Poželjne elektrode su torijski, cerijantirani ili lantanizirani volfram. Prednost ovih elektroda je što imaju stabilniji luk i mogu se koristiti s većim strujama od čistih volframovih elektroda.

Zaštitni plin je obično argon, ali može se koristiti i smjesa helija i argona. Prednosti argona su u tome što brzina protoka može biti niža, luk je stabilniji i napon luka je nešto manji nego kod helija. Niži napon omogućuje zavarivanje tankog lima bez pregorijevanja.[9]

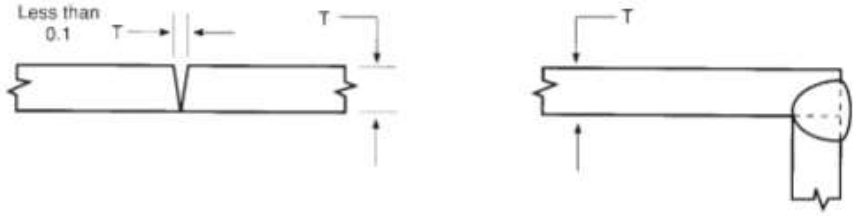
Dodatni materijali koji se koriste u TIG postupku izrađeni su u obliku čvrste žice dostupne u zavojnicama za automatsko zavarivanje ili ravnih duljina za ručno zavarivanje. Potrošni umeci korisni su za korijenske zavare kod TIG zavarivanja.[9]

Visoka frekvencija mora biti uključena samo za pokretanje luka. Kako se elektroda približava materijalu, visoka frekvencija skače s volframove elektrode na radni komad i zapaljuje električni luk za zavarivanje. Pošto volframova elektroda zapravo ne dotiče radni komad, mogućnost onečišćenja čelika je značajno manja. Treba koristiti istosmjernu struju (DC) koja stvara dubok,

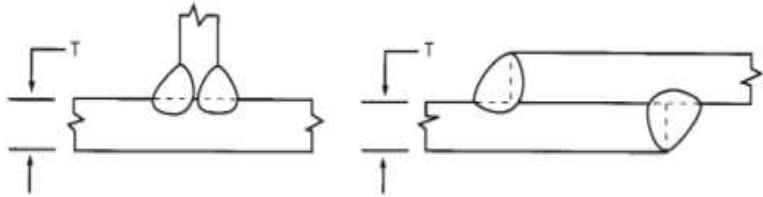
prodoran zavar. Korištenjem više volframovih elektroda s malim razmakom, brzina zavarivanja također se može značajno povećati kod zavarivanja cijevi ili lima od nehrđajućeg čelika. [9]

U tablicama 4 i 5 prikazani su parametri za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika za sučeoni, kutni, preklopni spoj.

Tablica 4 Parametri zavarivanja za sučeljeni i kutni rubni spoj [9]

						
Debljina materijala, T (mm)	1.6	2.4	3.2	4.8	6.4	12.7
I - Jakost struje (A)	80 - 100	100 - 120	120 - 140	200 - 250	200 - 250	225-375
d_e - Promjer elektrode (mm)	1.6	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2
Q - Protok plina (l/min)	4.7	4.7	4.7	7.1	9.4	11.8
d_{DM} - Promjer dodatnog materijala (mm)	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2	3.2
v_{pel} - Brzina pomicanja električnog luka (mm/sec)	5.1	5.1	5.1	4.2	3.4	3.4
v_z - Brzina zavarivanja m/h	0.0548	0.0548	0.0548	0.0656	0.0820	0.0820

Tablica 5 Parametri zavarivanja za kutne i preklopne spojeve [9]

						
Debljina materijala, T (mm)	1.6	2.4	3.2	4.8	6.4	12.7
I - Jakost struje (A)	90 - 110	110 - 130	130 - 150	225 - 275	225 - 350	225-375

d_e - Promjer elektrode (mm)	1.6	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2
Q - Protok plina (l/min)	4.7	4.7	4.7	7.1	9.4	11.8
d_{DM} - Promjer dodatnog materijala (mm)	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2	3.2
v_{pel} - Brzina pomicanja električnog luka (mm/sec)	4.2	4.2	4.2	3.4	3.4	3.4
v_z - Brzina zavarivanja m/h	0.0656	0.0656	0.0656	0.0820	0.0820	0.0820

4.3. Primjena TIG zavarivanja

TIG postupak se široko primjenjuje kod zavarivanja u proizvodnji, navarivanja ili u svrhu reparature aluminijskih legura i drugih nehrđajućih materijala i legura. TIG zavarivanje se uglavnom uspoređuje sa MIG i plazma postupkom zavarivanja. Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine do 6 mm (slika 19 zavarena cijev). TIG postupak je izvorno ručni postupak ali se može automatizirati i robotizirati, samo što je primjena takvih uređaja kompleksnija i skuplja.[20]



Slika 18. Zavar cijevi TIG metodom zavarivanja [21]

Ručno TIG zavarivanje nudi prednosti za široku paletu primjena, od visokokvalitetnih zavara koji su potrebni u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji do zavarivanja cijevi i limova u

tvornicama za proizvodnju i popravke, gdje se je velika prednost fleksibilnost postupka. Zavarivati se može u bilo kojem položaju i primjena je gotovo neograničena. Ovim postupkom mogu se stalno proizvoditi autogeni zavari vrhunske kvalitete s velikim brzinama, bez prskanja i općenito s vrlo malo grešaka. Gotovo svi metali, uključujući i različite metale, mogu se zavarivati TIG postupkom. Postupak se može koristiti sa ili bez dodatnog materijala, kako to zahtijeva specifična primjena. Daljnja prednost je ta što se mogu koristiti relativno jeftini izvori energije.[2]

Sljedeća ograničenja TIG postupka treba uzeti u obzir pri odabiru postupka za određenu primjenu:[2]

1. Brzine deponiranja dodatnog materijala uglavnom su niže nego kod ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja,

2. Nešto više spretnosti i koordinacije zahtijeva od zavarivača kada koristi TIG postupak nego kod MIG ili REL postupka ,

3. Osnovni materijal i dodatni materijal ne smiju biti onečišćeni, za ovaj postupak tolerancije za onečišćenost su jako male,

4. Za zavarivanje debljine ispod 10 milimetara (mm), TIG postupak proizvodi kvalitetu zavarivanja usporedivu ili bolju od postupaka ručnog elektrolučnog zavarivanja, ali je skuplje,

5. Magnetska polja koja dovode do pucanja luka kao i kod drugih elektrolučnih procesa, mogu stvarati probleme prilikom zavarivanja,

6. Ako se zavarivanje odvija u vjetrovitim uvjetima, postaje teže pravilno zaštititi zavar za vrijeme zavarivanja.

4.4. Specifičnost TIG zavarivanja nehrđajućih čelika

Neke od prednosti zavarivanja nehrđajućih čelika ovim postupkom su:[22]

- koncentriran izvor topline koji dovodi do uske zone taljenja
- električni luk je stabilan i rastaljena talina materijala je mirna
- izvrsna kvaliteta zavara
- vrlo mala potrošnja elektrode

Nehrđajući čelici jako često se zavaruju postupkom TIG zavarivanja, jer se zavarivanje odvija u atmosferi zaštićenoj inertnim plinom. Sastav zavara u osnovi je jednak sastavu osnovnog materijala jer se iste legure koriste u dodatnom materijalu i zato što dodatni materijal

kod zavarivanja ulazi u talinu bez prolaska kroz električni luk. Uspješno zavarivanje legura koje imaju mehanička i antikorozivna svojstva, tj. dupleks nehrđajućih čelika, uvelike ovisi o parametrima zavarivanja. Automatizirani ili orbitalni TIG postupak kod zavarivanja ovih legura ima veliku prednost zbog ponovljivosti procesa. Jednom kad se ustanove postupci zavarivanja za ove materijale, postupci se mogu ponavljati s velikim stupnjem preciznosti. [2]

4.5. Odabir zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u TIG postupku zavarivanja su helij i argon. Iako je helij korišten u izvornom obliku TIG postupka, sada u njemu dominira argon. Oba plina su inertni plinovi i pružaju zaštitnu atmosferu u kojoj nema kemijske reakcije između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Uz glavni cilj zaštitnog plina da zaštiti rastaljene materijale od atmosfere, mora se naglasiti da zaštitni plin izravno utječe na stabilnost luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, izgled zavarenog spoja i količinu oslobođene pare. [11]

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi u TIG zavarivanju, ali to nije njegova jedina prednost. Njegov ionizacijski potencijal je nizak (energija potrebna za elektron plinskog atoma da ga pretvori u ion) što pogoduje uspostavi i stabilnosti luka. Štoviše, 1,4 puta je težak od zraka, a kada izlazi iz sapnice može potisnuti zrak i dobro zaštititi talinu. U usporedbi s helijem, argon ima nižu toplinsku vodljivost, što dovodi do gušćeg luka, manje penetracije i taljenja. Minimalna potrebna čistoća argona je 99,95 %. [11]

Kod TIG zavarivanja Argon se više primjenjuje kao zaštitni plin iz sljedećih razloga[2]:

1. Niži trošak i veća dostupnost,
2. Potreban manji protok za zaštitu,
3. Lakše pokretanje luka,
4. Smanjena penetracija.

Smanjena penetracija luka zaštićenog argonom posebno je korisna u ručnom zavarivanju tankih materijala jer se smanjuje tendencija pretjeranog taljenja.

Helij je plin visokog potencijala za ionizaciju pa je teško uspostaviti luk. Njegova je kvaliteta vrlo niska (10 puta manja od argona), zbog čega protok helija mora biti tri puta veći od protoka argona. Helij kao zaštitni plin ima dobru toplinsku vodljivost i stvara širi luk. Toplina luka prenosi se brže u radni komad i na taj način osigurava veći prodor i ulaz topline (pri istoj struji napon luka sa zaštitnim plinom koji štiti helij znatno je veći od argona). Minimalni zahtjev za čistoćom helija kao zaštitnog plina je 99,99%. [11]

Osim inertnih plinova argona i helija, vrlo se često upotrebljava njihova mješavina koja daje kombinaciju njihovih pogodnih svojstava, a u tablici 6 navedeni su primjeri karakteristika zavarivanja navedenih plinova.

Glavni utjecaj na učinkovitost zaštitnog plina je gustoća plina. Argon je otprilike deset puta teži od helija. Argon, nakon što napusti sapnicu, oblikuje pokrivač preko područja zavarivanja. Helij, jer je lakši, ima tendenciju podizanja oko sapnice. Kako bi se postigla jednaka zaštitna učinkovitost, protok helija mora biti dva do tri puta veći od protoka argona. [2]

Tablica 6 Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [11]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Obli luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar

Kako bi se poboljšala svojstva argona on se može miješati sa drugim plinovima. U praksi kada se zavaruju nehrđajući čelici argon se miješa sa tri plina, a to su helij, vodik, dušik.

Mješavina argona i vodika upotrebljava se samo kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika. Vodik se dodaje argonu kako bi se povećao unos topline u osnovni materijal i poboljšalo čišćenje od oksida. Postotak vodika u ovoj mješavini najčešće određuje proizvođač ovisno za koju je primjenu namijenjena mješavina, ali postotak vodika u mješavini nikad neće prelaziti 8%.

Mogu se postići povećane brzine zavarivanja proporcionalno količini vodika u mješavini zbog povećanog napona luka.[2]

Mješavina argona i dušika većinom se koristi kod zavarivanja duplex nehrđajućih čelika. Ova mješavina plinova povećava korozivsku otpornost zavara i kontrolira omjer austenita i ferita u zavaru.

Svrha norme ISO 14715 je kategorizirati i odrediti zaštitne plinove u skladu s njihovim kemijskim svojstvima i metalurškim ponašanjima kako bi se olakšao odabir od strane korisnika.

Oznake koje se koriste za glavnu skupinu plinova su[23]:

- I - inertni plinovi i inertne mješavine;
- M1 , M2, M3 - oksidirajuće mješavine koje sadrže kisik ili ugljični oksid;
- C - visoko oksidirajući plinovi i mješavine;
- R - reducirajuće plinske mješavine;
- N - nisko reaktivni plin ili reducirajuća mješavina koja sadrži dušik;
- O - kisik;
- Z - mješavine plinova kojima je jedna ili više komponenta nije navedena u tablici 7.

Ove glavne skupine osim Z skupine podijeljene su u pod skupine ovisno o prisutnosti i razini komponenta koje imaju utjecaja na reaktivnost.

Tablica 7 Kategorizacija plinova za zavarivačke i srodne postupke [23]

Simbol		Postotak komponente u mješavini					
Glavna skupina	Pod skupina	Oksidirajući		Inertni		Reducirajući	Nisko reaktivirajući
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			ostatak	$0,5 \leq \text{He} \leq 95$		
M1	1	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$		ostatak		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 5$	
	2	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$		ostatak			
	3		$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	ostatak			
	4	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	ostatak			
M2	0	$5 \leq \text{CO}_2 \leq 15$		ostatak			
	1	$15 \leq \text{CO}_2 \leq 25$		ostatak			
	2		$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	ostatak			
	3	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$	$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	ostatak			

	4	$5 \leq \text{CO}_2 \leq 15$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	ostatak			
	5	$5 \leq \text{CO}_2 \leq 15$	$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	ostatak			
	6	$15 \leq \text{CO}_2 \leq 25$	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	ostatak			
	7	$15 \leq \text{CO}_2 \leq 25$	$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	ostatak			
M3	1	$25 \leq \text{CO}_2 \leq 50$		ostatak			
	2		$10 \leq \text{O}_2 \leq 15$	ostatak			
	3	$25 \leq \text{CO}_2 \leq 50$	$2 \leq \text{O}_2 \leq 10$	ostatak			
	4	$5 \leq \text{CO}_2 \leq 25$	$10 \leq \text{O}_2 \leq 15$	ostatak			
	5	$25 \leq \text{CO}_2 \leq 50$	$10 \leq \text{O}_2 \leq 15$	ostatak			
C	1	100					
	2	ostatak	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 30$				
R	1			ostatak		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 15$	
	2			ostatak		$15 \leq \text{H}_2 \leq 50$	
N	1						100
	2			ostatak			$0,5 \leq \text{N}_2 \leq 5$
	3			ostatak			$5 \leq \text{N}_2 \leq 50$
	4			ostatak		$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 10$	$0,5 \leq \text{N}_2 \leq 5$
	5					$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 50$	ostatak
O	1		100				

Primjer označavanja mješavina zaštitnih plinova prema normi ISO 14175:

Mješavina koja se sastoji od 30 % helija u kombinaciji sa argonom. Prema tablici 7 ova mješavina bi se svrstala u grupu I3. Zatim se oznaka mješavine piše tako da se prvo piše plin kojeg ima najviše te se iza njega pišu ostali plinovi mješavine u ovom slučaju samo helij po količini plina u mješavini od većeg prema manjem. Oznaka za ovaj plin bi bila ISO 14175 - I3 - ArHe - 30. [23]

Većinom kod odabira zaštitnog plina može se gledati i preporuka proizvođača kako nebi došlo do pogrešnog odabira. U tablicama 8 i 9 mogu se vidjeti preporuke proizvođača Linde i Messer Croatia plin.

Tablica 8 Zaštitni plinovi proizvođača Messer croatia plin [24]

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav [%]						Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	He	O ₂	CO ₂	H ₂	N ₂		
Argon specijal 4.8	I1	100						TIG/MIG	ΔO
Helij 4.6	I2		100					TIG/MIG	Δ
Aluline He90	I3	10	90					TIG/MIG	Δ
Aluline He70	I3	30	70					TIG/MIG	Δ
Aluline He50	I3	50	50					TIG/MIG	Δ
Aluline He30	I3	70	30					TIG/MIG	Δ
Aluline He15	I3	85	15					TIG/MIG	Δ
Aluline N	Z	Rest					0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He15 N	Z	Rest	15				0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He30 N	Z	Rest	30				0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He50 N	Z	Rest	50				0,015	TIG/MIG	Δ
Inoxline H2	R1	98				2		TIG	O
Inoxline H5	R1	95				5		TIG	O
Inoxline H7	R1	92,5				7,5		TIG	O
Inoxline N1	N2	98,75					1,25	TIG	O
Inoxline N2	N2	97,5					2,5	TIG	O
Inoxline He15 N1	N2	83,75					1,25	TIG	O
Inoxline He3 H1	R1	95,3	3			1,5		TIG	O
Inoxline X2	M13	98		2				MAG M	O
Inoxline C2	M12	97,5			2,5			MAG M	O
Inoxline C3 X1	M14	96		1	3			MAG M	O
Inoxline He15 C2	M12	83	15		2			MAG M	O
Inoxline He30 H2 C	Z	Rest	30		0,12	2		MAG M	O
Ferroline C8	M20	92			8			MAG M	X
Ferroline C18	M21	82			18			MAG M	X
Ferroline C25	M21	75			25			MAG	X
Ferroline X4	M22	96		4				MAG M	X
Ferroline X8	M22	92		8				MAG M	X
Ferroline C5 X5	M23	90		5	5			MAG M	X
Ferroline C6 X1	M24	93		1	6			MAG M	X
Ferroline C12 X2	M24	86		2	12			MAG M	X
Ferroline He20 C8	M20	72	20		8			MAG M	X
Tehnički ugljični dioksid	C1				100			MAG M	X
Formir plin (N ₂ -H ₂ -mješavine)	N5					5-25	95-75	zaštita korijena	ΔOX

Δ Aluminij i neželjezni materijali O Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni X Nelegirani i niskolegirani čelici

Tablica 9 Zaštitni plinovi proizvođača Linde [25]

LINDE naziv zaštitnog plina	HRN EN 439 (start)	HRN EN ISO 14 175: 2008	CO ₂ Vol.-%	O ₂ Vol.-%	N ₂ Vol.-%	NO Vol.-%	He Vol.-%	H ₂ Vol.-%	Ar Vol.-%
Argon (Ar)	I1	I1							100
Helij (He)	I2	I2					100		
Ugljikov dioksid (CO ₂)	C1	C1	100						
CORGON® 5 S 4	M23	M23 - ArCO - 5/4	5	4					Balance
CORGON® 13 S 4	M24	M25 - ArCO - 13/4	13	4					Balance
CORGON® 6	M21	M20 - ArC - 6	6						Balance
CORGON® 8	M21	M20 - ArC - 8	8						
CORGON® 10	M21	M20 - ArC - 10	10						
CORGON® 18	M21	M21 - ArC - 18	18						
CORGON® 25	M21	M21 - ArC - 25	25						
MISON® 8	S M21 + 0.03NO	Z - ArC+NO - 8/0.03	8			0.03			Balance
MISON® 18	S M21 + 0.03NO	Z - ArC+NO - 18/0.03	18			0.03			Balance
CORGON® S 5	M22	M22 - ArO - 5		5					Balance
CORGON® S 8	M22	M22 - ArO - 8		8					Balance
CORGON® 10 He 30	M21 (1)	M20 - ArHeC - 30/10	10				30		Balance
CRONIGON® 2	M12	M12 - ArC - 2.5	2.5						Balance
MISON® 2	S M12 + 0.03NO	Z - ArC+NO - 2/0.03	2			0.03			Balance
CRONIGON® S 1	M13	M13 - ArO - 1		1					Balance
CRONIGON® S 3	M13	M13 - ArO - 3		3					Balance
CRONIGON® 2 He 20	M12 (1)	M12 - ArHeC - 20/2	2				20		Balance
CRONIGON® 2 He 50	M12 (2)	M12 - ArHeC - 50/2	2				50		Balance
CRONIGON® Ni 10	M11 (1)	Z - ArHeHC - 30/2/0.05	0.05				30	2	Balance
CRONIGON® Ni 20	M12 (1)	Z - ArHeC - 50/0.05	0.05				50		Balance
CRONIGON® Ni 30	S M12 (1) + 5N ₂	Z - ArHeNC - 5/5/0.05	0.05		5		5		Balance
VARIGON® N 2	S I1 + 2N ₂	N2 - ArN - 2			2				Balance
VARIGON® N 2 H 1	S R1 + 2N ₂	N4 - ArNH - 2/1			2			1	Balance
VARIGON® N 2 He 20	S I3 + 2N ₂	N2 - ArHeN - 20/2			2		20		Balance
VARIGON® He 30	I3	I3 - ArHe - 30					30		Balance
VARIGON® He 50	I3	I3 - ArHe - 50					50		Balance
VARIGON® He 70	I3	I3 - HeAr - 30					70		Balance
VARIGON® He 90	I3	I3 - HeAr - 10					90		Balance
MISON® Ar	S I1 + 0.03NO	Z - Ar+NO - 0.03				0.03			Balance
VARIGON® S	M13	Z - ArO - 0.03		0.03					Balance
MISON® He 30	S I3 + 0.03NO	Z - ArHe+NO - 30/0.03				0.03	30		Balance
VARIGON® He 30 S	M13 (1)	Z - ArHeO - 30/0.03		0.03			30		Balance
VARIGON® H 2 - 15	R1	R1 - ArH - 2..15						2 - 15	Balance
Formir plin 95/5 - 70/30	F2	N5 - NH - 5..30			Balance			5 - 30	
Dušik (N ₂)	F1	N1			100				
LASGON® C1	-	M20 - ArHeC - 35/15	15				35		Balance
LASGON® H3	-	R1 - ArHeH - 20/8					20	8	Balance
LASGON® H4	-	R1 - ArHeH - 40/10					40	10	Balance

Proizvođač Linde preporučuje 7 mješavina plinova za nehrđajuće čelike od kojih se 3 mogu koristiti samo kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, 1 mješavina se koristi samo za dupleks nehrđajuće čelike te 3 mješavine koje se mogu koristiti za sve vrste nehrđajućih čelika. Čisti argon može se koristiti za sve vrste nehrđajućih čelika i potiče dobro paljenje luka ali se ne mogu zavarivati materijali većih debljina. Zbog tog razloga proizvođač ima u ponudi mješavinu plinova VARIGON He30 (70% argona i 30% helija) koja se može koristiti za sve vrste nehrđajućih čelika i za veće debljine. Ova mješavina plinova omogućuje veću brzinu zavarivanja i povećava kvalitetu zavarenog spoja i smanjuje mogućnost nastanka grešaka u zavarenom spoju. Na slici 19 prikazane su preporuke proizvođača Linde.



TIG

	Prikladan za tip nehrđajućeg čelika	Brzina zavarivanja	Kontrola poroznosti	Protalijvanje	Provarivanje	Jednostavnost uporabe	Debljina materijala (mm)			
							3	6	9	12+
Argon	sva									
VARIGON H2	austenitna									
VARIGON H5	austenitna									
VARIGON N2	duplex									
VARIGON N2 H1	austenitna									
VARIGON He30	sva									
VARIGON He50	sva									

Argon
 → Najčešći plin za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika
 → Dobro paljenje i luka
 → Mala brzina zavarivanja
 → Problem provarivanja kod debljih materijala

VARIGON H2 in H5
 → Upotrebljava se samo za austenitne nehrđajuće čelike
 → Najčešće se upotrebljava kod automatskog i orbitalnog zavarivanja
 → Pobojšava provarivanje i protalijvanje
 → Veća brzina i produktivnost zavarivanja

VARIGON He 30
 → »Performance line« zaštitni plin primjeren za sve nehrđajuće čelike
 → Omogućuje veću brzinu zavarivanja od argona
 → Povećava kvalitetu zavarenog spoja i smanjuje mogućnost nastanka grešaka

VARIGON N2
 → Upotrebljava se za dupleks nehrđajuće čelike
 → Povećava korozijsku otpornost zavara
 → Kontrolira omjer austenit-ferit u zavaru

VARIGON N2 H1
 → Upotrebljava se samo za austenitne nehrđajuće čelike
 → Omogućava veću brzinu zavarivanja od VARIGON N2
 → Povećava korozijsku otpornost zavara

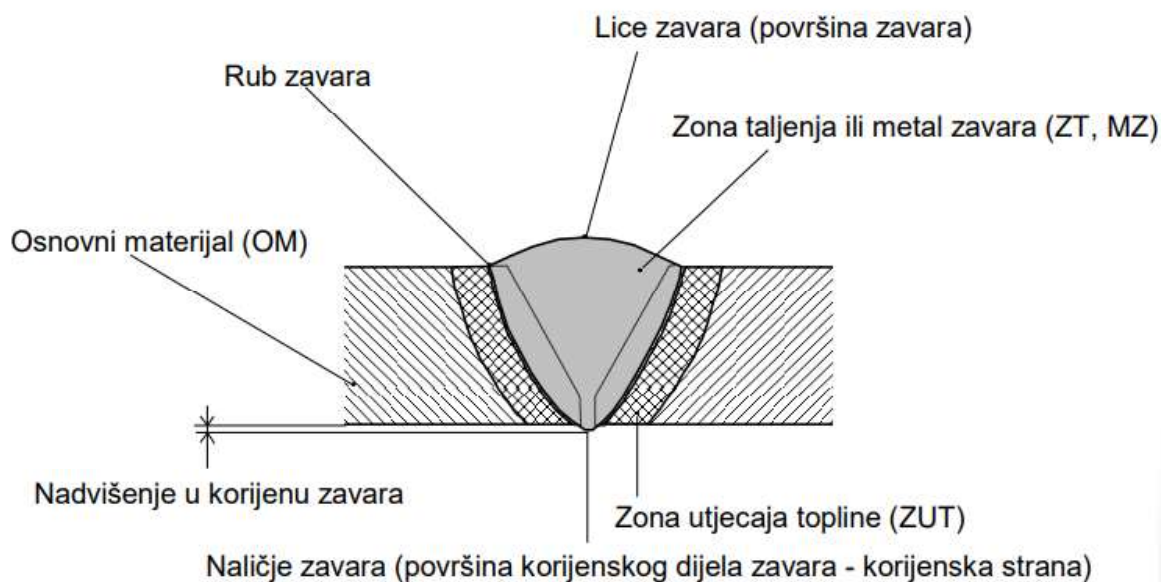
VARIGON He 50
 → »Performance line« zaštitni plin primjeren za sve nehrđajuće čelike
 → Omogućuje veću brzinu zavarivanja od argona
 → Povećava kvalitetu zavarenog spoja i smanjuje mogućnost nastanka grešaka

Slika 19 Preporuke kod odabira zaštitnog plina proizvođača Linde [25]

5. Zavareni spoj

Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja ZT i zone utjecaja topline ZUT.

Na slici 20 prikazani su dijelovi od kojih se sastoji zavareni spoj.



Slika 20. Dijelovi zavarenog spoja [26]

Zona taljenja (ZT) je onaj dio zavarenog spoja koji je za vrijeme zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i do skrućivanja. Može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala.[26]

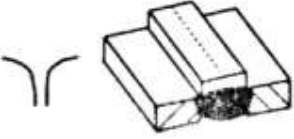
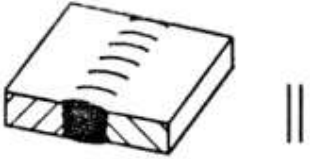




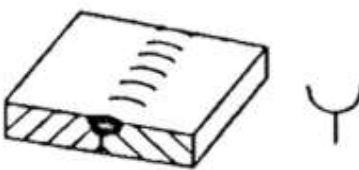
Zona utjecaja topline (ZUT) je dio osnovnog materijala, koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, a gdje dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava zbog topline unesene zavarivanjem.[26]




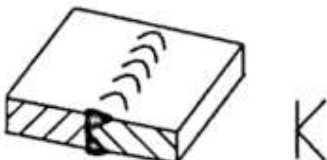




5.1. Vrste zavarenih spojeva


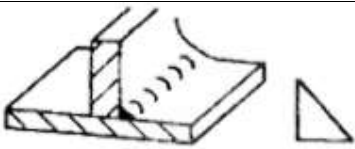
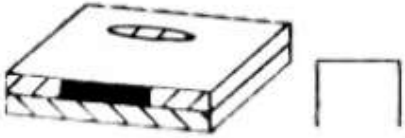
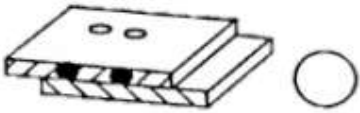
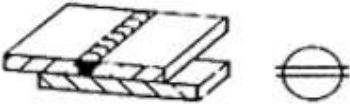
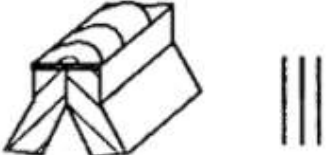

Zavareni se spojevi prema međusobnom položaju zavarenih dijelova dijele na sučeljene, kutne (T - spoj, rubni spoj), naližećuće i preklopne spojeve. U praksi se najčešće koriste sučeljeni i kutni spojevi. Rubni dijelovi koji se zavaruju obično se pripremaju za neki oblik žlijeba, odnosno zavara da bi se osigurao kvalitetan zavareni spoj po čitavu presjeku. Rubovi za zavarivanje pripremaju se strojnom obradom, toplinskim rezanjem ili posebnim strojevima za ukošavanje rubova. Prema oblicima spojeva mogu biti: I - spoj, V - spoj, X - spoj, U - spoj, dvostruki U - spoj, K - spoj, J - spoj, dvostruki J - spoj, 1/2V - spoj itd. Označavanje zavarenih spojeva na nacrtima provodi se prema međunarodno priznatim oznakama u skladu s

nacionalnim standardima. Svi navedeni spojevi nalaze se u tablici s oznakama i njihovom primjenom (tablica 10) .[4]

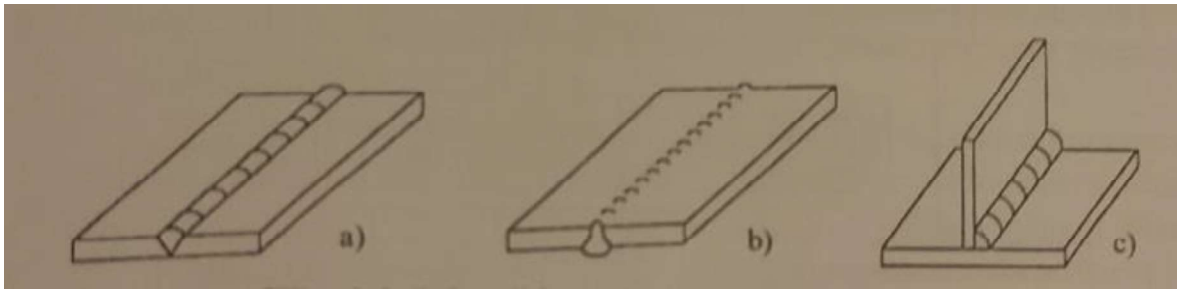
Tablica 10 Označavanje i primjena zavarenih spojeva [4]

Naziv spoja	Prikaz spoja	Primjena
Rubni spoj		Za vrlo tanke limove. Rub se pretaljuje, obično bez dodatog materijala.
Sučeljeni I spoj		Za tanke stjenke (2-5 mm). Zavaruje se s jedne ili s obje strane
Sučelejni V spoj		Za debljine stjenke 4 - 18 mm. Zavaruje se samo s jedne strane provarom
Sučeljeni polu V spoj		Kao kod V spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće ili ne treba uskošenje, ili zidni položaj
Sučeljeni Y spoj		Kao kod V spoja, tamo gdje se ne zahtjeva potpuno provarivanje
Sučeljeni polu Y spoj		Kao kod polu V spoja, tamo gdje se ne zahtjeva potpuno provarivanje
Sučeljeni U spoj		Za vrlo debele materijale, debljine od 30 mm. U nekim slučajevima i kod tanjih materijala uz TIG zavarivanje korijena.

Sučeljeni J spoj		Za vrlo debele materijale, tamo gdje drugu stranu nije moguće obraditi
Sučeljeni V spoj zavareni i s druge strane		Kao kod V spoja, s time da se zavaruje i s korijenske strane
Sučeljeni X spoj		Za debljine stijenke 15 - 40 mm, a za bakar već od 8 mm. Zavaruje se s obje strane.
Sučeljeni K spoj		Kao kod X spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće iskositi rub ili u pripremi za zidni položaj. Može biti i kutni spoj.
Sučeljeni dvostruki Y spoj		Kao kod X spoja, tamo gdje se ne zahtjeva potpuno provarivanje ili u pripremi za EPP zavarivanje.
Dvostruki polu Y spoj		Kao kod K spoja, tamo gdje se ne zahtjeva potpuno provarivanje. Može biti i kutni spoj.
Sučeljeni dvostruki U spoj		Za materijale neograničenih debljina, gdje pristup moguć s obje strane
Sučeljeni V spoj većeg razmaka u grlu žlijeba		Za deblje materijale s velikim razmakom u korijenu, obično uz pomoć podloške.

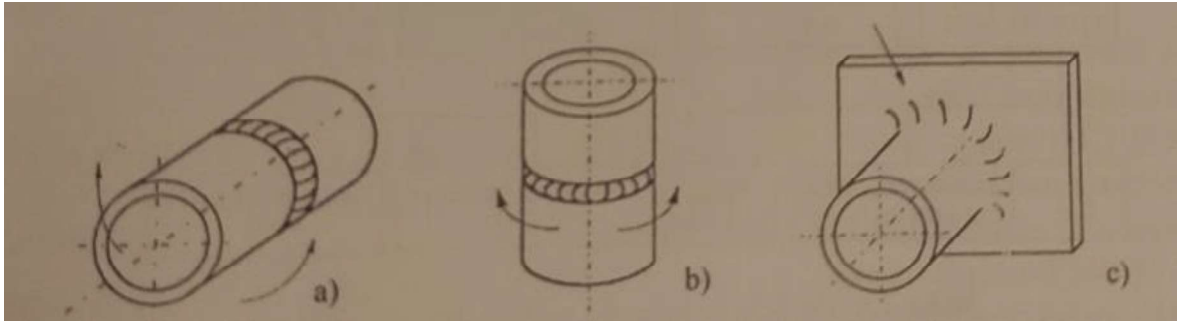
Kutni spoj obostrano zavaren		Za debele materijale, gdje se zavarivanje zahtjeva s obje strane
Kutni spoj jednostrano zavaren		Za materijale je obično tanji. Zavarivanje samo jedne strane
Preklopni spoj zavar u prorezu		Gornji materijal je obično tanji. Zavarivanje se izvodi u pripremljenom prorezu
Preklopni spoj točkasti zavar		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi elektrootporno, točkasto ili točkasto s protaljivanjem
Preklopni spoj šavni zavar		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi elektrootporno ili protaljivanjem
Rubni spoj		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi sa ili bez dodatnog materijala
Navar		Navarena površina. Obično radi poboljšanja svojstava površine osnovnog materijala.

Postoje i druge podjele zavarenih spojeva npr. prema broju prolaza, funkciji, položaju zavarivanja.



Slika 21. Položaji i oznake za zavarivanje limova [4]

a) PA - vodoravni b) PE - nadglavni c) PB - vodoravno - okomiti



Slika 22. Položaji i oznake zavarivanja za cijevi [4]

a) cijev fiskna, vodoravna os, zavarivanje prema gore

b) cijev fiskna, okomita os, zidno zavarivanje

c) rotirajuća cijev, vodoravna os, vodoravno - okomito zavarivanje

5.2. Greške u zavarenim spojevima

Vrlo je bitno obratiti pozornost na mogući nastanak pogrešaka u zavarenim spojevima, jer svaki tehnološki proces nosi opasnost od nastajanja određenih grešaka. Obzirom na veliki broj utjecajnih čimbenika na kvalitetu zavora, potrebno je obratiti posebnu pozornost pri izradi zavarene konstrukcije, isto tako i kod eksploatacije te konstrukcije. Zavareni spoj mora zadovoljavati određene kriterije kako bi konstrukcija bila u dobrom stanju kroz cijeli eksploatacijski vijek. Od velike je važnosti poznavanje uvjeta rada i okoline kako bi se odabrao pravilan osnovni materijal i dodatni materijal te postupak i tehnologija zavarivanja.[27]

Postoje različite klasifikacije grešaka u zavarenim spojevima, a jedna od njih je prema europskoj normi EN 26520 koja greške dijeli na:[27]

- greške u zavarenim spojevima koje mogu nastati u izradi,
- greške u zavarenim spojevima koje mogu nastati u eksploataciji.
- greške u zavarenim spojevima koje nastaju u izradi mogu se podijeliti s obzirom na
- uzrok nastajanja (konstrukcijske, metalurške, tehnološke greške),

- vrstu (plinski uključci, uključci u čvrstom stanju, naljepljivanje, nedostatak provara, pukotine i greške oblika i dimenzija).
- položaju (unutrašnje greške, površinske greške, greške po cijelom presjeku),
- po obliku (kompaktne greške, izdužene greške, oštre greške, zaobljene greške, ravninske greške i prostorne greške).
- veličini (male greške, greške srednje veličine, velike greške),
- brojnosti (pojedinačne greške učestale greške i gnijezdo grešaka).

Pukotina je prekid koji može nastati tijekom hlađenja rastaljenog metala ili zbog naprezanja. Pukotine se smatraju jednim od najopasnijih pogrešaka u zavarenim spojevima i u pravilu nisu dopuštene upravo radi mogućeg širenja. Širenje pukotine ovisi o svojstvu pukotinske žilavosti.[27]

Pukotine dijelimo prema mehanizmu nastanka na:[27]

- Tople pukotine,
- Pukotine nastale pri skrućivanju,
- Pukotine nastale zbog rastaljenih faza,
- Pukotine nastale zbog otvrdnjavanja,
- Pukotine nastale zbog izlučivanja,
- Hladne pukotine,
- Pukotine nastale zbog krhkosti,
- Pukotine nastale skupljanjem materijala,
- Pukotine uzrokovane zaostalim vodikom,
- Lamelarne pukotine,
- Pukotine zbog rubnog zajeda,
- Pukotine nastale starenjem.

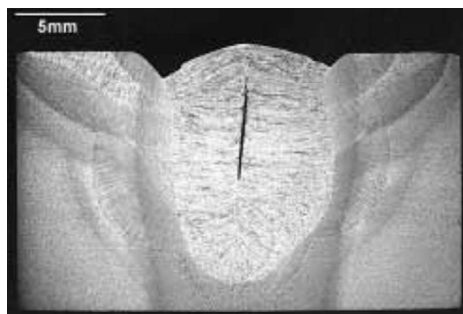
Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama, odnosno temperaturama skrućivanja eventualno prisutnih nečistoća u zavarenom spoju. Ove pukotine mogu nastati u zoni utjecaja topline, ali isto tako i u zoni taljenja zavarenog spoja. Za razliku od hladnih pukotina gdje je prijelom površina svjetla, kod toplih pukotina prijelomna površina je tamna. Pojava toplih pukotina posebno je povezana s nečistoćama u materijalu, ali i sa legirnim elementima, parametrima zavarivanja, nepovoljnim izborom dodatnog materijala, nepovoljnim oblikom žlijeba.[27]

Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da podnese naprezanja nastala skupljanjem materijala u posljednjoj fazi skrućivanja pri visokim temperaturama. Skrućivanje zavara započinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini, a talina ispunjava razdvojeni dio. U završnoj fazi preostaje tanki film taline između zrna skrućenog materijala. Također u završnoj fazi skrućivanja povećava se onečišćenje taline. [27]

Postoje dva osnovna tipa toplih pukotina: [27]

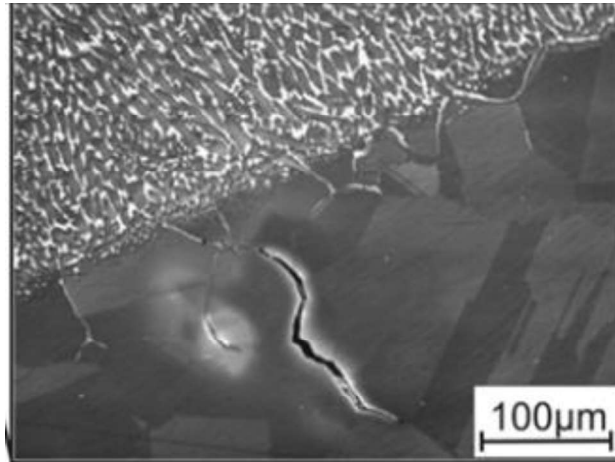
- kristalizacijske,
- podsolidusne ili likvacijske.

Kristalizacijske tople pukotine nastaju pri kristalizaciji u zoni taljenja. Pri hlađenju rastaljenog materijala u žlijebu zavara dolazi prvo do kristalizacije metala zavara, a eventualno nečistoće ostaju zarobljene između kristala. Djelovanjem naprezanja uslijed skupljanja zavara dolazi do nastajanja tople pukotine u zoni zavara, u gornjoj zoni zavara, na mjestu gdje su koncentrirane nečistoće. Slika 23 prikazuje solidifikacijsku pukotinu u zavaru. [27]



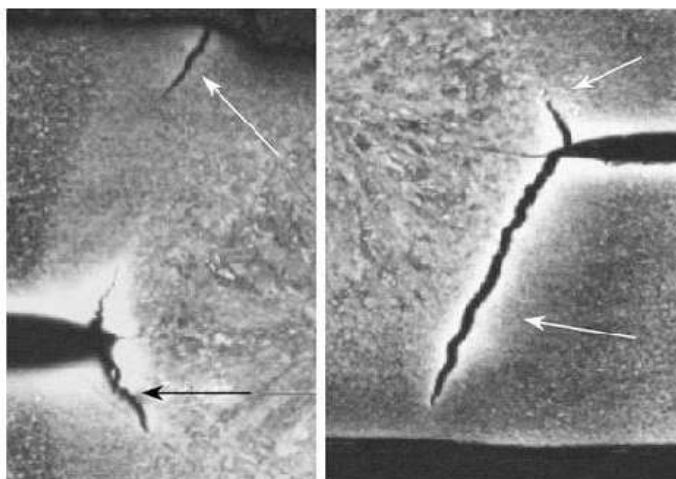
Slika 23. Solidifikacijska pukotina u zavaru [28]

Podsolidusne ili likvacijske pukotine najčešće nastaju u zoni utjecaja topline, poprečno ili okomito na uzdužnu os zavara, ili u smjeru debljine osnovnog materijala. Posljedica su postojanja strukturnih nehomogenosti – nečistoća koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala u zoni utjecaja topline (poput “tankog sloja filma”). Djelovanjem naprezanja pri hlađenju zavarenog spoja, dolazi do nastajanja toplih pukotina podsolidusnog ili likvacijskog tipa, na mjestima gdje su prisutne te nečistoće koje zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. U zoni utjecaja topline ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, ali je došlo do pada čvrstoće po granicama kristalnih zrna zbog omekšavanja ili taljenja “tankih slojeva filma” od nečistoća. Na slici 24 prikazana je likvacijska pukotina u zoni utjecaja topline. [27]



Slika 24. Likvacijska pukotina u ZUT-u [27]

Hladne pukotine (slika 25) nastaju pri hlađenju zavarenog spoja ispod 300 °C, a mogu nastati i nekoliko dana nakon zavarivanja, pa su stoga dobile i naziv „zakašnjele“ pukotine (delayed cracking). Zbog toga, kontrolu kvalitete metodama bez razaranja (ultrazvuk, penetranti i dr.) potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja. Hladne pukotine najčešće se javljaju kod čelika povišene i visoke čvrstoće. Hladne pukotine mogu biti vidljive na površini a mogu biti i skrivene. Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavara i u osnovnom materijalu odnosno u ZUT-u. Mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi zavarenog spoja, okomito ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja. Kod visokočvrstih čelika ZUT je otporniji na pojavu hladnih pukotina od područja metala zavara. Metal zavara je više legiran i karakterizira ga heterogena mikrostruktura, stoga se ne mogu primijeniti smjernice za izbjegavanje hladnih pukotina za ZUT i na područje metala zavara. Sklonost metala zavara prema hladnim pukotinama raste s povećanjem čvrstoće čelika, udjela vodika i debljine radnog komada. [27]



Slika 25. Hladne pukotine [29]

Glavni uzročnici nastajanja: [27]

- Prisutnost vodika u zavaru,
- Osjetljivost mikrostrukture metala na djelovanje vodika,
- Metal sklon otvrdnjavanju,
- Djelovanje naprezanja nastalih skupljanjem zavora,
- Nepovoljan položaj uključaka u zavaru.

Hladne pukotine mogu biti vidljive na površini i nevidljive (u zavarenom spoju), veličine od mikropukotine do makropukotine te mogu biti uzdužne i poprečne.

Pukotine zbog ponovnog zagrijavanja se najčešće javljaju pri naknadnoj toplinskoj obradi. Ovdje postoji velika vjerojatnost ne otkrivanja pukotina prije eksploatacije. Sklonost nastajanju pukotine smanjuje se manjim sadržajem Cr, Mo, V; smanjenjem razine zaostalih naprezanja; predgrijavanjem prije zavarivanja. [27]

Lamelarne pukotine su greške koje nastaju u području ZUT - a, u osnovnom materijalu ili neposredno ispod ZUT- a i nastavljaju širenje u osnovnom materijalu. Ovakve pukotine se javljaju u valjanim čeličnim poluproizvodima koji su opterećeni okomito na smjer valjanja te se najčešće pojavljuju kod zavarivanja debljih konstrukcijskih čelika. [24]

Poroznost u metalu zavora (slika 26) je mjesto ispunjeno stlačenim plinom. Poroznosti mogu biti veličina od okom nevidljivih do veličina od nekoliko milimetara. Tijekom hlađenja taline, plinovi naglo izranjaju iz metala u obliku mjehurića. Ako je brzina izlučivanja plina manja od brzine skrućivanja metala plinovi ostaju zarobljeni u zavaru. Plinski mjehurići ponekad

ostavljaju vidljive šupljine na površini zavara. Veličina i oblici šupljina ovise o količini upijenog, odnosno izlučenog plina iz taline metala zavara i brzine skrućivanja. [27]

Uzroci nastanka poroznosti: [27]

- Nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnom materijalu
- Slaba zaštita procesa zavarivanja
- Neispravni parametri i tehnika rada

Otvorene površinske pore, posebno kod kutnih zavara uzrokuju uvlačenje vlage i koroziju, a mogu narušiti i dinamičku čvrstoću.

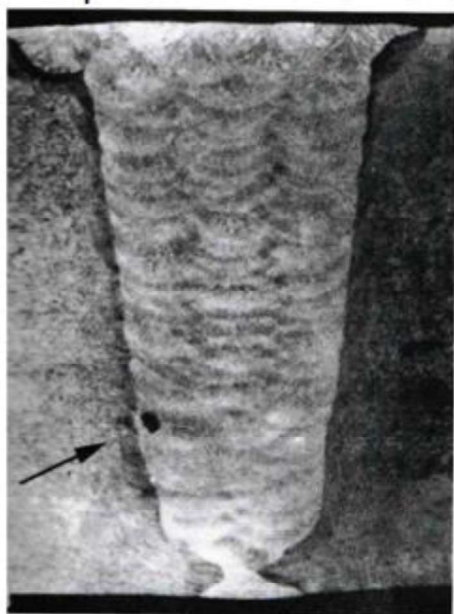


Slika 26. Poroznost [27]

Čvrsti uključci (slika 27) su sva strana tijela u metalu zavara. Uključci mogu biti: nemetali (troska, prašak) i metali (volfram, bakar...) Uključci troske nastaju zbog nedovoljnog čišćenja među slojevima zavara (posebno često kod kutnih zavara). Troska se često otežano čisti i u dubokim žlijebovima i ostrim uglovima ili kada je prethodni zavar previše ispupčen. Uključak troske može nastati i podvlačenjem rastaljene troske pod talinu metala pri premaloj brzini zavarivanja ili nepravilnoj tehnici rada. Talina troske tada "bježi" ispred električnog luka. Općenito sve vrste uključaka smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti i smanjenja presjeka zavarenog spoja. Na mjestima uključaka povećane su koncentracije naprezanja. Uključci oštih rubova djeluju kao inicijatori pukotina. [27]

Izbjegavanje uključaka: [27]

- Detaljno uklanjanje troske i prašine prilikom višeslojnog zavarivanja
- Ispravan otvor žlijeba
- Ispravni parametri i pravilna tehnika rada kod ručnog zavarivanja
- Brušenje svih nastavaka zavara



Slika 27. Čvrsti uključak u zavarenom spoju [27]

Naljepljivanje (slika 28) je pogreška nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru. Nastaje kod zavarivanja taljenjem tako da se talina ohladi na hladnim nepretaljenim površinama osnovnog materijala. Nepotpuni provar je nedovoljno protaljivanje po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprotaljivanje korijena zavora. Po geometriji te su pogreške najbližnje pukotinama. [27]

Najčešći uzroci naljepljivanja:

-nepravilna priprema spoja - Preuzak žlijeb ne omogućava protaljivanje u dnu, pogotovo kod slabe struje zavarivanja ili prevelikog promjera elektrode.

-neispravni parametri zavarivanja

-nepravilna tehnika rada

Neprovar korijena pojavljuje se kao:

- Unutarnja pogreška u zavaru (kod obostranog zavarivanja)

- Vanjska pogreška (kod zavarivanja samo sa jedne strane)

Uzroci nedovoljnog provara:

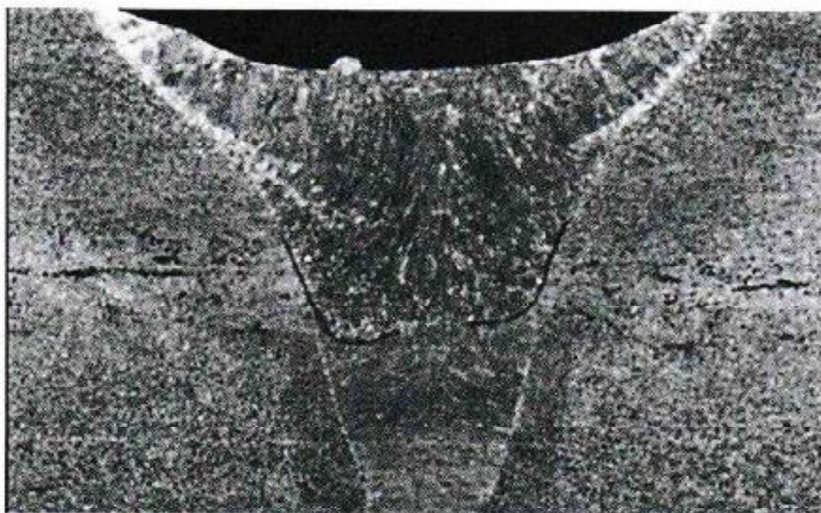
- Nepravilna priprema spoja (pre mali razmak u korijenu, preveliko smaknuće limova, pre mali kut žlijeba, prevelika visina grla žlijeba)

- Neispravni parametri zavarivanja

- Nepravilna tehnika rada (loše njihanje)

Provar korijena zavora najsloženiji je dio tehnike rada zavarivača kod ručnog zavarivanja. Pogreške naljepljivanja u zavarenim spojevima u pravilu nisu dopuštene.

Takve pogreške obično su polazna točka loma, nastanka pukotine u eksploatacijskim uvjetima konstrukcije. Naljepljivanje se može otkriti metodama ne razornih ispitivanja: ultrazvučnom tehnikom i radiografskom tehnikom. [27]



Slika 28. Pogreška naljepljivanja [27]

Svako odstupanje od propisanog oblika zavora smatra se pogreškom oblika zavora. Njihov je značaj ne samo u krivoj estetici zavora već i u smanjenoj nosivosti zavarenog spoja, naročito kod dinamički opterećenih konstrukcija. Sve ove pogreške vidljive su već pri vizualnoj kontroli zavarenih spojeva. Antikorozivna zaštita koja se provodi nakon zavarivanja također postavlja zahtjeve na kvalitetu i izgled zavora kako bi se nanošenje boja, premaza ili pocinčavanje uspješno provelo. Zajedi uz zavar djeluju kao inicijacija pukotine iz koje se može javiti potpuni prijelom spoja. Posebno su opasni kod dinamički opterećenih konstrukcija. Kod statički manje opterećenih konstrukcija u određenim slučajevima su i dopustivi. Zajede je potrebno izbrusiti i zaobliti, a ako su i veći potrebno ih je ispuniti navarivanjem. [27]

6. Zaključak

Iz ovog rada se može zaključiti da nehrđajući čelici moraju u sebi imati određeni postotak kroma kako bi bili postojani na koroziju. U praksi se najviše koriste austenitni nehrđajući čelici zbog svojih dobrih svojstva pri povišenim temperaturama i oblikovljivosti. Primjena nehrđajućih čelika raste iz dana u dan. Otkrivaju se nove mogućnosti upotrebe nehrđajućih čelika koji mogu zamijeniti skuplje materijale jer imaju slična ili bolja svojstva. Veliki utjecaj kod zavarivanja nehrđajućih čelika ima kemijski sastav i razina unosa topline. TIG postupak se široko primjenjuje kod zavarivanja nehrđajućih čelika zbog zavarivanja u atmosferi zaštićenoj inertnim plinom i jer se nakon zavarivanja dobije sastav zavara jednak osnovnom materijalu. Zaštitni plinovi koji se primjenjuje kod TIG zavarivanja nehrđajućih čelika su argon ili mješavina argona i helija, argona i dušika ili argona i vodika. Mješavine plinova daju bolja svojstva od čistog argona. Svaka od ovih mješavina ima svoja karakteristična svojstva za određenu primjenu. Nisu sve mješavine plinova namijenjene za sve vrste nehrđajućih čelika. Primjerice, mješavina argona i vodika se koristi samo kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, dok se mješavina argona i helija može koristiti za sve vrste nehrđajućih čelika.

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, MIHAEL GOLUBIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ODABIR ZAŠTITNIH PUNOVA KOD TIG ZAMENJIVAJA NEKADJANJICA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

MIHAEL GOLUBIĆ

Golubić
(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, MIHAEL GOLUBIĆ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ODABIR ZAŠTITNIH PUNOVA KOD TIG ZAMENJIVAJA NEKADJANJICA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

MIHAEL GOLUBIĆ

Golubić
(vlastoručni potpis)

7. Literatura

- [1] Outokumpu, Handbook of Stainless Steel, Outokumpu Oyj, Finlandm 2013.
- [2] A. O'Brien, Welding Handbook Ninth edition Volume 2, Amer Welding Society, 2004.
- [3] Kožuh S.: Specijani čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [4] M. Gojić, Tehnike spajanja i zadržavanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [5] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [6] N.R. Baddoo, Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities, Journal of Constructional Steel Research Volume 64, 2008, 1199-1206 str
- [7] <https://hoto.com/portfolio/plumbing-system/> dostupno 04.08.2020
- [8] <http://ba.aoyama-elevator.jp/escalator/indoor-and-outdoor-stainless-steel-escalator.html> dostupno 04.08.2020
- [9] D. Kotecki, Stainless Steels Properties – How To Weld Them Where To Use Them, The Lincoln Electric Company, 2003.
- [10] Schaffler diagram, <https://tubingchina.com/Schaeffler-and-Delong-Diagrams-for-Predicting-Ferrite-Levels-in-Austenitic-Stainless-Steel-Weld.htm> dostupno 05.07.2020
- [11] M. Horvat, V. Kondić D. Brezovečki Teorijske i praktične osnove TIG postupaka zavarivanja, Tehnički glasnik Vol.9 No.2, 2015, 426-432 str
- [12] BS EN ISO 4063: 2009, Welding and allied processes — Nomenclature of processes and reference numbers
- [13] TIG postupak zavarivanja, Tehnologija strojarskih instalacija, <https://tsi.webador.com/tois-tig-postupak-zavarivanja> dostupno 05.07.2020
- [14] S. Kralj, Š. Andrić, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [15] Izvor struje za zavarivanje ,https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html dostupno 05.07.2020
- [16] Kuća zavarivanja, <https://www.kuczavarivanja.com/jasic-aparat-tig200-dc/proizvod/1781/> dostupno 09.07.2020
- [17] KERAMIČKA SAPNICA DWT 17/18/26, <https://trgovina.sigmat.hr/hr/24-tig-oprema-za-zavarivanje>
- [18] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 2
- [19] Volfram elektrode označavanje, <https://hr.puntomarinero.com/tungsten-electrodes-sharpening-welding-marking/> dostupno 13.07.2020
- [20] I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić Primjena TIG postupaka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik Vol.8 No.4, 2015, 202-208 str
- [21] Zavarivanje, <https://www.dobra.hr/zavarivanje-aluminija/>
- [22] The Welding of Stainless Steels by Pierre-Jean Cunat, Euro Inox, 2007.
- [23] ISO 14175:2008, Welding consumables — Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [24] <https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje>, dostupno 14.09.2020
- [25] <https://gtg-plin.com/assets/zavarivanje-hr.pdf>, dostupno 14.09.2020

- [26] M. Horvat, „Metalurgija zavarivanja II. Dio“, nastavni materijali na predmetu Tehnologija III [Merlin], Sveučilište sjever Varaždin, 2020.
- [27] M. Bušić, Predavanje 1-3, nastavni materijali na predmetu Tehnologija III [Merlin], Sveučilište sjever, Varaždin, 2020.
- [28] What is hot cracking (solidification cracking)?, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking> dostupno 26.07.2020
- [29] ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Appearance-of-cold-cracking-in-the-heat-affected-zone-of-spot-welded-DP780-015-C_fig13_257810935 dostupno 27.07.2020

Popis slika

Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3].....	13
Slika 2. Mikrostruktura austenitnog čelika AISI 316L [3].....	15
Slika 3. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [1]	19
Slika 4. Vodovodne cijevi od nehrđajućeg čelika [7].....	21
Slika 5. Pokretne stepenice od nehrđajućeg čelika [8]	22
Slika 6. Schaeffler- ov dijagram za nehrđajuće čelike [10].....	23
Slika 7. Mikrostruktura zavara feritnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1].....	24
Slika 8. Mikrostruktura zavara martenzitnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]	25
Slika 9. Mikrostruktura zavara dupleks čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1].....	26
Slika 10. Mikrostruktura zavara austenitnog čelika, osnovni metal desno i zona utjecaja topline lijevo [1]	27
Slika 11. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [11]	28
Slika 12. Shematski prikaz TIG uređaja [13]	29
Slika 13. Karakteristika izvora struje [15].....	30
Slika 14. Uređaj izvora struje za TIG zavarivanje [16].....	31
Slika 15. Prikaz pištolja s vodenim hlađenjem u presjeku [2].....	32
Slika 16. Sapnice za TIG zavarivanje iz glinice [17]	33
Slika 17. Vrste voframovih elektroda [19]	35
Slika 18. Zavar cijevi TIG metodom zavarivanja [21].....	38
Slika 19. Preporuke kod odabira zaštitnog plina proizvođača Linde [25].....	46
Slika 20. Dijelovi zavarenog spoja [26]	47
Slika 21. Položaji i oznake za zavarivanje limova [4].....	51
Slika 22. Položaji i oznake zavarivanja za cijevi [4]	51
Slika 23. Solidifikacijska pukotina u zavaru [28].....	53
Slika 24. Likvacijska pukotina u ZUT-u [27].....	54
Slika 25. Hladne pukotine [29].....	55
Slika 26. Poroznost [27]	56
Slika 27. Čvrsti uključak u zavarenom spoju [27].....	57
Slika 28. Pogreška naljepljivanja [27].....	58

Popis tablica

Tablica 1 Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [3].....	13
Tablica 2 Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika s <10% delta ferita u mikrostrukturi [3].	16
Tablica 3 Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika bez δ -ferita u mikrostruktur [3]	17
Tablica 4 Parametri zavarivanja za sučeljeni i kutni rubni spoj [9]	37
Tablica 5 Parametri zavarivanja za kutne i preklopne spojeve [9].....	37
Tablica 6 Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [11]	41
Tablica 7 Kategorizacija plinova za zavarivačke i srodne postupke [23]	42
Tablica 8 Zaštitni plinovi proizvođača Messer croatia plin [24].....	44
Tablica 9 Zaštitni plinovi proizvođača Linde [25]	45
Tablica 10 Označavanje i primjena zavarenih spojeva [4].....	48