

# Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

---

**Kocijan, Filip**

**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:122:511399>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI



**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 325/PS/2020**

## **Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika**

**Filip Kocijan, 2092/336**

Varaždin, lipanj 2020. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 325/PS/2020

## **Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika**

**Student**

Filip Kocijan, 2092/336

**Mentor**

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

Varaždin, lipanj 2020. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Filip Kocijan

MATIČNI BROJ 0336021354

DATUM 2020

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Automated TIG welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

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

## Zadatak završnog rada

BROJ 325/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 TIG zavarivanje takvih materijala. Opisati TIP TIG varijantu postupka sa automatiziranim dodavanjem dodatnog materijala. Opisati ostale varijante robotizacije i automatizacije TIG postupka zavarivanja. Navesti i opisati nekoliko primjera primjene automatiziranog TIG postupka u stvarnoj proizvodnji.

ZADATAK URUČEN

18.09.2020.



M. Bušić

## **Predgovor**

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na uloženom vremenu i trudu, te na svim savjetima kojima me usmjeravao u pisanju ovog završnog rada. Također, zahvaljujem se svim profesorima i osoblju na Sveučilištu Sjever koji su me naučili svim znanjima i vještinama koje sam iskoristio za pisanje, te učinili moj boravak na Sveučilištu Sjever ugodnim.

Veliku zahvalu dugujem i svojoj obitelji, prijateljima, kolegama, te djevojci Tei koji su mi bili podrška, a isto tako i motivacija tijekom mojeg studiranja.

## **Sažetak**

U ovom radu će se govoriti o TIG zavarivanju nehrđajućih čelika, te automatizaciji postupka. Detaljno će se obraditi nehrđajući čelici, njihova podjela i svojstva; TIG zavarivanje, karakteristike postupka, te komponente; karakteristike TIG zavarivanja nehrđajućih čelika; automatizacija samog procesa, podjela automata za zavarivanje, primjeri raznih automata i njihova primjena, te detaljnije o Rail Bull automatu za zavarivanje.

Ključne riječi: nehrđajući čelici, TIG zavarivanje, automati za zavarivanje

## **Summary**

In this work we will talk about TIG welding of stainless steel and process automation. We will explain in detail stainless steel, its classification and properties; TIG welding, characteristics of that process and components; characteristics of TIG welding of stainless steel; automation of the process, classification of welding automats, examples of different automats, its usage and detailed about Rail Bull welding automat.

Key words: stainless steels, TIG welding, welding automats



## Popis korištenih kratica

<b>ZT</b>	Zona taljenja
<b>ZUT</b>	Zona utjecaja topline
<b>OM</b>	Osnovni materijal
<b>DM</b>	Dodatni materijal
<b>IKK</b>	Interkristalna korozija
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitnim plinom
<b>GTAW</b>	Gas Tungsten Arc Welding Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitnim plinom
<b>MIG</b>	Metal Inert Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina
<b>MAG</b>	Metal Active Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers Američko Društvo Inženjera Strojarsva
<b>AWS</b>	American Welding Society Američko Društvo za Zavarivanje

# Sadržaj

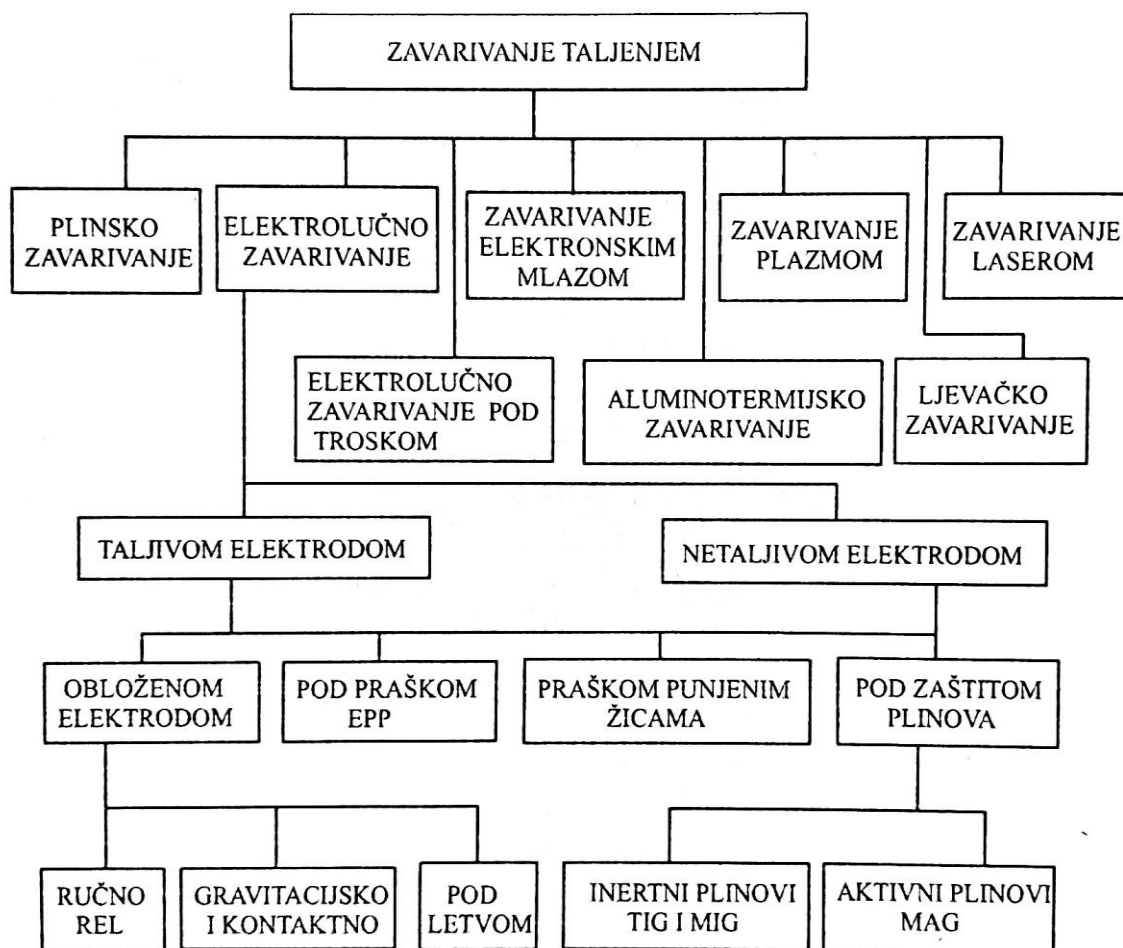
1.	Uvod.....	1
2.	Obrada zadatka.....	3
2.1.	Nehrđajući čelici .....	3
2.1.1.	<i>Feritni i superferitni čelici</i> .....	4
2.1.2.	<i>Martenzitno-feritni, martenzitni i mekomartenzitni čelici</i> .....	6
2.1.3.	<i>Austenitni i austenitno-feritni čelici s <math>\leq 10\%</math> <math>\delta</math> ferita</i> .....	7
2.1.4.	<i>Austenitno-feritni duplex čelici</i> .....	8
2.2.	TIG zavarivanje.....	9
2.2.1.	<i>Pistolji za TIG zavarivanje</i> .....	12
2.2.2.	<i>Vrste zavarenog spoja</i> .....	15
2.2.3.	<i>Izvori energije za zavarivanje</i> .....	17
2.2.4.	<i>Pozicije TIG zavarivanja</i> .....	18
2.2.5.	<i>Greške pri zavarivanju</i> .....	20
2.3.	Specifičnosti TIG zavarivanja nehrđajućih čelika.....	21
2.3.1.	<i>Zaštitni plinovi i sapnice</i> .....	24
2.3.2.	<i>Metoda „vruće žice“</i> .....	27
2.4.	Robotizacija i Automatizacija TIG zavarivanja .....	29
2.4.1.	<i>Automatizacija</i> .....	29
2.4.2.	<i>Automatizacija TIG zavarivanja</i> .....	30
2.4.3.	<i>Automati za pravocrtno zavarivanje</i> .....	30
2.4.4.	<i>Automati s kružnim gibanjem</i> .....	34
2.4.5.	<i>Višenamjenski sustavi za zavarivanje</i> .....	36
2.4.6.	<i>Robotizacija zavarivanja</i> .....	37
2.4.7.	<i>Rail Bull automat za zavarivanje</i> .....	38
2.4.8.	<i>Primjeri primjene automatiziranog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika</i> .....	42
3.	Zaključak.....	44
4.	Literatura.....	45
5.	Popis slika .....	48
6.	Popis tablica .....	50

# 1. Uvod

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova sa ili bez dodatnog materijala. Svrha zavarivanja je dobivanje nerastavljivog spoja jednoličnih svojstava. Tijekom zavarivanja se zona spoja dovodi u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se mogu spajati metalni i nemetalni materijali.

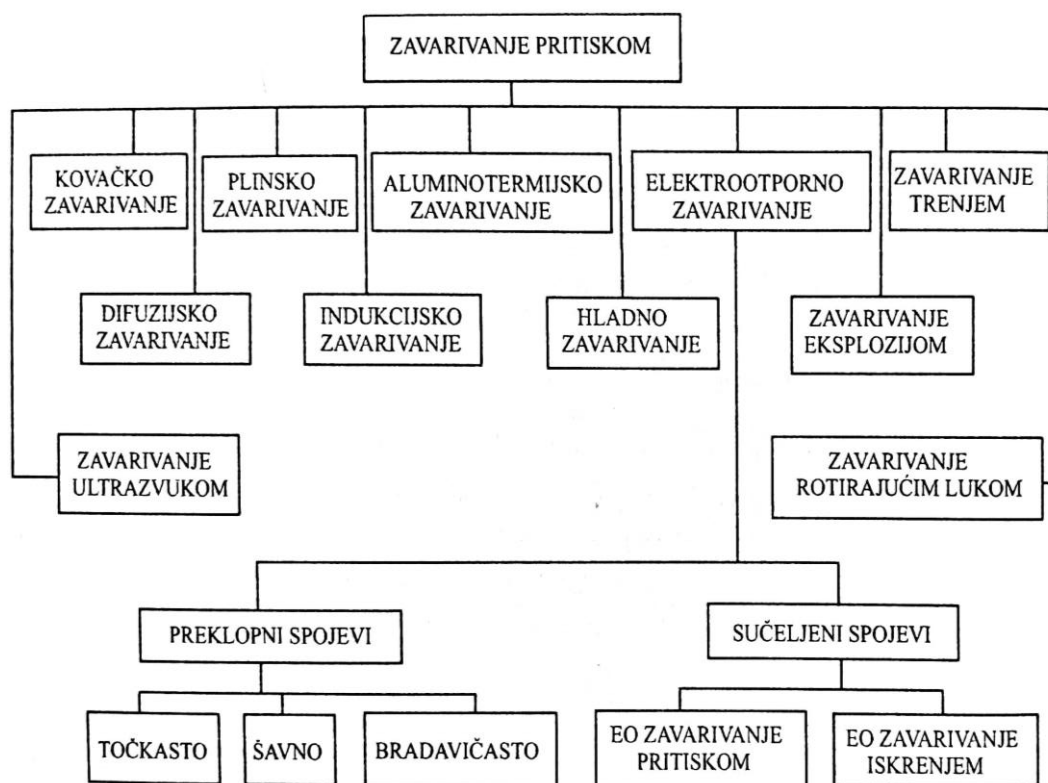
Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT). ZT je dio zavarenog spoja koji se tijekom zavarivanja tali, i u kojem dolazi do kristalizacije i skrućivanja. Sastoji se od osnovnog materijala (OM) ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala (DM). ZUT je dio OM-a u kojem je došlo do promjene kristalne strukture utjecajem topline unešene zavarivanjem. Širina ZUT-a ovisi o unosu topline, a najčešće je 2-8 mm. [1]

Postupci zavarivanja dijele se na dvije velike skupine prema vrsti zagrijavanja materijala. Zavarivanje taljenjem predstavlja vrstu zavarivanja pri kojoj se unosi toplina pomoću struje, uspostavljanjem električnog luka, plinom, plamenom ili nekim drugim načinom (Slika 1.1).



Slika 1.1 Zavarivanje taljenjem [1]

Zavarivanje pritiskom predstavlja vrstu zavarivanja u kojoj spoj nastaje kombinacijom toplinske i mehaničke energije ili samo mehaničke (Slika 1.2). Pri takvom zavarivanju dolazi do zagrijavanja materijala toplinskim unosom ili bez dodatnog toplinskog unosa, ali s dodatnim pritiskom materijala. Zavarivanje trenjem je primjer zavarivanja pritiskom gdje nema dodatnog toplinskog unosa, već se toplina razvija trenjem između dvaju materijala, te se nakon njihovog taljenja oni pritiskom spajaju.



Slika 1.2 Zavarivanje pritiskom [1]

Zavarivanjem se spajaju mnogi različiti metali, pa tako i nehrđajući čelici.

Čelici spadaju u željezne slitine. To su najvažniji tehnički primjenjivi materijali. Željezne slitine i čelici obuhvaćaju više od 80% mase svih slitina u industrijskoj upotrebi. Razlog tome je što im je proizvodnja relativno jeftina, a proizvode se u velikim količinama s jasno definiranim kemijskim sastavom. Čelici se dobivaju legiranjem željeza ugljikom. Podjela se vrši prema postotku ugljika stoga su čelici željezni materijali s manje od 2,06% C, a oni s više od 2,06% C se nazivaju željezni ljevovi. Fazni i mikrostrukturni sastav željeznih slitina se opisuje stabilnim i metastabilnim faznim dijagramima, a čelici se sastoje samo od faza i mikrostruktura metastabilnog dijagrama stanja.

Osim ugljika željezu se dodaju i drugi legirni elementi. Pri većim udjelima legirnih elemenata, udio ugljika može biti i nešto veći u čelicima od 2,06%. [2]

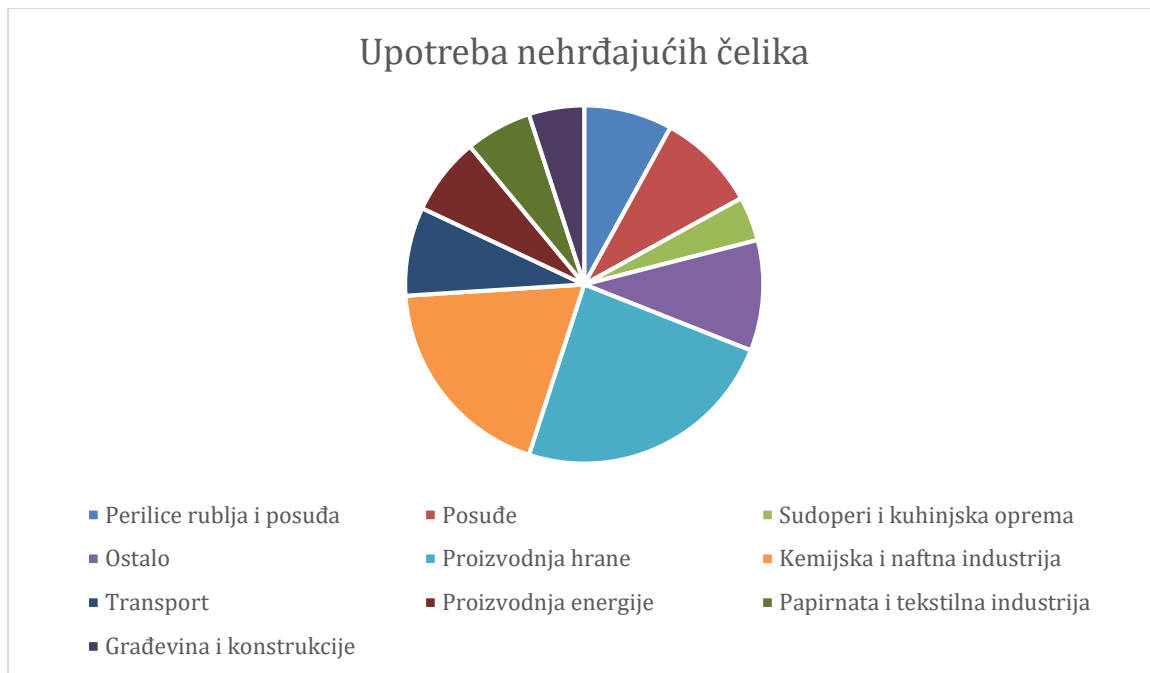
## 2. Obrada zadatka

### 2.1. Nehrdajući čelici

Čelici su najvažniji tehnički materijali koji se koriste u gotovo svim područjima tehnike. S aspekta korozije, čelici su relativno loši materijali jer korodiraju već na zraku. Nehrdajući čelici podvrsta su čelika, a odlikuje ih visoka otpornost prema koroziji. Takva visoka otpornost prema koroziji postiže se legirnim elementima. Najvažniji legirni element u nehrđajućim čelicima je krom, a potrebno je imati najmanje 12% kroma u čeliku kako bi se smatrao nehrđajućim. Krom na površini čelika tvori nevidljivi film na površini koji štiti čelik od korozije. Osim kroma u modernim nehrđajućim čelicima nalaze se i mnogi drugi legirni elementi. Neki od njih su: molibden, nikal, mangan, dušik... [3]

Najzaslužniji za rani razvoj nehrđajućih čelika bili su znanstvenici iz Francuske, Njemačke i Ujedinjenog kraljevstva. 1821. francuski minerolog Berthier pisao je o Cr-čelicima koji su otporni na kiseline. No ti Cr-čelici nisu odmah oživjeli zbog opovrgavanja njihovih svojstava od strane engleskog metalurga Hadfielda, koji je vršio ispitivanje u sumpornoj kiselini. Kasnije su znanstvenici nastavili istraživanje Cr i Cr-Ni čelika i došli do saznanja kako takvi čelici mogu dugo vremena ostati u agresivnim okolinama, a da ne korodiraju. 1930. razvijeni su prvi duplex čelici koji su imali odlična svojstva, otpornost na toplinu i kiselinu no njihova mana je bila ne mogućnost zavarivanja. 1970. znanstvenici su uspjeli proizvesti duplex čelike koji se daju zavarivati dodavanjem dušika. [4]

Razvojem standardizacije nehrđajućih čelika njihova mogućnost iskorištenja postala je puno šira. Nehrdajući čelici se najčešće proizvode u obliku hladno valjanih ploča, šipki i žica te toplo valjanih ploča. Zbog slabijih svojstava od nekih drugih čelika, često je u konstrukcijama potrebno kombinirati nehrđajuće čelike s drugim materijalima, npr. beton i ugljični čelici. Osim u građevini nehrđajući čelici se koriste na mjestima agresivne atmosfere. Isto tako se koriste i u tvornicama za proizvodnju hrane, koriste se za proizvodnju posuđa, sudopera te perilica za pranje rublja i posuđa. [4], [5]



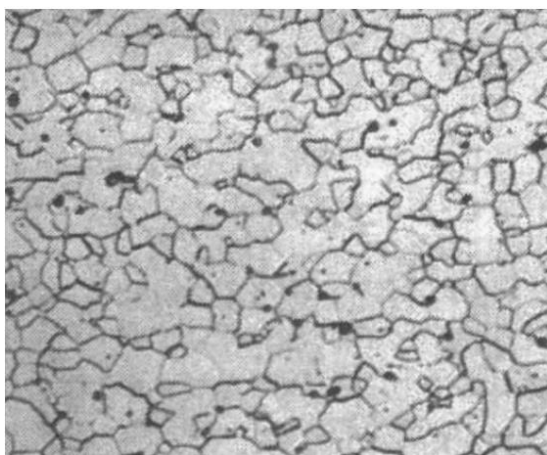
*Slika 2.1 Upotreba nehrđajućih čelika [4]*

Najvažnija podjela nehrđajućih čelika je prema mikrostrukтури. Tako postoje:

- Feritni čelici
- Superferitni čelici (ELA – Extra Low Additions)
- Martenzitno-feritni čelici
- Martenzitni čelici
- Mekomartenzitni čelici
- Austenitni i austenitno-feritni čelici s <math><10\% \delta</math> ferita
- Austenitno-feritni duplex čelici [6]

### **2.1.1. Feritni i superferitni čelici**

Feritni čelici sadrže <math><0,1\%</math> C i 13-17 %Cr zbog čega zadržavaju feritnu mikrostrukтуру (Slika 2.2) pri gotovo svim temperaturama, pa se ne mogu zakaliti. Neka svojstva feritnih čelika: relativno su mekani; magnetični su; relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900 °C, te opasnosti od krhkosti pri duljem držanju na temp. 350-520 °C, kao i zbog mogućnosti nastajanja krhke  $\sigma$ -faze (FeCr) pri dugom držanju na 520-850 °C; postojani prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji sadrže sumpor; manje su postojani prema kloridnim otopinama, nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije; umjereno su postojani na pojavu jamičastog oštećenja ako sadrže Mo; nisu postojani na rastaljene metale i reducirajuće medije; jeftiniji su od ostalih nehrđajućih čelika. [6]



Slika 2.2 Mikrostruktura feritnog čelika (povećanje 100:1) [6]

Sastavi, svojstva i primjeri primjene nekih vrsta feritnih čelika dani su u tablici 2.1.

Oznaka čelika EN (stara HRN)	Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva u žarenom stanju			Posebna otpornost i primjeri primjene
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ , min N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , min, %	
X6Cr17 (Č4174)	-	450...600	270	20	korozijski postojan pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji.
X6CrMo17	1,1Mo	450...650	270	20	posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora
X8CrTi17 (Č4971)	0,7Ti	450...600	270	20	kao X6Cr17, otporniji na rast zrna za zavarene dijelove kućanskih aparata, sita i okvire
X8CrNb17	0,9Nb	450...600	270	20	dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove)
X8CrMoTi17	1,75Mo 0,65Ti	450...600	300	20	za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća. <i>Nije za udarni rad!</i>
X12CrMoTi25	2,5Mo 1,8Ti	650...750	450	12	za otopine s visokim udjelom slobodnog klora
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700...850	550	12	za obradu odvajanjem čestica na automatima: vijke, matice, zakovice, male zupčanike, male osovine

Tablica 2.1 Feritni čelici [6]

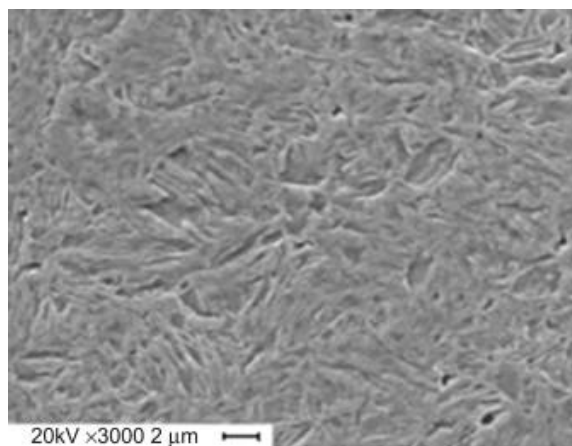
Superferitni čelici su feritni čelici poboljšanih svojstava. Ta poboljšana svojstva se postižu povišenjem čistoće, sniženjem %C i povišenjem %Cr te legiranjem s Mo i Ni te Ti i Nb. Oni imaju povišenu otpornost na kloridnu napetosnu koroziju i interkristalnu koroziju, žilavost pri niskim temperaturama, te granicu razvlačenja. Također su nižih cijena od austenitnih čelika. [6]

### 2.1.2. Martenzitno-feritni, martenzitni i mekomartenzitni čelici

Martenzitno-feritni čelici sadrže do 0,20 %C i 13-17 %Cr. Optimalna svojstva postižu u kaljenom i visokopopuštenom stanju. Imaju slabiju korozijsku postojanost od feritnih čelika, no višu čvrstoću, tvrdoću, otpornost na trošenje i ne nagnju krhkosti. Postojani su prema djelovanju vode, vodene pare i vlažnog zraka. Primjenjuju se za pribor za jelo, za dijelove vodnih turbina, kirurške instrumente, strojne dijelove u proizvodnji nitrata (dušične) kiseline itd.

Martenzitni čelici imaju povišeni maseni udio ugljika (0,15-1,0 %C), te preko 13 %Cr. Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Razlikuju se konstrukcijski i alatni martenzitni čelici. Konstrukcijski sadrže < 0,30 %C, što je manje od alatnih, i poboljšavaju se. Kod njih je u prvom planu korozijska postojanost, dok je kod alatnih još i otpornost na abrazijsko trošenje. Martenzitni čelici imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje. Primjenjuju se pri temperaturama do 400-500 °C, te do  $R_{p0,2}=300-470$ .

Mekomartenzitni čelici imaju < 0,10 %C, najčešće 0,03-0,05 %C. Slabija mehanička svojstva uzrokovana manjim udjelom ugljika, poboljšavaju se legiranjem s Cr, Ni i Mo. Popuštaju se pri temperaturi 450-700 °C. Temperatura popuštanja se određuje ovisno o željenim svojstvima, maksimalna tvrdoća (čvrstoća) ili maksimalna žilavost. Dobra im je postojanost na opću koroziju, ali slaba na jamičastu koroziju. Primjenjuju se za dijelove izložene nečistom zraku i vodi. Neki primjeri su: lopatice vodenih turbina, dijelovi pumpa, valjci za papir i sl. [6]



Slika 2.3 Mikrostruktura martenzita [7]

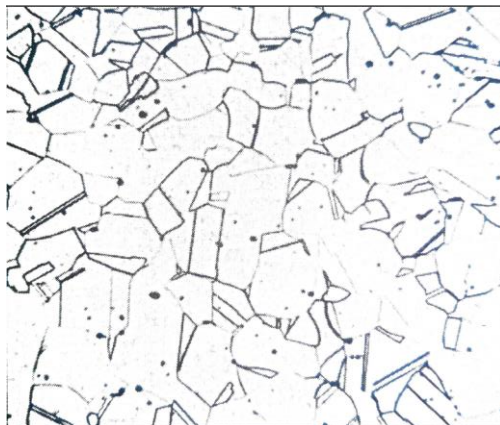


### 2.1.3. Austenitni i austenitno-feritni čelici s $\leq 10\%$ $\delta$ ferita

To su visokolegirani čelici s Cr i Ni (Mn) koji proširuju austenitno područje. Karakteristike kemijskog sastava su:

- maseni udio ugljika što manji ( $< 0,15\% \text{C}$ )  $\rightarrow$  manja opasnost od stvaranja karbida
- maseni udio Cr što viši ( $> 18\%$ )  $\rightarrow$  antikorozivnost
- maseni udio Ni što viši ( $> 8\%$ )  $\rightarrow$  nastanak austenitne mikrostrukture (Ni je  $\gamma$ -geni element, mora prevladati djelovanje Cr koji je  $\alpha$ -geni)
- moguće legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta  $\rightarrow$  pospješuju pojavu ferita, djeluju stabilizirajuće kod opasnosti od IKK
- povišen maseni udio N ( $0,2-0,4\%$ )  $\rightarrow$  povišenje čvrstoće i otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju

Neka od svojstava austenitnih čelika su: nemagnetičnost; dobro oblikovljivi u hladnom stanju, a hladnom deformacijom mogu očvrnuti; dobra otpornost na puzanje pri temperaturi  $> 600\text{ }^\circ\text{C}$  (legirani s Mo, W i V); zadovoljavajuća žilavost pri niskim temperaturama; otporno na organske i anorganske kiseline, lužine i soli; u nekim uvjetima podložni IKK. [6]



Slika 2.4 Mikrostruktura austenitnog čelika [6]

Mehanička svojstva austenitno-feritnih čelika pri  $20\text{ }^\circ\text{C}$ :  $R_m=700-750\text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0,2}=185-225\text{ N/mm}^2$ ,  $180-190\text{ HB}$ . Neki su primjenjivi do  $300$ , pa čak i do  $450\text{ }^\circ\text{C}$ . Otporni na različite organske i anorganske kiseline (X5CrNi18-9), na IKK i bez toplinske obrade nakon zavarivanja (X10CrNiTi18-9), na dušičnu kiselinu (X5CrNiNb18-9), neoksidirajuće kiseline (X5CrNiMo18-10, X10CrNiMoNb18-10) i na točkastu koroziju (X5CrNiMo18-10). Primjeri primjene austenitno-feritnog čelika: predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u

pivovarama, ortopediji, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrije filмова, industrija celuloze, boje, ulja, celuloze.

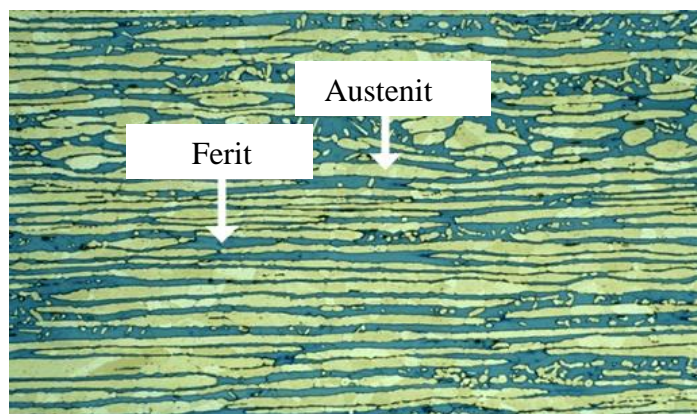
Mehanička svojstva austenitnih čelika:  $R_m=740 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0,2}=225-275 \text{ N/mm}^2$ , oko 190 HB. Neki austenitni čelici imaju posebno povišenu postojanost na sumpornu i fosfornu kiselinu (X5NiCrMoCuNb20-18) te ne zahtijevaju naknadnu toplinsku obradu nakon zavarivanja. Primjeri primjene austenitnog čelika: industrija boja, umjetnih vlakana, tekstila, celuloze, foto pribora i kemikalija, plast. masa, gume.

Austenitni čelici sniženog masenog udjela ugljika ( $< 0,03 \text{ \%C}$ ) nose dodatnu oznaku L, LC ili ELC). Snižanjem masenog udjela ugljika se povećava otpornost na interkristalnu koroziju (manja mogućnost stvaranja Cr-karbida), no snižava se čvrstoća i otpornost na puzanje. Svojstva zavarljivosti i oblikovljivosti su bitno bolja od svojstava klasičnih austenitnih čelika.

Austenitni čelici se često legiraju dušikom koji je gamageni element, a jeftiniji od nikla. Dušik stvara intersticijske mješance sa željezom i nitride te tako povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću koje su male kod običnih austenitnih čelika. Osim toga se poboljšava i otpornost na napetosnu koroziju, te jamičastu koroziju. Zavarljivost je također dobra zbog malog masenog udjela ugljika i produljenog vremena inkubacije stvaranja karbida i krhkih faza.

#### 2.1.4. Austenitno-feritni duplex čelici

Duplex čelici sadrže dvije faze (Slika 2.5), austenitnu i feritnu, s time da feritna faza iznosi 40-60 %. Time se odstupa od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju, ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju (u kloridnom okolišu i na  $\text{H}_2\text{S}$ ), te na jamičastu koroziju. Zbog krhkosti ferita i mogućnost izlučivanja karbida po granicama zrna austenit/ferit, moguće su teškoće. Primjenjuju se u industriji nafte i plina, papira, petrokemijskoj i kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji, za cisterne na vozilima itd.



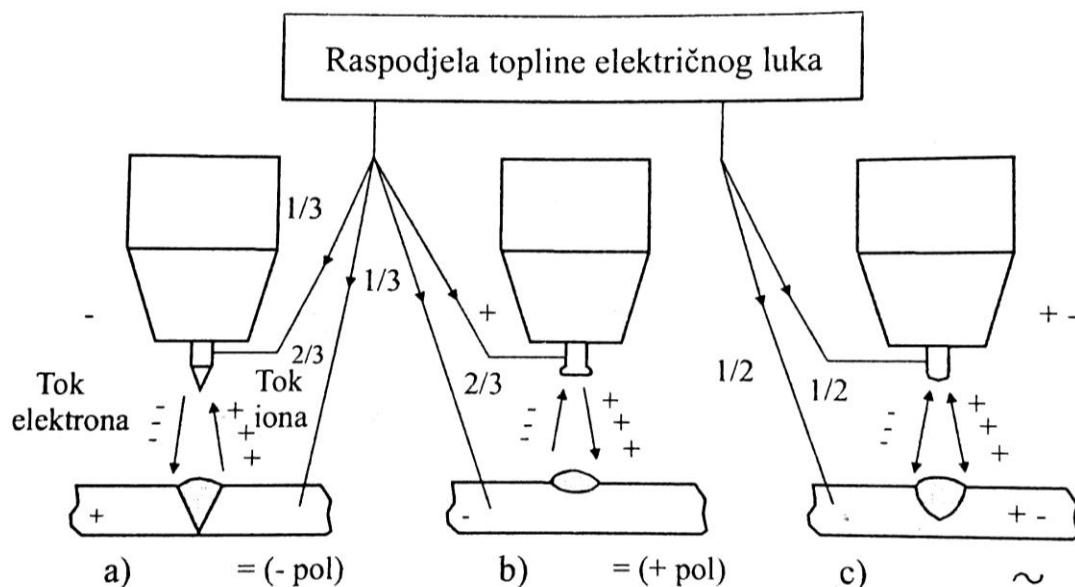
Slika 2.5 Mikrostruktura duplex čelika [8]

## 2.2. TIG zavarivanje

TIG (*engl. Tungsten Inert Gas*) zavarivanje je postupak zavarivanja materijala netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina. Još se naziva i GTAW zavarivanje (*engl. Gas tungsten arc welding*). Kod TIG zavarivanja se električni luk uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala, pri čemu se osnovni materijal tali. Prvotno se TIG zavarivanje razvilo za potrebe avioindustrije, za zavarivanje lakih metala, a kasnije se proširilo za kemijsku i procesnu industriju za zavarivanje nehrđajućih čelika, aluminijskih i bakra.

TIG postupak se provodi sa ili bez dodatnog materijala. Dodatni materijal je u obliku žica promjera 0,5-8 mm i duljine 1 m ili trake lima. Prilikom zavarivanja dodatni materijal se dodaje u prednji rub taline pod kutom od 10 do 20°. Dodatni materijal mora biti metalurški čist i površinski čist jer se u talini ne može pročistiti. Netaljiva volframova elektroda, za razliku od MIG i MAG zavarivanja služi samo za uspostavljanje električnog luka, a izrađuje se od čistog volframa ili uz dodatak torija, koji se koristi samo za istosmjernu struju, ili uz dodatak cirkonija, koji se koristi kod izmjenične struje za zavarivanje aluminijskih i magnezijevih. Osim za vrstu struje i materijal koji se zavaruje, značaj dodatnih elemenata je u tome da omogućavaju uspostavljanje i stabilniji luk pri malim strujama. Dimenzije elektrode su 0,6-8 mm promjer te duljine 50-175 mm.

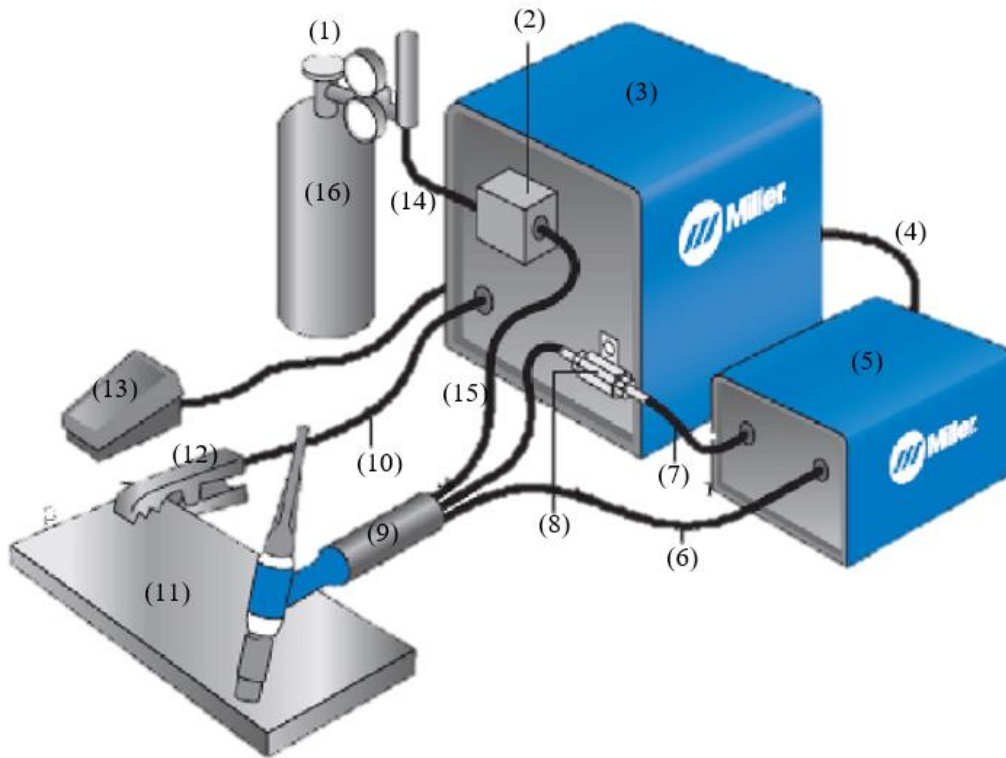
Za različite materijale i jakosti struje, potrebno je prethodno odgovarajuće pripremiti vrh elektrode brušenjem slika 2.6. Najčešći oblik elektrode koji se koristi je zašiljeni (Slika 2.6a). Pri tom je elektroda spojena na "–" pol te se 2/3 topline oslobađa na radnom komadu, a 1/3 na elektrodi. Stoga je takvom elektrodom moguće koristiti najveće struje zavarivanja. Kada je elektroda spojena na "+" (Slika 2.6b) 2/3 topline se oslobađa na elektrodi. Ta elektroda se koristi samo u posebnim slučajevima. Slučaj kada se koristi izmjenična struja oslobađa otprilike podjednaku struju na elektrodi i radnom komadu. Takva vrsta elektrode se koristi samo za zavarivanje Al, Mg i njihovih legura. [1]



Slika 2.6 Oblik vrha elektrode i količina zagrijanosti ovisno o struji [1]

Iako je W-elektroda netaljiva ona se troši zbog erozije i doticanja s OM-om. Prosječno trajanje W-elektrode duljine 170 mm je oko 30 sati rada, a to se može produžiti pravilnim opterećenjem.

TIG postupak može biti ručni, poluautomatski i automatski. Vršni se na način da se radni komad spoji na izvor struje jednim vodičem, a drugim vodičem se spaja pištolj za zavarivanje (W-elektroda). Zaštitni plin također izlazi iz sapnice na pištolju, a pištolj je gumenim crijevom spojen na čeličnu bocu. Pritiskom na gumb na pištolju ili papučicu počinje teći zaštitni plin i sredstvo za hlađenje pištolja. Zatim se pištolj približi radnom komadu, uspostavlja se električni luk koji tali osnovni materijal, a u tu talinu (kupku) zavarivač dodaje žicu, koja s OM-om tvori zavareni spoj. Unos struje regulira se pritiskom na gumb koji se nalazi na pištolju ili pomoću papučice. Jakost struje zadana je u nekom rangu (npr. 90 - 110 A). Papučica omogućuje precizniji unos struje, no ponekad nije moguće koristiti papučicu (npr. rad na ljestvama). [1]

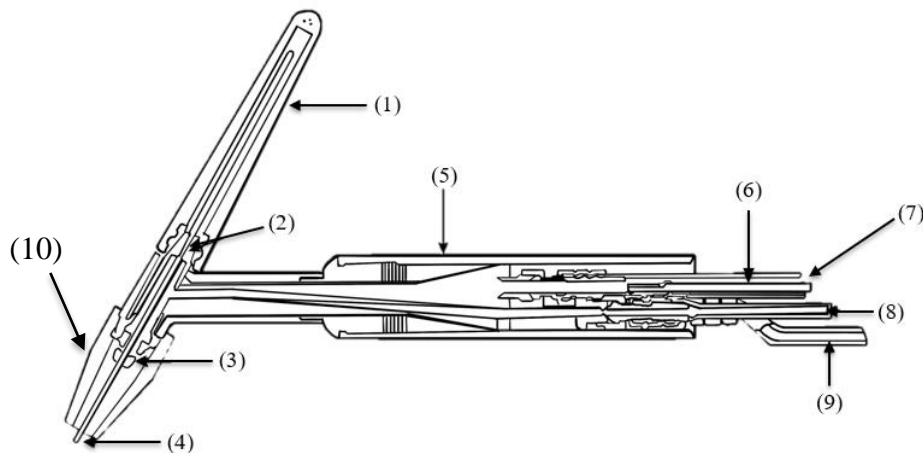


Slika 2.7 Oprema za TIG zavarivanje [9]

Oprema za TIG zavarivanje (Slika 2.7):

1. Regulator plina i manometar
2. Ventil za plin
3. Izvor struje
4. Izvor struje za sustav za hlađenje
5. Sustav za hlađenje
6. Izlaz rashladne tekućine
7. Ulaz rashladne tekućine
8. Adapter za rashladnu tekućinu
9. Pištolj
10. Veza za radni komad
11. Radni komad
12. Stezaljka za radni komad
13. Papučica za upravljanje jakosti struje
14. Ulaz plina
15. Izlaz plina
16. Zaštitni plin

### 2.2.1. Pištolji za TIG zavarivanje



Slika 2.8 Pištolj za TIG zavarivanje [10]

Postoje dvije vrste pištolja za zavarivanje, a dijele se prema načinu hlađenja. Tako postoje pištolji s plinskim i zračnim hlađenjem te pištolji s vodenim hlađenjem. Pištolji s vodenim hlađenjem omogućavaju veće struje zavarivanje zbog odvođenja toplote. Svaki pištolj za TIG zavarivanje ima svoju oznaku, a sastoji se od kratice proizvođača, te brojčane oznake i oznake slovima o kakvoj se podvrsti radi. Pištolji za TIG zavarivanje dolaze u raznim varijantama. Neke od specifičnosti koje se nalaze na pojedinim pištoljima su: fleksibilna glava, ventil za paljenje plina, te različiti prihvatci za dovod plina i dovod struje. Pištolji mogu imati različite nagibe glave na kojoj se nalazi sapnica ovisno o položaju zavarivanja. Većina pištolja ima kut nagiba 120° (slika 2.9) no mogu još biti 90° i 180°, a postoje posebni pištolji s fleksibilnom glavom (Slika 2.10) ili pištolji s rotacijskom glavom (Slika 2.11).

Dijelovi pištolja za TIG zavarivanje (Slika 2.8):

1. Stražnji poklopac
2. Čahura za zatezanje
3. Izlaz plina
4. W-elektroda
5. Ručka pištolja
6. Izvor struje
7. Izlaz rashladne tekućine
8. Ulaz plina
9. Ulaz rashladne tekućine
10. Sapnica



*Slika 2.9 TIG pištolj s nagibom glave 120° [11]*



*Slika 2.10 Pištolj s fleksibilnom glavom [12]*



*Slika 2.11 Pištolj s rotirajućom glavom [13]*

TIG pištolji su najčešće prilagođeni zavarivaču kako bi mu bilo najlakše zavarivati u raznim pozicijama. S obzirom da se automati mogu prilagoditi na bilo koju poziciju, proizvode se pištolji posebno namijenjeni automatima za zavarivanje. Oni su izgledom malo drugačiji od klasičnih pištolja za zavarivanje. Pištolji za automate također mogu biti hlađeni vodom i zrakom. Pištolji za automatizirano zavarivanje mogu raditi sa većim strujama i mogu podnositi veće toplinsko opterećenje. Osim zagrijavanja automati se ne umaraju, pa su pištolji na automatima češće u upotrebi nego obični pištolji. Pištolji za automate dolaze u raznim oblicima, najčešće su duguljasti (Slika 2.12) te se pričvršćuju u prihvata za pištolj na automatu, a mogu biti i manji za mjesta gdje treba iskoristiti što više prostora (Slika 2.13). [11]



*Slika 2.12 TIG pištolj (MILLER) za automate s kablovima za izvor struje i hlađenje [11]*

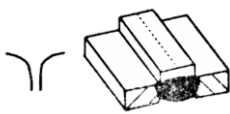






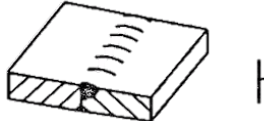
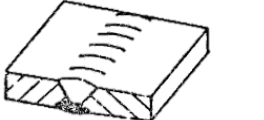


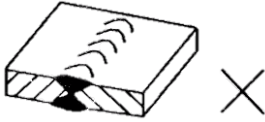
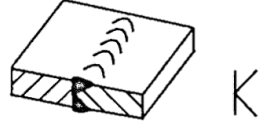
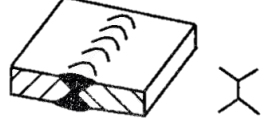
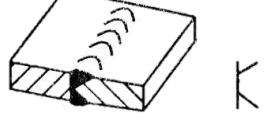




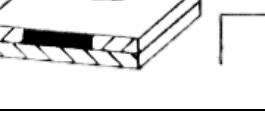
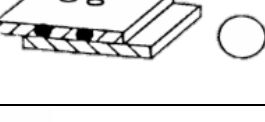
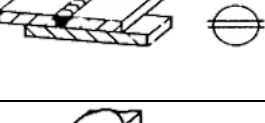

*Slika 2.13 TIG pištolj za automat (CK Worldwide) [14]*


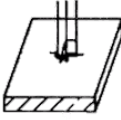
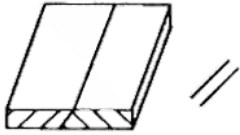
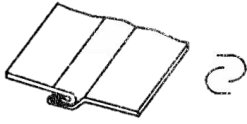


## 2.2.2. Vrste zavarenog spoja

Zavareni se spojevi prema položaju zavarenih dijelova dijele na sučeljene, kutne i preklopne spojeve. Rubni dijelovi koji se zavaruju se pripremaju za neki oblik žlijeba prije zavarivanja. Pripremaju se strojnom obradom, toplinskim rezanjem ili posebnim strojevima za ukošavanje rubova. Neki od oblika sojeva su: I-spoj, V-spoj, X-spoj, U-spoj itd. Sve vrste spojeva nalaze se u tablici 2.2. [1]

Naziv spoja	Prikaz i oznaka	Primjena
Rubni spoj		Za vrlo tanke limove. Rub se pretaljuje, obično bez dodatnog materijala.
Sučeljeni I-spoj		Za tanke stijenke (2-5 mm). Kod EPP zavarivanja 4-12 mm. Zavaruje se s jedne ili s obje strane.
Sučeljeni V-spoj		Za debljine stijenke 4-18 mm. Zavaruje se samo sa jedne strane s provarom.
Sučeljeni polu V-spoj		Kao kod V-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće ili ne treba uskošenje, ili za zidni položaj.
Sučeljeni Y-spoj		Kao kod V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni polu Y-spoj		Kao kod polu V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni U-spoj		Za vrlo debele materijale, deblje 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 zavaren 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 iskoristiti 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 je 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. Stranice žlijeba strme.
Kutni spoj obostrano zavaren		Za debele materijale, gdje se zavarivanje zahtjeva s obje strane.
Kutni spoj jednostrano zavaren		Za materijale manjih debljina i zavarivanje samo s 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 provodi elektrootporno ili protaljivanjem.
Rubni spoj		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi sa ili bez dodatnog materijala.

Navar		Navarena površina. Obično radi poboljšanja svojstva površine osnovnog materijala. „Platiranje“ navarivanjem.
Igličasti spoj		Spajanje dvaju materijala nalijeganjem jednoga na drugi. Lemljenjem, lijepljenjem ili tzv. igličanjem („štiftanje“).
Sučeljeni kutni spoj		Za materijale tanjih i srednjih debljina. Spajanje se izvodi lemljenjem.
Sidreni spoj		Za vrlo tanke materijale. Spajanje se izvodi lemljenjem.

Tablica 2.2 Označavanje i primjena zavarenih i i zalemljenih spojeva [1]

### 2.2.3. Izvori energije za zavarivanje

Zahtjevi koje izvor energije za zavarivanje mora zadovoljavati su:

1. lokalno djelovanje na određenu površinu/volumen komada
2. snaga izvora mora biti dovoljna za lokalno zagrijavanje do potrebne temperature i više zbog nadoknade toplinskih gubitaka
3. gustoća snage na površini zavarivanog komada mora prijeći određenu vrijednost

S obzirom na gustoću snage izvori se dijele na: izvore visoke gustoće ( $q_2 > 10^2 - 10^4 \text{ W/mm}^2$ ), izvore uobičajene gustoće ( $q_q = 10^{-1} - 10^2 \text{ W/mm}^2$ ), izvore niske gustoće ( $q_q < 10^{-1} \text{ W/mm}^2$ ). S obzirom na fizikalno obilježje izvora energije postoje sljedeće vrste koncentriranih izvora energije: mlaz vrućih plinova (izmjena energije konvekcijom), električni luk (energija se prenosi udarom elektrona, konvekcijom, radijacijom topline), tijek nabijenih čestica ubrzanih električnom polju, tijekom zračenja, električna struja.

Formule za izračun karakteristika izvora električne energije:

1. Toplinska moć (ukupna razvijena snaga električnog luka):

$$P = U \cdot I$$

U – napon električnog luka

I – jakost struje

2. Efektivno prenesena snaga na radni komad:

$$P_{ef} = \eta \cdot P$$

$\eta$  – stupanj korisnog djelovanja

$$P_{ef} = \eta \cdot K \cdot P \text{ – kod izmjenične struje}$$

K – koeficijent koji uzima u obzir vrstu struje

### 3. Specifična gustoća snage

$$q_2 = \frac{P_{ef}}{A}$$

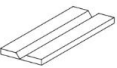



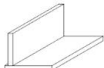


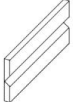


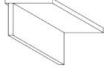

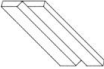



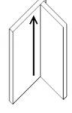


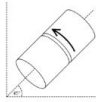

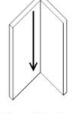



$P_{ef}$  – efektivna snaga izvora

A – zagrijana površina na zavarivanom komadu.

Stupanj korisnog djelovanja ( $\eta$ ) izvora energije predstavlja odnos između snage koja se prenosi u metal i snage razvijene na izvoru energije. Kod TIG zavarivanja čeličnih limova  $\eta$  iznosi od 0,45 do 0,75, a koeficijent koncentriranosti k od  $3 \cdot 10^2$  do  $14 \cdot 10^2 \text{ mm}^{-2}$ . [1]

#### 2.2.4. Pozicije TIG zavarivanja

Pozicije TIG zavarivanja kodirane su normom HRN EN ISO 6947:2019. Osim te norme često korišteni kodovi su i prema ASME, Američko Društvo Inženjera Strojaraštva (eng. *American Society of Mechanical Engineers*), čije kodove koristi AWS, Američko Društvo za Zavarivanje (eng. *American Welding Society*). Prema HRN EN ISO 6947:2019 norma u pravilu ima oblik dva slova, npr. PA, a prema ASME, broj, a zatim jedno ili dva slova, npr. 4G.

EN ISO	Ploča/lim		EN ISO	Cijev 0° ili 90° zakrenuta		Cijev 45° zakrenuta
	Sučeljeno	Kutno		Sučeljeno	Kutno	
PA Ravno	 1G	 1F	PA	 1G Rotirajuće		 1FR Rotirajuće
PB Horizontalno Vertikalno		 2F	PB		 2F  2FR Rotirajuće	
PC Horizontalno	 2G	 2F	PC	 2G		
PD Horizontalno Nadglavno		 4F	PD		 4F	
PE Nadglavno	 4G	 4F	PE	 4G Rotirajuće		
PF Vertikalno gore	 3G Gore	 3F Gore	PH	 5G Gore	 5F Gore	 6G Gore HL-045
PG Vertikalno dolje	 3G Dolje	 3F Dolje	PJ	 5G Dolje	 5F Dolje	 6G Dolje JL-045
			PK	Kružno		

Slika 2.14 Pozicije zavarivanja prema HRN EN ISO 6947:2019 i ASME

## 2.2.5. Greške pri zavarivanju

Greškama se smatraju one indikacije koje prelaze kriterije za prihvatljivost neke greške. Ti kriteriji propisani su normama koje zahtjeva kupac ili ih nudi proizvođač. Mogućnost pojave greške se treba smanjiti na najmanje moguće, jer ukoliko dođe do greške na nekom dijelu, postoji mogućnost da će cijela konstrukcija biti neupotrebljiva. Greške se mogu podijeliti po vremenu nastanka na greške nastale pri izradi i greške nastale pri eksploataciji. Pogreške u zavarenim spojevima obuhvaćene su određenim normama. Neke norme su: HRN EN ISO 5817:2014 koja obuhvaća razinu kvalitete s obzirom na nepravilnosti u zavarenom spoju, HRN EN ISO 6520-1:2008 koja obuhvaća razredbu geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima, pri zavarivanju taljenjem, i norma HRN EN ISO 6520-2:2008 koja obuhvaća razredbu geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima, pri zavarivanju pritiskom.

U normi HRN EN ISO 6520-2:2008 pogreške su podjelene u skupine:

100 – pukotine

- 101 – uzdužne
- 102 – poprečne
- 103 – pukotine zvjezdastog oblika
- 104 – kraterske pukotine

200 – šupljine i poroznosti

- 201 – plinski uključci
- 202 – šupljine
- 203 – mikrošupljine

300 – čvrsti uključci

400 – naljepljivanje i nedovoljni provar

500 – pogreške oblika zavara

- 501 – zajedi uz zavar
- 504 – preveliko nadvišenje korijena zavara
- 507 – linearna smaknutost
- 509 – utonuće zavara
- 510 – progaranje (ČESTA POGREŠKA KOD ZAVARIVANJA TANKIH LIMOVA)

600 – ostale pogreške [15]

### 2.3. Specifičnosti TIG zavarivanja nehrđajućih čelika

Glavna razlika između nehrđajućih čelika i nekih drugih vrsta čelika je u tome što ne korodiraju. Stoga je glavna zadaća pri zavarivanju nehrđajućih čelika zadržati njihovo svojstvo antikoroziivnosti. Pogrešnim zavarivanjem može doći do utjecaja zavara na OM i na mjestu zavara materijal počinje korodirati. Kod zavarivanja nehrđajućeg čelika potrebno je obratiti pozornost na sve parametre koji mogu dovesti do smanjenja antikoroziivnosti. Materijal se prije zavarivanja mora detaljno očistiti i odmastiti kako nešto nepoželjno ne bi ušlo u zavar. Isto tako je potrebno imati podlogu od nehrđajućeg materijala, npr. aluminiija. Nehrđajući čelik je najčešće vrlo dobar toplinski vodič, zato se puno brže zagrije. Iz tog razloga se on zavaruje manjim strujama od običnog čelika (oko 2/3 A kao za običan čelik iste debljine).

Sve legure nehrđajućeg čelika koje su zavarljive se mogu zavarivati TIG postupkom. Pretežito se koriste W-elektrode legirane torijem (Th; označene crvenom bojom), cerijem (Ce; označene narančastom bojom) i lantanom (La; označene zlatnom bojom). Te elektrode se koriste jer omogućavaju stabilniji luk i podnose jake struje. [16]

Pri TIG zavarivanju nehrđajućeg čelika najvažniji parametri su: brzina zavarivanja, jakost struje te protok zaštitnog plina. Sva tri parametra trebaju biti optimalno namještena kako bi se zavar najbolje izradio. Pri velikoj jakosti struje OM i DM se brže tale, no bržim taljenjem materijala potrebno je povećati brzinu pomicanja pištolja čime se smanjuje količina zaštitnog plina. Pri maloj jakosti struje potrebno je više vremena kako bi se rastalio OM i DM. Manja brzina zavarivanja, uz istu jakost struje daje veći unos topline, što je vidljivo u formuli za ukupni unos energije. Time se unosi previše topline i materijal se previše tali te se unosi previše zaštitnog plina što znači i veće troškove. [17], [18]

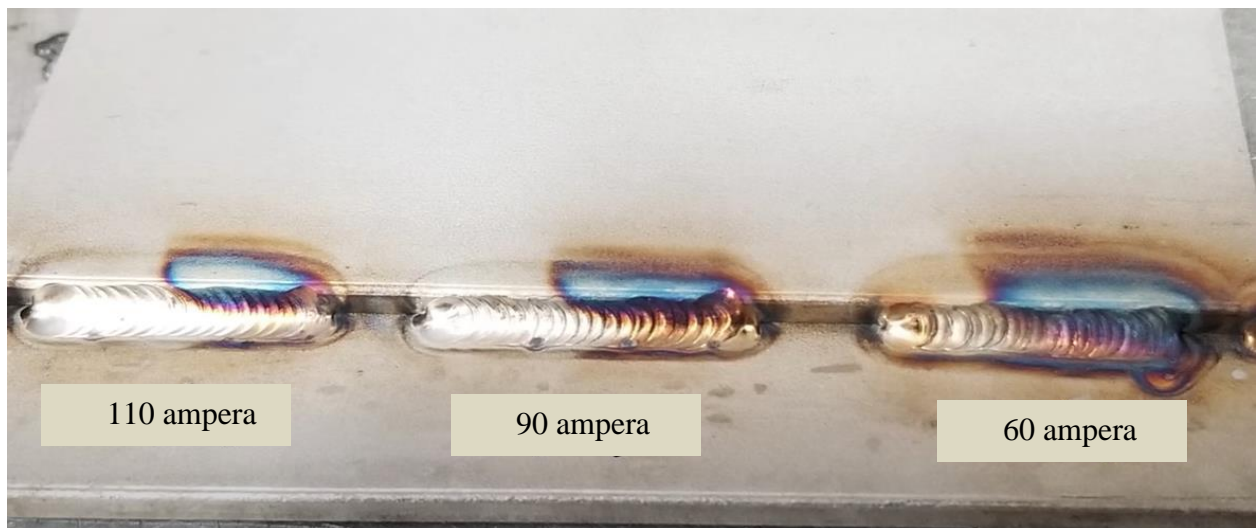
Formula za ukupni unos topline:

$$E = \frac{P}{v} = \frac{U \cdot I}{v}$$

P-snaga izvora (W)

v-brzina kretanja

Jakost struje zavarivanja bira se prema vrsti i debljini materijala. Primjer kod zavarivanja nehrđajućeg čelika: sučeoni spoj, vodoravni položaj, jakost struje (približno 30 A po mm debljine lima). [19]



Slika 2.15 Utjecaj jakosti struje na oblik zavora [18]

Najčešći problemi do kojih dolazi prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika TIG postupkom su oni povezani s pogrešnim izborom struja zavarivanja i brzine zavarivanja (neiskustvo zavarivača). Greške su: preveliki unos topline (gubitak OM), krater na kraju zavora (izbjegava se postupnim smanjenjem struje), korozija oko zavora (kako bi se spriječilo potrebno je očistiti materijal prije zavarivanja te brusiti i polirati zavar nakon zavarivanja kako se ne bi skupljale nečistoće). Kako bi se te greške izbjegle potrebno se koristiti uputama proizvođača za pravilni izbor struja zavarivanja te probnim zavarima. [16]

	Manje od 0.1	T	T	T	T	T
Debljina lima (in.)	1/16	3/32	1/8	3/16	1/4	1/2
mm.	1.6	2.4	3.2	4.8	6.4	12.7
Struja DC (-)	80 - 100	100 - 120	120 - 140	200 - 250	200 - 350	225 - 375
Promjer elektrode (in.)	1/16	1/16	1/16	3/32	1/8	1/8
mm.	1.6	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2
Protok plina, (cfh)	10	10	10	15	20	25
Argon L/min...	4.7	4.7	4.7	7.1	9.4	11.8
Promjer žice, DM (in.)	1/16	1/16	3/32	1/8	1/8	1/8
mm.	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2	3.2
Brzina luka (ipm)	12	12	12	10	8	8
mm/sec	5.1	5.1	5.1	4.2	3.4	3.4
Ukupno (hr/ft of weld)	0.0167	0.0167	0.0167	0.0200	0.0250	0.0250
vrijeme hr/m. of weld	0.0548	0.0548	0.0548	0.0656	0.0820	0.0820

Tablica 2.3 Parametri za zavarivanje sučeonog spoja [16]



Debljina lima	T (in.) mm.	1/16 1.6	3/32 2.4	1/8 3.2	3/16 4.8	1/4 6.4	1/2 12.7
Struja, DC (-)		90 - 110	110 - 130	130 - 150	225 - 275	225 - 350	225 - 375
Promjer elektrode	(in.) mm.	1/16 1.6	1/16 1.6	1/16 1.6	3/32 2.4	1/8 3.2	1/8 3.2
Protok plina, Argon	(cfh) L/min..	10 4.7	10 4.7	10 4.7	15 7.1	20 9.4	25 11.8
Promjer žice	(in.) mm.	1/16 1.6	1/16 1.6	3/32 2.4	1/8 3.2	1/8 3.2	1/8 3.2
Brzina luka	(ipm) mm/sec	10 4.2	10 4.2	10 4.2	8 3.4	8 3.4	8 3.4
Ukupno vrijeme	(hr/ft of weld) hr/m. of weld	0.0200 0.0656	0.0200 0.0656	0.0200 0.0656	0.0250 0.0820	0.0250 0.0820	0.0250 0.0820

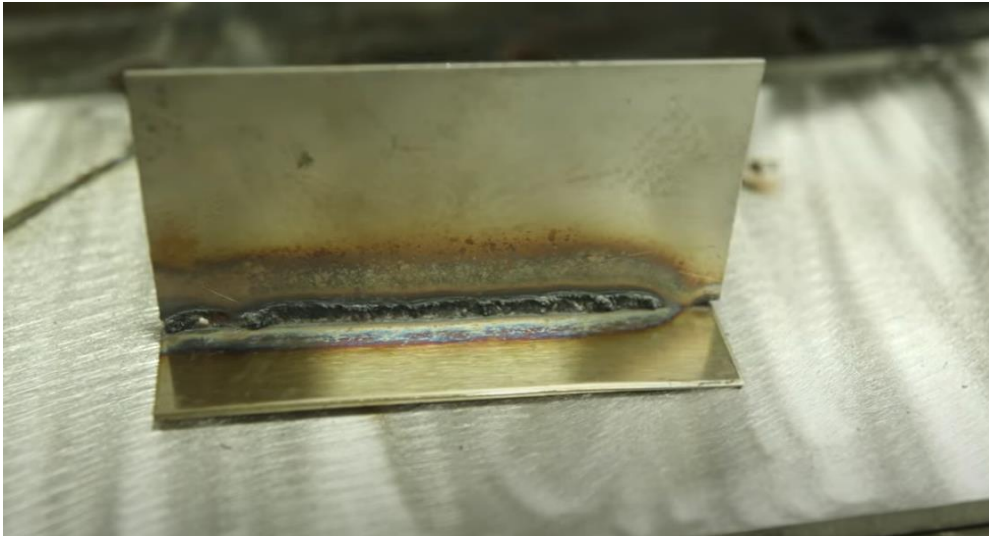
Za vertikalno prema gore i nadglavno, smanjenje struje 10 do 20%

Tablica 2.4 Parametri za zavarivanje kutnih spojeva [16]

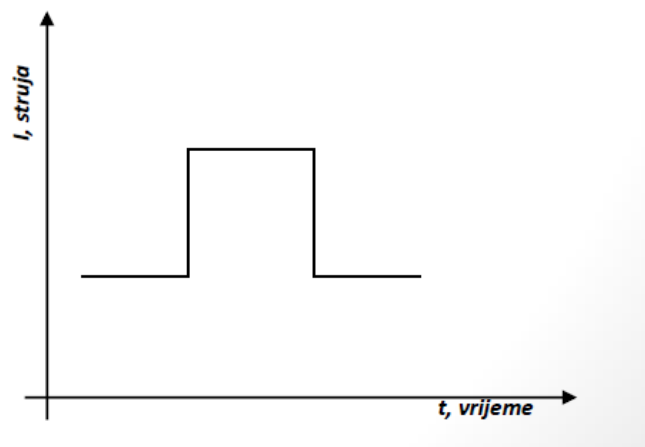
Specifična svojstva za zavarivanje nehrđajućeg čelika:

- Niski električni luk – ukoliko je luk visok, šira je i površina zavarivanja, a time je i širi ZUT, što je kod zavarivanja nepoželjno. Širina taline bi trebala biti otprilike jednaka debljini materijala, a ako je prevelika potrebno je smanjiti unos topline
- Veća brzina pomicanja – pri sporijim brzinama kretanja više se vremena luk zadržava na nekom djelu zavara čime se unosi previše topline, a time se materijal previše zagrijava te može doći do izlučivanja Cr i Ni na površinu i time se smanjuje antikoroziivnost. Također, može doći do prekomjernog taljenja i gubitka OM-a (Slika 2.16) ili unošenja previše DM-a, pa dolazi do nadvišenja zavara
- Koristiti ispravnu sapnicu – za zavarivanje nehrđajućeg čelika se obično koriste veće sapnice kako bi pokrivenost zaštitnim plinom bila veća i zavar zaštićeniji. Korištenjem veće sapnice treba isto tako prilagoditi i protok plina
- Koristiti manje DM – zbog manjeg zagrijavanja od običnih čelika potrebno je koristiti manji DM, manji promjer žice
- OM i DM što sličniji – OM i DM moraju biti što sličniji prema kemijskim sastavima, da ne dolazi do nepoželjnih spojeva, te prema mehaničkim svojstvima
- Koristiti impulsnu struju – impulsna struja radi na način da povećava i smanjuje jakost struje. Tako je u najnižem stanju struja jaka tek toliko da se električni luk ne ugasi, a u najvišem dovoljna da tali i prodire OM. Time se dobiva mogućnost korištenja jačih

struja jer unos topline nije konstantan (materijal se hladi kad je struja najslabija) (Slika 2.17).



Slika 2.16 Utjecaj unosa prevelike topline u zavar [20]



Slika 2.17 Impulsna struja [21]

### 2.3.1. Zaštitni plinovi i sapnice

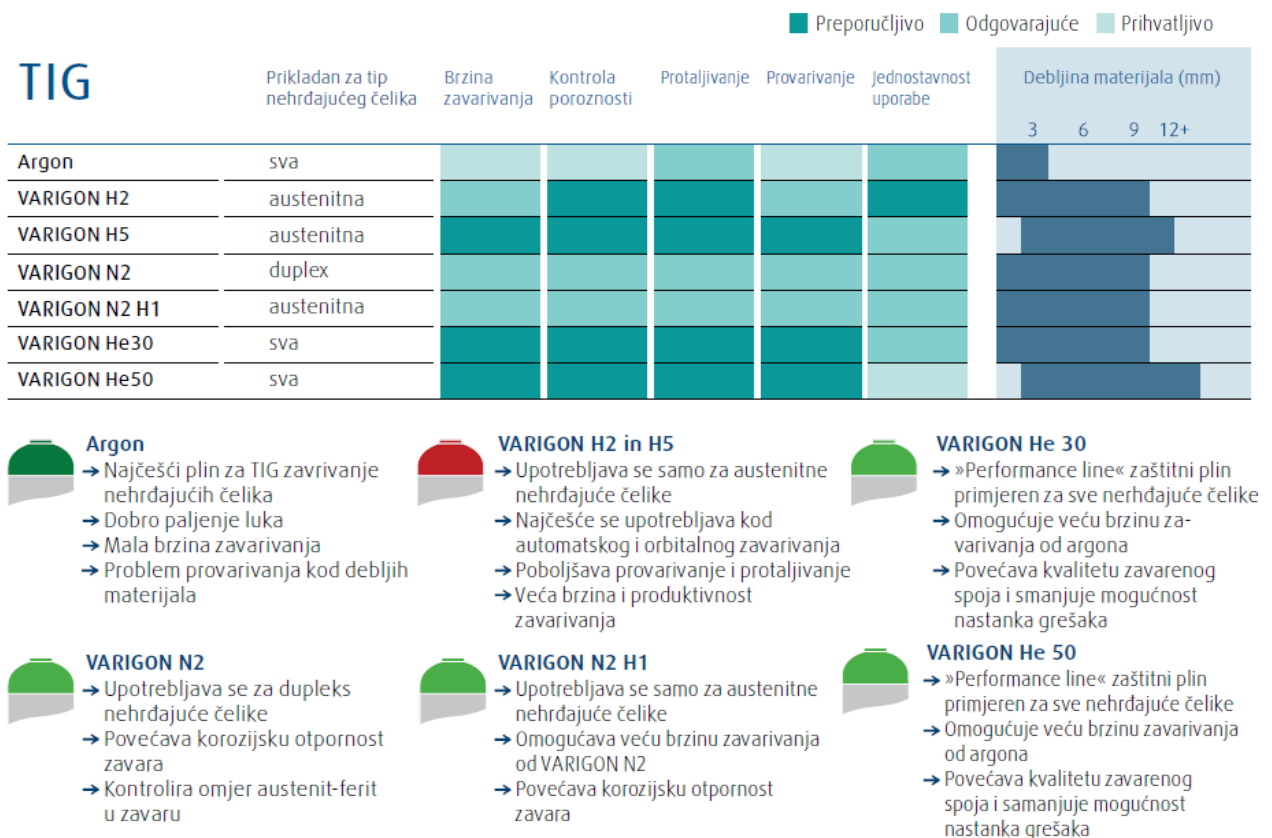
Kao zaštitni plin kod zavarivanja nehrđajućeg čelika se najčešće koristi argon jer podnosi male protoke, omogućava stabilniji luk i napon može biti niži od npr. helija, a samim time moguće je zavarivanje tanjih limova bez progaranja kroz materijal. [16]

Kako bi zavar bio što kvalitetniji potrebno je odabrati najbolji zaštitni plin s obzirom na OM i vrstu zavarivanja. U tablici 2.5 su prikazani zaštitni plinovi za TIG zavarivanje s obzirom na OM iz kataloga proizvođača Linde.

Vrsta postupka	Materijali	Competence line	Performance line
TIG Tungsten inert gas	Svi taljivo-zavarljivi metali, svi legirani i nelegirani čelici, ne-željezni metali	Argon	VARIGON® He 15 VARIGON® He 30 VARIGON® He 50 VARIGON® He 70 VARIGON® He 90 Helij
	Aluminij i njegove legure	Argon VARIGON® S MISON® Ar	VARIGON® He serija VARIGON® He S serija MISON® He serija
	Austenitni nehrđajući čelici, slitine nikla	Argon	VARIGON® H2 VARIGON® H6 VARIGON® He 15
	Duplex i super-duplex čelici	Argon VARIGON® N serija	VARIGON® N2 He 20
	Potpuno austenitni čelici	Argon VARIGON® N serija	VARIGON® N2 H1

Tablica 2.5 Preporuke za plinove iz kataloga Linde [22]

Na slici 2.18 su prikazani tipovi zaštitnog plina iz kataloga proizvođača Linde koji se preporučaju za zavarivanje pojedinih nehrđajućih čelika s obzirom na mikrostrukturu i debljinu materijala. Također su dana i svojstva pojedinih plinova. [22]



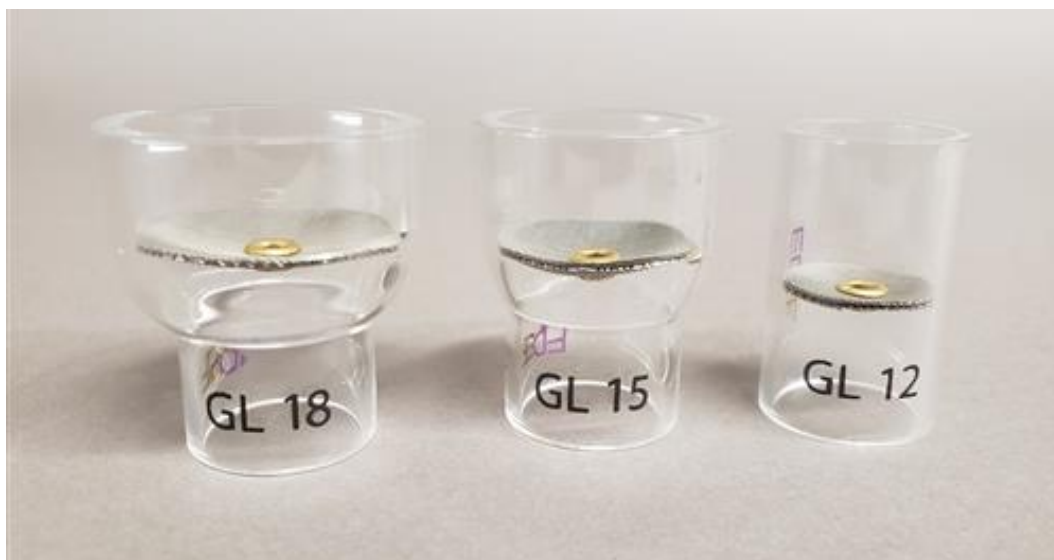
Slika 2.18 Preporuke za plinove s obzirom na mikrostrukturu nehrđajućeg čelika [22]

Da bi se zaštitni plin ravnomjerno rasporedio, i da bi što bolje zaštitio zavar potrebna je dobra sapnica. Sapnice su najčešće keramičke, no mogu biti i staklene čime se povećava vidljivost prilikom zavarivanja. Specifičnost TIG zavarivanja je mala brzina kretanja, a često se koristi za tanke materijale. Uz to se često koristi za nehrđajuće materijale, nehrđajući čelik i aluminij, pri čemu je potrebno osigurati dobru zaštitu kako se ne bi pokvarila njihova svojstva. Sapnice dolaze u različitim veličinama. Veće sapnice omogućavaju širu zaštitu plina, no smanjuju količinu plina po jediničnoj površini i smanjuju vidljivost luka. Na slici 2.19 su prikazane sapnice različitih veličina. Keramičke sapnice su izrađene najviše od aluminijevog oksida ( $Al_2O_3$ ), no prepoznatljivu rozu boju im daje kromov(III) oksid.



Slika 2.19 Sapnice za TIG zavarivanje [23]

Na slici 2.20 su prikazane staklene sapnice.

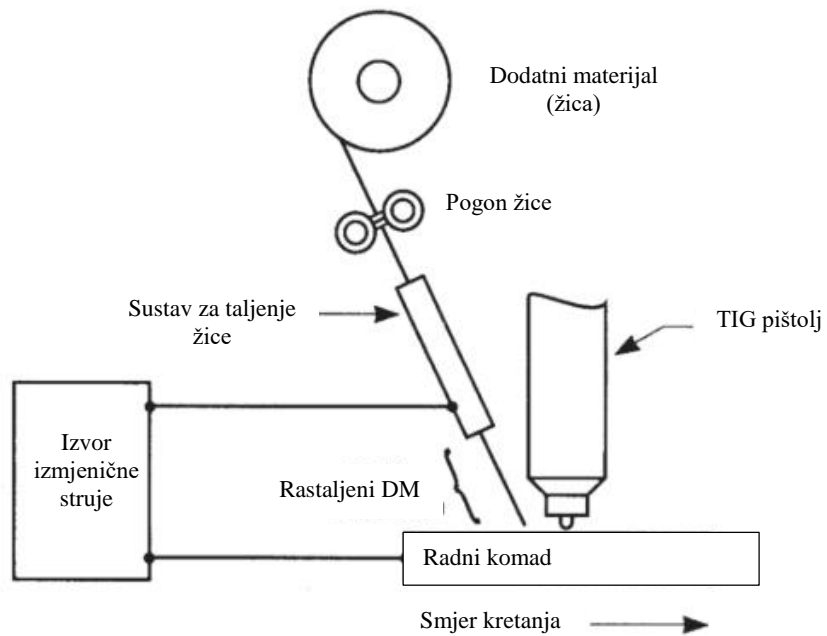


Slika 2.20 Staklene sapnice [24]

### 2.3.2. Metoda „vruće žice“

Metoda „vruće žice“ (eng. „*hot wire*“ metode) omogućava povećan unos DM i veće brzine zavarivanja. Žica se prije ulaska u talinu elektrootporno zagrijava koristeći energiju odvojenog AC uređaja. Žica se dovodi kroz cjevčicu, te u produžetku izlazi prethodno zagrijana iznad točke taljenja i takva ulazi u talinu. Time se više ne zahtijeva njeno taljenje toplinom unešenom zavarivanjem, već se ta toplina koristi samo za taljenje OM-a. Debljina žice kod ove metode je najčešće 1,14 mm (0,045 in). Ova metoda se često koristi kod automatiziranog zavarivanja s njihanjem jer omogućava brzi dovod žice. [16]

Metoda vruće žice često se koristi kod proizvodnje ventila te komponenti naftne industrije. Zbog predgrijavanja žice moguće je dobiti preciznu mikrostrukturu zavara. Materijali za koje se preporuča koristiti metoda vruće žice su krom-nikal nehrđajući čelici, te duplex čelici jer se njima zavarivanjem lako promjeni mikrostruktura i smanji otpornost na koroziju. Kod zavarivanja nekih materijala, primjerice nehrđajućeg čelika serije 300, kao zaštitni plin se koristi argon s malo vodika kako bi se povećala penetracija, te smanjila mogućnost formiranja oksida. [25]



Slika 2.21 Shema metode vruće žice za TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika [16]



Tablica 2.6 TIG pištolj sa ugrađenim sustavom dobave žice [26]

Osim „hot wire“ postupka postoji „cold wire postupak, koji se također koristi kod automatiziranog zavarivanja, no pri tom postupku se žica ne zagrijava prije ulaska u talinu.

## 2.4. Robotizacija i Automatizacija TIG zavarivanja

### 2.4.1. Automatizacija

Automatizacija je postupak kojim se zamjenjuje čovjekov umni rad radom informatičkog uređaja zvanog automat. Automat je uređaj koji samostalno upravlja nekim procesom prema čovjekovoj zamisli. On nadzire i ispravlja proces služeći se pravilima automatske regulacije. Automatska regulacija je prirodni zakon prisutan svuda u prirodi gdje treba održavati stanje reda i suprotstavljati se težnji svih sustava da zbog poremećaj, istrošenosti ili starosti pogoršavaju svoja svojstva. Automatizacija se dijeli u tri skupine: upravljanje, regulacija i vođenje procesa.

- upravljanje – proces u kojem jedna ili više ulaznih veličina utječu na izlaznu veličinu sustava prema zakonima koji su svojstveni tome sustavu. Sustav upravljanja je osjetljiv na poremećaje, no ne može doći u nestabilno stanje. Dobro poznavanje dinamike sustava omogućuje točno odražavanje veza između ulaznih i izlaznih veličina.
- regulacija – proces kojemu izlazna veličina djeluje povratno na ulaznu veličinu odražavajući zadano ili željeno stanje sustava. Sustav može postati nestabilan zbog povratne veze, ali se postiže visoka točnost izlazne veličine i neovisnost stanja nekog procesa o poremećajima.
- vođenje – uključuje karakteristike upravljanja i regulacije. Algoritmi i modeli vođenja vrlo su složeni stoga su prije pojave procesnih računala postojali samo kao ideja uz veoma ograničenu mogućnost praktične izvedbe. Vođenje omogućuje realizaciju multivarijabilnih procesa sa složenim zahtjevima. Matematički model omogućuje unaprijedno djelovanje, a regulator omogućuje povratno djelovanje. [2]

## 2.4.2. Automatizacija TIG zavarivanja

U današnje vrijeme, vrijeme digitalizacije i industrije 4.0, glavni prioritet u proizvodnim firmama je optimizacija proizvodnje. Od proizvođača se očekuje sve veća kvaliteta proizvoda sa stalnim ili smanjenim troškovima i vremenom izrade. Automatizirano i robotizirano zavarivanje pomaže u tome, jer omogućava bolju kvalitetu izrade te smanjuje vrijeme izrade. Automatizacija se pojavila gotovo u svim granama proizvodnje no najviše pridonosi velikoserijskoj proizvodnji. Kako bi se odabrao ispravan automat ili robot za zavarivanje potrebna je suradnja između proizvođača automata i kupca. Proizvođač mora imati uvid u što će robot ili automat raditi, te prema tome odrediti koji će proizvod najbolje tu zadaću odraditi. Automatizirano zavarivanje treba biti optimizirano kako bi se vrijeme zavarivanja te poslovi oko pripreme smanjili na najmanje, a time se smanjuju i troškovi izrade. Pri tome treba paziti da kvaliteta ostane na visokoj razini, te težiti prema najboljem zavaru. [27]

Automatizirani zavarivački sustavi koriste tehnološki napredne komponente koje rade u savršenom skladu jedna s drugom te tako smanjuju cijenu gotovo savršenih zavara. Ukoliko se koriste komponente poput rotacijskih stolova ili pozicionera, to se naziva „tvrda automatizacija“ (eng. *hard automation*). U takvom slučaju gleda se na svaki detalj, poput sustava dobave dodatnog materijala, te paljenje električnog luka. Preciznim odvijanjem svih radnji u takvom sustavu omogućava stalnu kvalitetu zavara. Glavne komponente koje se pojavljuju u automatiziranim sustavima za zavarivanje su: programi za upravljanje, izvor energije za zavarivanje, laserski sustavi za praćenje zavara, kamere za praćenje električnog luka, te sustav dobave dodatnog materijala i obratka.

Vrste automata za zavarivanje:

- pravocrtni automati za zavarivanje
- sustavi s kružnim gibanjem obratka oko nepomičnih pištolja
- sustavi s kružnim gibanjem oko obratka
- prilagođeni sustavi za zavarivanje [27]

## 2.4.3. Automati za pravocrtno zavarivanje

Pri pravocrtnom (linijskom) zavarivanju automat se kreće u jednom smjeru i zavaruje. Pri tome je moguće da se pištolj za zavarivanje njiše. Izvor struje za zavarivanje može biti uključivanjem u struju ili na bateriju. Automati se mogu kretati samostalno (kotači) ili po vodilicama.



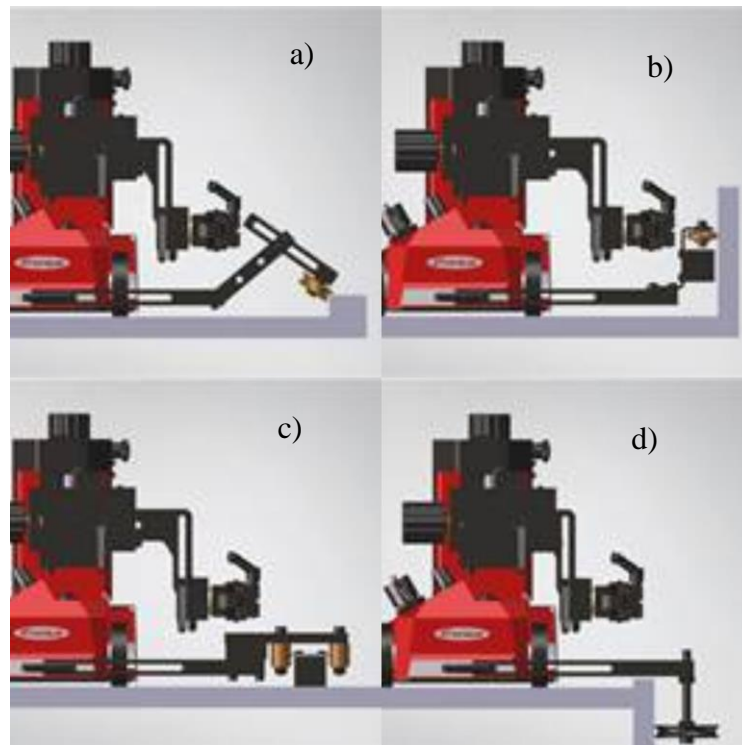
## ARCROVER 15

Arcrover 15 je automat za pravocrtno zavarivanje proizvođača Fronius. Automat je relativno malih dimenzija i kreće se pomoću 4 magnetna kotača. Osim horizontalno, može se koristiti i vertikalno. Kao izvor struje za pogon koristi Li-Ion bateriju (25.4 V/3.35 Ah), a može se spojiti i na gradsku mrežu. Koristi različite sustave za navođenje (slika 2.23): fleksibilna ruka za navođenje po zidu (sl.2.24a,b), ili rubu stola/predmeta (sl.2.24c), te ruka za navođenje po vodilici (sl.2.24d). Za zavarivanje koristi pištolj koji se stavlja u univerzalni držač za pištolj. Ima i ugrađen sustav za automatsko zaustavljanje kad udari u zid. Maksimalna brzina kretanja mu je 250 cm/min, te je konstantna u horizontalnom i u vertikalnom položaju. Prednosti takvog automata: male dimenzije, relativno lagan, može se koristiti u raznim situacijama. [28]

Slični automati: Arcrover 22 (Fronius), K-bug 1200/2000/4000 (Bug-O), Gecko/Lizard (Promotech)



Slika 2.22 Arcrover 15 [28]

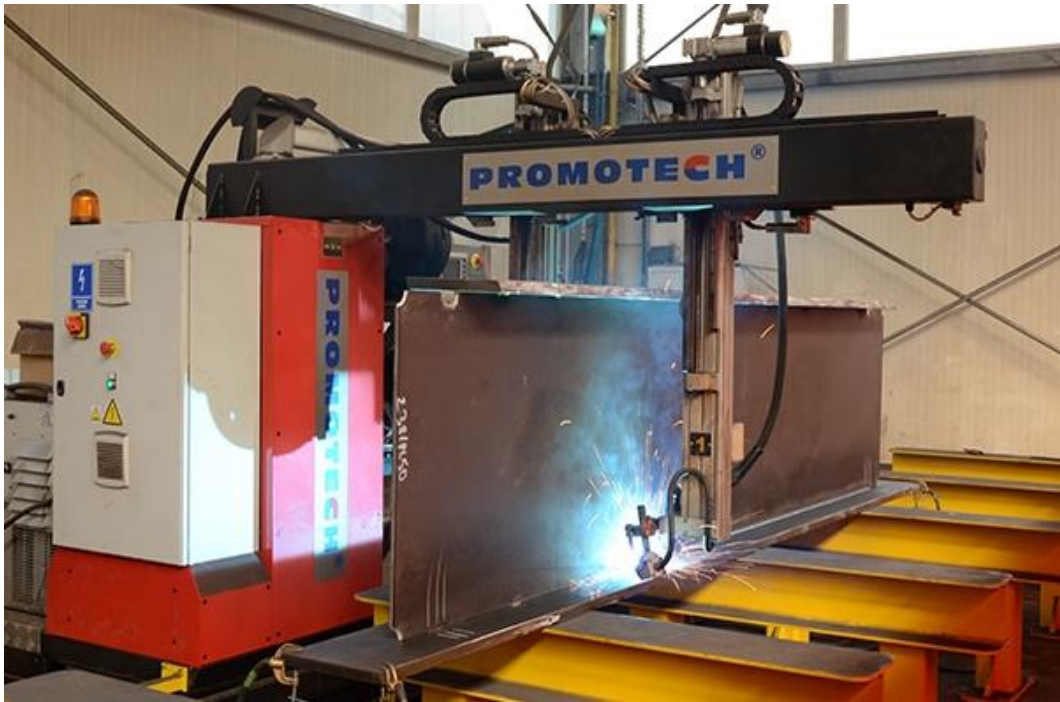


*Slika 2.23 Sustav navođenja za Arcrover 15 [28]*

### **Gantry Welding System type WA 1000 / WA 1500**

Gantry Welding System je automat za zavarivanje komada većih dimenzija firme Promotech. Mogu se zavarivati komadi do 19 m duljine te do 1.5 m visine. Maksimalna brzina zavarivanja je 1 m/min. Automat ima mogućnost zavarivanja s dvije strane istovremeno. Ima dvije vertikalne ruke na kojima su pištolji za zavarivanje, a koje se nalaze na glavnoj horizontalnoj gredi. Pomiče se po vodilici koja je učvršćena na podu. Prednosti takvog automata: obavljanje zavarivanja s dvije strane, zavarivanje komada velikih dimenzija, velika preciznost. [29]

Slični automati: C&B (Promotech)



*Slika 2.24 Gantry Welding System [29]*

#### **GO-FER® IV**

GO-FER® IV je automat firme Bug-O za zavarivanje i rezanje koji se kreće po vodilici. Vodilice po kojima se kreće mogu se stavljati na razna mjesta. Prihvat vodilice može biti na magnet ili vakuum. Brzina kretanja je od 63.5 do 2540 mm/min. Ima mogućnost vođenja jednog ili dva pištolja za zavarivanje. Tijekom zavarivanja operater ima mogućnost podešavanja brzine i smjera kretanja na odvojenom kontrolnom uređaju. Ima mogućnost zavarivanja u svim položajima. Prednosti ovog automata: visoka preciznost, mogućnost postavljanja na razna mjesta, mogućnost promjene brzine u radu. Neki slični uređaje imaju i mogućnost njihanja pištolja tijekom zavarivanja. [30]

Slični automati: ZIPPER WELDER (Bug-O) – vertikalno, Rail Bull (2) (Promotech), Flextrack 45 PRO (Fronius)



*Slika 2.25 GO-FER® IV [30]*

#### **2.4.4. Automati s kružnim gibanjem**

U sustavima s kružnim gibanjem, moguće je kružno gibanje obratka sa statičnim pištoljima za zavarivanje ili kružno gibanje oko obratka. Takva vrsta zavarivanja omogućuje brzo i visoko kvalitetno zavarivanje kružnih zavara. Neki od proizvoda koji se zavaruju takvim automatima su priрубnice (rotacija komada) i cijevi velikog promjera (kružno gibanje automata).

#### **FCH 3-21 / 3-38 / 6-76 / 9-114 GLAVE ZA ZAVARIVANJE**

Seriya FCH glava za zavarivanje proizvođača Fronius služe za kružno zavarivanje spojeva tankostijenih cijevi. Koriste TIG tehniku zavarivanja. Raspon promjera cijevi za koje je omogućeno zavarivanje je od 3 do 114 mm te debljine stjenke do 3.5 mm. Materijali za koje je omogućeno takvo zavarivanje su: aluminij, titanij, nehrđajući čelik, te legure na bazi nikla, ali i ostali materijali koji ne zahtijevaju dodatni materijal. Koriste vodeno hlađenje kako ne bi došlo do pregrijavanja. Omogućuju brzo, jednostavno i precizno zavarivanje spojeva cijevi raznih dimenzija, te su relativno male i jednostavne za transport. [31]



*Slika 2.26 FCH glave za zavarivanje [31]*

## **CW-7**

CW-7 je automat firme Bug-O za kružno zavarivanje. Automat se smješta na stup u središte komada te rotira pištolj oko komada i zavaruje po kružnom putu. Zavaruje u rasponu promjera od 156 do 610 mm. To mu omogućuje pomična ruka na kojoj je pištolj. Brzine zavarivanja su od 0.2 do 2.2 okr/min. Također, ima mogućnost gibanja po vertikalnoj osi. Prednosti su: precizno i brzo zavarivanje kružnih zavara, mogućnost različitih tehnika zavarivanja (MIG/MAG, pod praškom), odrađivanje više zavara zbog mogućnosti vertikalnog gibanja. Koristi se za kružne zavare većih dimenzija, npr. prirubnice. [32]

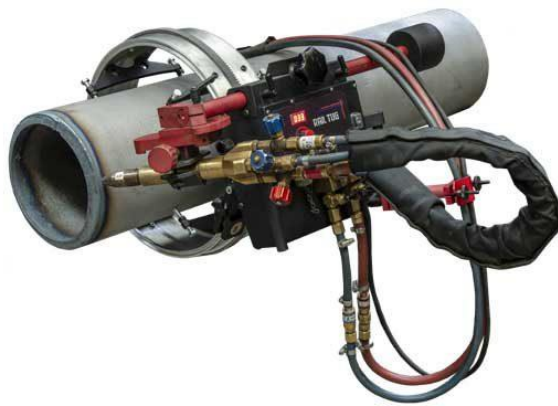


*Slika 2.27 CW-7 [32]*

## RAIL TUG

Rail Tug je automat firme Promotech za kružno i pravocrtno zavarivanje. Može biti postavljen na vodilice oko cijevi ili na ravnu vodilicu. Vodilice se stežu magnetom na magnetične materijale, a na nemagnetične vakuumom. Može zavarivati gotovo sve promjere (minimalno 100 mm), s obzirom da se postavlja na vodilicu oko bilo kojeg promjera. Ima brzo steznu glavu za sve vrste pištolja za zavarivanje. Osim za zavarivanje može služiti i za rezanje. Prednosti su: moguće kružno i pravocrtno zavarivanje, rad u svim pozicijama, veliki izbor vodilica. [33]

Slični automati: FLEXTRACK 45 PRO (Fronius), Rail Bull (Promotech)



*Slika 2.28 Rail Tug [33]*

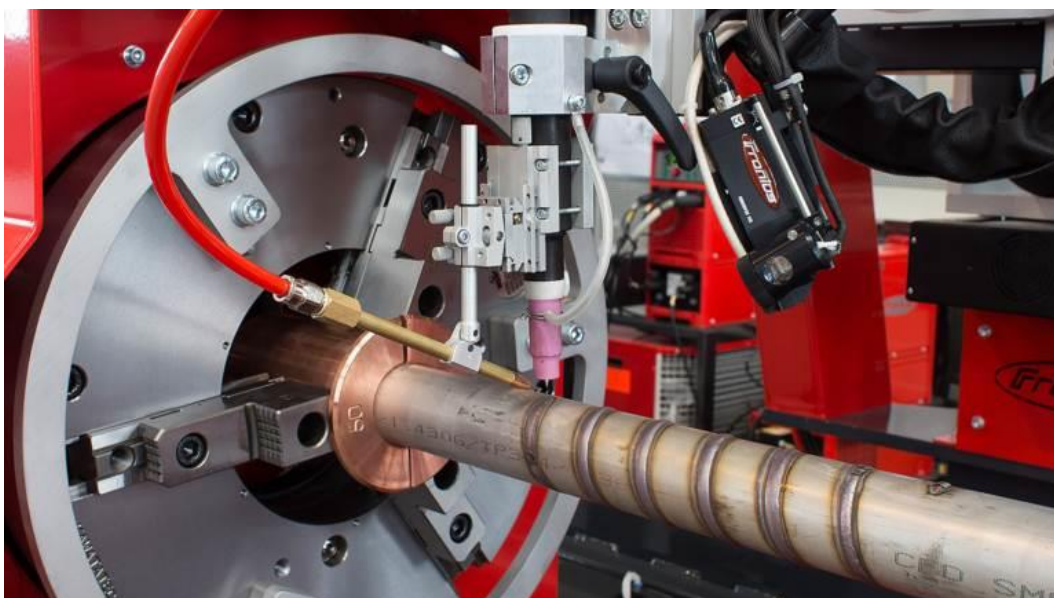
### 2.4.5. Višenamjenski sustavi za zavarivanje

Osim za pravocrtno ili kružno zavarivanje postoje i automati za višenamjensko zavarivanje. Oni mogu izvoditi i pravocrtno i kružno gibanje istovremeno. Takvi sustavi sadrže više komponenti koje omogućuju gibanje po različitim osima. Tako rotacijski stolovi omogućuju rotaciju predmeta, stupovi omogućuju vertikalno kretanje pištolja, a ruka horizontalno. Time se mogu izvoditi spiralni zavari na cijevima. [34]





*Slika 2.29 Višenamjenski sustav za zavarivanje [34]*

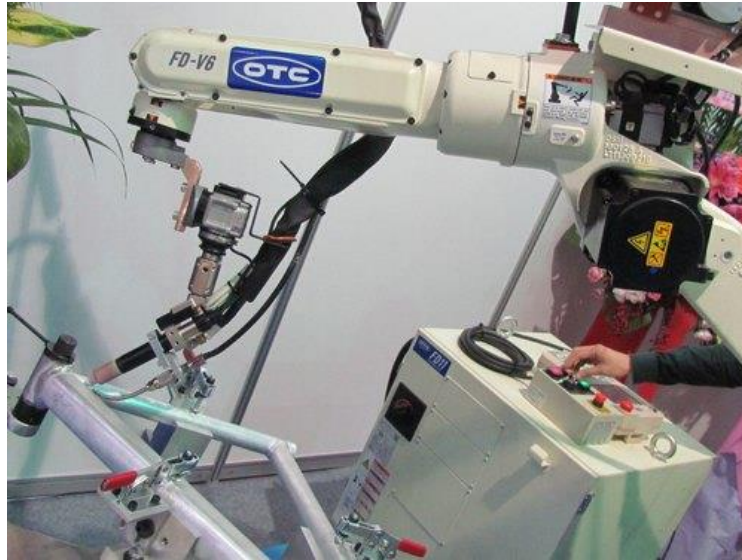


*Slika 2.30 Spiralni zavar [34]*

#### **2.4.6. Robotizacija zavarivanja**

Automati za zavarivanje obično imaju samo jednu zadaću, odnosno zavaruju samo po jednoj osi. Također, za njihov rad potreban je i rad operatera koji ne samo da nadzire, već često i u samom radu mora mijenjati postavke. Kada sustav postane u potpunosti samostalan od početka zavarivanja do kraja, te kada mu je omogućen rad u svim položajima i po više osi, govori se o robotizaciji. Roboti se koriste u velikoserijskim automatiziranim pogonima koji imaju potrebu

povećati svoju brzinu i kvalitetu izrade. Tu se najčešće govori o autoindustriji te avioindustriji. Roboti često imaju omogućen rad u 6 osi, što im omogućuje zavarivanje komada sa gotovo svih strana. Roboti su puno skuplji od automata za zavarivanje i njihovo programiranje nije jednostavno. Stoga često nije isplativo nabavljati robota za neke poslove, a isplativo je nabaviti automat za zavarivanje.

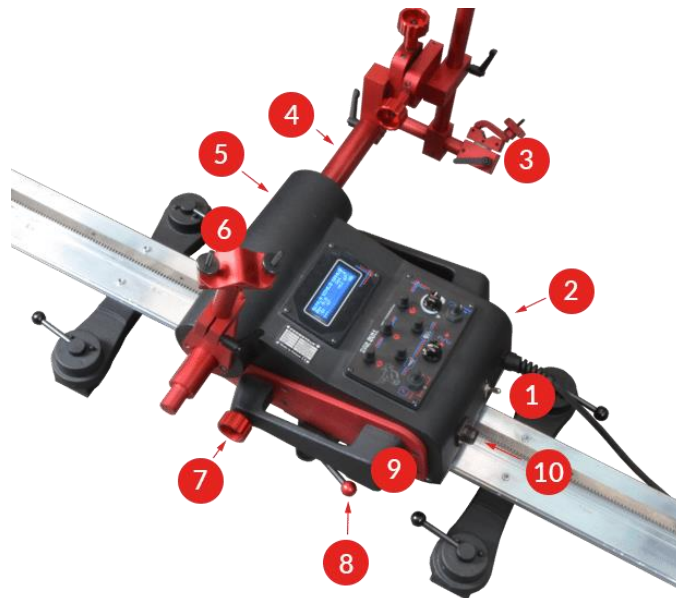


Slika 2.31 Robot za tig zavarivanje [35]

#### 2.4.7. Rail Bull automat za zavarivanje

Rail Bull je automat za pravocrtno zavarivanje i rezanje, firme Promotech. Engleski naziv ovakve vrste automata je *track carriage*. Taj naziv mu je prikladan jer zapravo vodi pištolj za zavarivanje prateći put vodilice. Namijenjen je za zavarivanje i rezanje pločevina i limova, te kružno zavarivanje relativno velikih radijusa (min. 5000 mm). Ima ugrađen sustav za njihanje pištolja za zavarivanje koji omogućuje male pokrete pištolja lijevo-desno tijekom zavarivanja. Na slici 2.32 prikazani su dijelovi Rail Bull automata. [36]





Slika 2.32 Rail Bull automat [36]

Dijelovi Rail Bull automata (Slika 2.32):

1. Prekidač za paljenje
2. Kontrolna ploča
3. Držač pištolja sa stezaljkom
4. Oscilirajuća ruka
5. Ekran
6. Vodič za kabel
7. Pogonska sklopka
8. Poluga za učvršćivanje
9. Ručka za prenošenje
10. Priključak za struju za paljenje luka

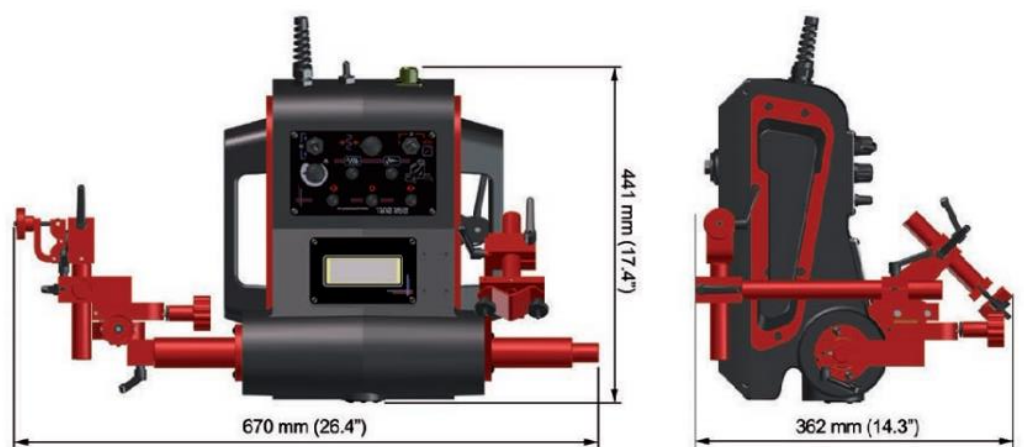
Vodilica za Rail Bull može se, osim na ravnu, postaviti i na zakrivljenu površinu. Postoje razne vodilice, fleksibilne za zakrivljene površine. Postavljaju se na magnetične i ne magnetične površine pomoću magneta ili vakuumskih prihвата. Položaji u kojima može raditi: PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG. Proizvodi za koji je automat pogodan su:

- Prikolice
- Spremnici za kamione
- Naftni spremnici
- Spremnici za vodu
- Posuđe pod pritiskom

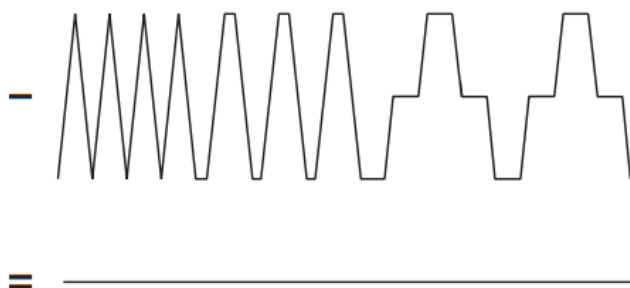
- Nosači mostova
- Stupovi
- Brodovi
- Svugdje gdje se zahtijevaju dugi kontinuirani zavari

Neka svojstva Rail Bulla:

- Lagan i jednostavan za transport, malih dimenzija (Slika 2.33)
- Brzostežući mehanizam za prihvat pištolja promjera od 16 do 22 mm s mogućnošću prilagođenog prijvata za promjere do 35 mm
- Moguće precizno namještanje pištolja odvijačem
- Rad u horizontalnom i vertikalnom položaju
- Automatsko uključivanje i isključivanje električnog luka omogućuje neometan put i zavarivanje
- Operater nije izložen toplini i plinovima
- Oscilator omogućuje različite zavare (Slika 2.34) [36]



Slika 2.33 Dimenzije Rail Bulla [36]



Slika 2.34 Izgled zavora s obzirom na njihanje (I – trapezoidni uzorak; II – bez oscilacija) [36]

Tehničke specifikacije automata dane su u tablici 2.7.

Napon	115-230 V, 50-60 Hz; 42 V, 50-60 Hz
Snaga	100 W
Pozicije zavarivanja (prema HRN EN ISO 6947: 2019 i ASME)	(PA/1F/1G), (PB/2F), (PC/2G), (PD/4F), (PE/4G), (PF/3G), (PG/3G)
Promjer drške pištolja	16-22 mm (do 35 mm)
Minimalni radijus zaobljenog radnog komada	5000 mm
Minimalna debljina radnog komada	5 mm
Vučna sila u horizontalnom	350 N
Vučna sila u vertikalnom	150 N
Mogućnost finog namještanja	0-35 mm, gore-dolje, lijevo-desno
Horizontalna brzina	0-120 cm/min
Vertikalna brzina	0-110 cm/min
Masa	20 kg
Mogućnost spremljenih programa	1, posljednji korišteni
Vrsta njihanja	linearna
Izgledi njihanja (slika 2.34)	trapezoid, linearno
Širina njihanja	0-50 mm
Brzina njihanja	0-1500 mm/min
Zadržska njihanja	0-5 s

Tablica 2.7 Tehničke specifikacije Rail Bulla [36]

## 2.4.8. Primjeri primjene automatiziranog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika

### Zavarivanje cijevi u cijevne stijene

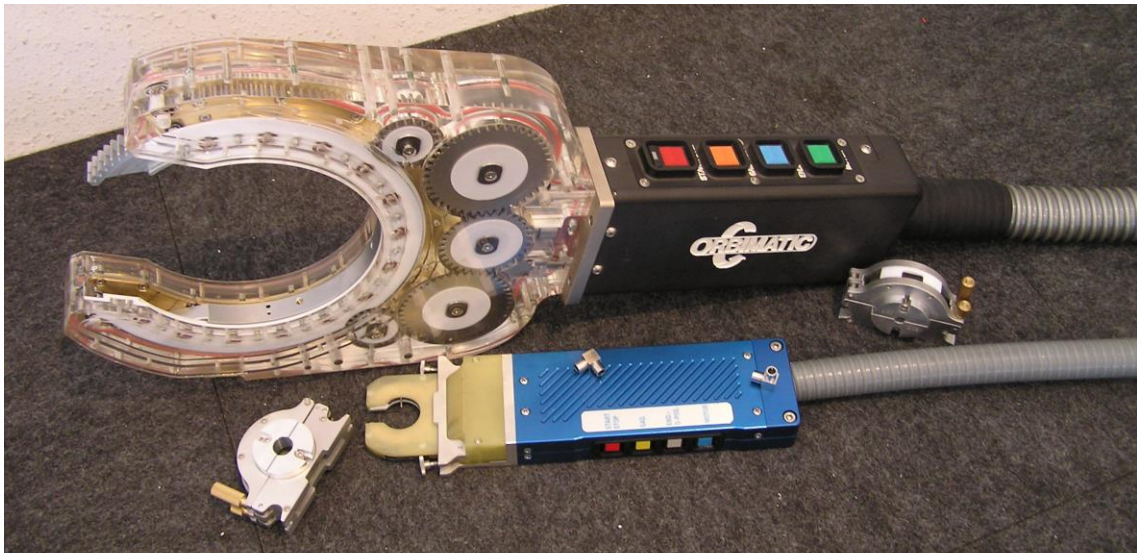
Pri zavarivanju cijevi u cijevne stijene kod izmjenjivača topline, veliki problem zavarivaču predstavlja velika količina cijevi (od nekoliko stotina do desetaka tisuća) koje treba zavariti. Unatoč iskustvu i vještini radnika, veličina cijevi i mali razmak između njih utječu na kvalitetu i produktivnost zavarivanja. Zbog toga što su svi zavareni spojevi u ovom slučaju jednaki, vrlo je jednostavno taj proces automatizirati. Od radnika/operatora se više ne očekuje ručno zavarivanje, već on samo mora poštovati pravila rada koja će omogućiti konstantnu kvalitetu. Glave za zavarivanje cijevi u cijevne stijene mogu biti različitih izvedba, ovisno o primjeni, te mogu raditi sa ili bez dodatnog materijala. [37]



Slika 2.35 Glave za zavarivanje cijevi u cijevnu stijenu [37]

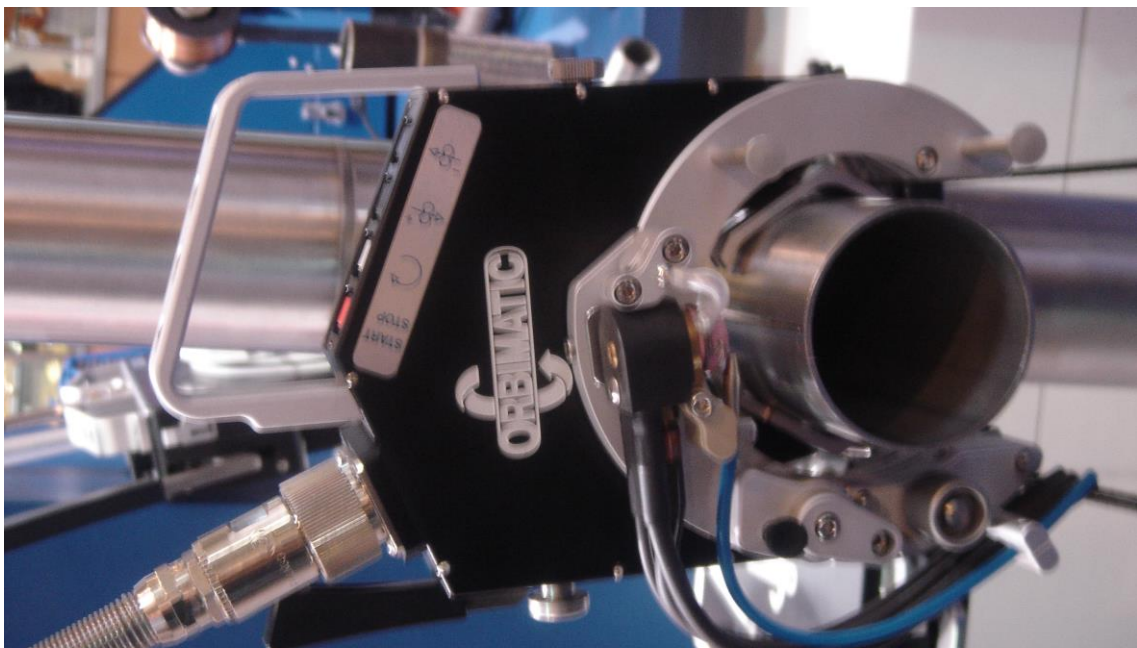
### Zavarivanje cijevi s orbitalnim glavama

S glavama za orbitalno zavarivanje moguće je zavarivati cijevi relativno malih promjera. Glave mogu biti otvorene i zatvorene (Slika 2.36). Zatvorene glave za zavarivanje koriste se za zavarivanje u komornom sistemu. Tijekom zavarivanja je cijeli zavareni spoj zaštićen od atmosfere zaštitnim plinom koji se nalazi u komori glave. Takva vrsta zavarivanja je itekako pogodna za zavarivanje nehrđajućih čelika jer omogućuje stalnu zaštitu korijena i lica zavara od oksidacije. Zatvorene orbitalne glave se koriste za zavarivanje materijala debljine do 3 mm, te vanjskog promjera od 2 do 170 mm, jer ne koriste dodatni materijal.



*Slika 2.36 Zatvorena glava za orbitalno zavarivanje [37]*

Otvorene glave za orbitalno zavarivanje služe za zavarivanje materijala većih debljina ( $> 3\text{mm}$ ), višeslojno zavarivanje, a omogućuju i upotrebu dodatnog materijala. Njima se mogu zavarivati i kutni zavari jer omogućuju zakretanje gorionika  $35^\circ$ - $45^\circ$ . Pri višeslojnom zavarivanju se mora omogućiti i njihanje, pa se tijekom izrade programa za zavarivanje, osim standardnih parametara, zadaju i širina njihanja, frekvencija njihanja i zadržavanje u određenom položaju. Kada njihanje nije uključeno, udaljenost volframove elektrode se odražava mehaničkim putem, a kada postoji njihanje mora postojati automatska kontrola napona zavarivanja (AVC) koja omogućuje elektronsko održavanje udaljenosti. [37]



*Slika 2.37 Otvorena glava za orbitalno zavarivanje [37]*



### 3. Zaključak

Nehrđajući čelici su vrlo važni tehnički materijali. Zbog svojstva antikorozivnosti koriste se u raznim industrijama, primjerice kemijskoj i naftnoj industriji, papirnoj i tekstilnoj industriji, no, osim u industriji koriste se i za razne građevine i konstrukcije. Kao i za većinu metala, najčešća tehnika korištena za spajanje nehrđajućih čelika je zavarivanje.

TIG zavarivanje je postupak zavarivanja materijala netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina. U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja, TIG zavarivanje je relativno spor postupak zavarivanja s malim unosom dodatnog materijala, no, vrlo je precizan i zavarivač ima veliku kontrolu nad zavarivanjem.

Pri TIG zavarivanju nehrđajućih čelika potrebno je osigurati da mikrostruktura i sastav ostanu što sličniji nakon zavarivanja, kako bi materijal i dalje ostao otporan na koroziju. TIG se najčešće koristi za materijale manjih debljina. Metoda koja se često koristi kod TIG zavarivanja nehrđajućih čelika je metoda „vruće žice“. Ta metoda, prethodnim zagrijavanjem materijala omogućuje veće brzine kretanja pri zavarivanju, te unos veće količine materijala, stoga je pogodna za automatizirano zavarivanje.

U današnje vrijeme industrije 4.0 i velikog industrijskog napretka, od proizvođača se očekuje sve veća kvaliteta uz što kraće vrijeme proizvodnje i što manje troškove. Automati za zavarivanje omogućuju proizvođaču konstantnu kvalitetu i maksimalnu brzinu rada uz minimalne troškove. TIG zavarivanje, iako se smatra sporim postupkom, pogodno je za automatizaciju. Uz razvoj metode „vruće žice“, automatizirano TIG zavarivanje ima mogućnost u budućnosti postati brzo gotovo kao MIG zavarivanje. Povećanjem brzine i unosa dodatnog materijala povećat će se i potražnja za TIG zavarivanjem zbog kvalitete, čvrstoće i čistoće zavarenih spojeva, a isto tako i zbog raznih mogućnosti korištenja TIG zavarivanja.

U Varaždinu, 30.9.2020.

*Kocijan*

Filip Kocijan

## 4. Literatura

- [1] M. Gojić, *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*. Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2003.
- [2] B. Kraut, *Strojarski priručnik*, 11. izdanj. Zagreb: Sajema, 2009.
- [3] K. H. Lo, C. H. Shek, and J. K. L. Lai, “Recent developments in stainless steels,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 65, no. 4–6, pp. 39–104, 2009, doi: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
- [4] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*. Avesta Research Center, Avesta, Sweden, 2013.
- [5] N. R. Baddoo, “Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, no. 11, pp. 1199–1206, 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.07.011.
- [6] T. Filetin, F. Kovačiček, and J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, 5th ed. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [7] “Martensitic Stainless Steel - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/martensitic-stainless-steel> (accessed Jun. 19, 2020).
- [8] “Duplex stainless steel.” <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php> (accessed Jun. 20, 2020).
- [9] “TIG set-up 1) | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/TIG-set-up-1\\_fig1\\_314190865](https://www.researchgate.net/figure/TIG-set-up-1_fig1_314190865) (accessed May 02, 2020).
- [10] “Gas Tungsten Arc Welding Torch | American Welding Society Education Online.” <https://awo.aws.org/glossary/gas-tungsten-arc-welding-torch/> (accessed May 02, 2020).
- [11] “Miller Weldcraft TIG Torches - TIG Welding Gun Guides.” <https://www.millerwelds.com/accessories/guns-torches/weldcraft-tig-torches> (accessed Jul. 25, 2020).
- [12] “Air Cooled TIG Torches - torch assy air cooled flex 2pc 25’ - Tig Welding Equipment - Amazon.com.” <https://www.amazon.com/Air-Cooled-TIG-Torches-cooled/dp/B0016AUSS2> (accessed Sep. 21, 2020).
- [13] “CK Worldwide Air Cooled Torch - With Valve with 1 piece 25 foot cable - FL1525V - WeldM Welding Supplies.” <https://weldm.com/shop/tig/torch-packages/ck-worldwide-air-cooled-torch-with-valve-with-1-piece-25-foot-cable-fl1525v/> (accessed Sep. 21, 2020).
- [14] “Compact Series | CK Worldwide.” <https://www.ckworldwide.com/compact-series.html> (accessed Jul. 25, 2020).
- [15] M. Bušić, “Tehnologija 3 - Greške u zavarenim spojevima, prezentacija.”
- [16] D. Koteck, “Stainless Steels Properties – How To Weld Them Where To Use Them,”

*Lincoln Electr. Co.*, pp. 1–40, 2003.

- [17] D. Hilton, *Mig Welding of Stainless Steel.*, vol. 4, no. 1. 1985.
- [18] “TFS: The Secret to Perfect Stainless TIG Welds - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=z86cWH6ZFTA&t=580s> (accessed May 02, 2020).
- [19] I. Juraga, M. Živčić, and M. Gracin, *Reparaturno zavarivanje*. Zagreb: Vlastita naklada, 1994.
- [20] “(2) Don’t Make these 3 Stainless TIG Mistakes - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=6arqw23fq3U> (accessed Jun. 29, 2020).
- [21] M. Horvat, “Izvori energije za zavarivanje.”
- [22] S. O. En, “Linde zaštitni plinovi za zavarivanje Odgovarajući zaštitni plin radi za vas ! Competence line.”
- [23] “How are tig cups made? : Welding.” [https://www.reddit.com/r/Welding/comments/77u679/how\\_are\\_tig\\_cups\\_made/?utm\\_source=ifttt](https://www.reddit.com/r/Welding/comments/77u679/how_are_tig_cups_made/?utm_source=ifttt) (accessed Jul. 25, 2020).
- [24] “EDGE Large Diameter Pyrex Cup Kit.” <https://www.usaweld.com/EDGE-Large-Diameter-Pyrex-Cup-Kit-p/edge-ld-kit.htm> (accessed Jul. 25, 2020).
- [25] “Advances in Automatic Hot Wire GTAW (TIG) Welding | Arc Machines, Inc.” <https://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding> (accessed Aug. 25, 2020).
- [26] “Ador Welding Ltd | TIP-TIG Welding -New Advanced Innovation of The Common GTAW Process - YouTube.” [https://www.youtube.com/watch?v=\\_paDQpzw2RM](https://www.youtube.com/watch?v=_paDQpzw2RM) (accessed Jun. 30, 2020).
- [27] “Automated Welding.” <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/automation> (accessed Jun. 22, 2020).
- [28] “ArcRover 15.” <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/longitudinal-seam-systems/arcrover-15/arcrover-15> (accessed Jun. 22, 2020).
- [29] “Gantry Welding System type WA 1000 / WA 1500 - PROMOTECH.” [https://www.promotech.eu/en/products/wa-1000\\_wa-1500\\_gantry\\_welding\\_system/](https://www.promotech.eu/en/products/wa-1000_wa-1500_gantry_welding_system/) (accessed Jun. 22, 2020).
- [30] “GO-FER® IV | Bug-O Systems.” <https://bugo.com/go-fer-iv/> (accessed Jun. 22, 2020).
- [31] “FCH 3-21 / 3-38 / 6-76 / 9-114 welding heads.” <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/orbital-systems/fch-3-21-3-38-6-76-9-114-welding-heads/fch-3-21-3-38-6-76-9-114-welding-heads> (accessed Jun. 22, 2020).
- [32] “CW-7 | Circle Welder | Bug-O Systems.” <https://bugo.com/cw-7/> (accessed Jun. 22, 2020).



- [33] “Rail Tug | Welding and Cutting Tractor - PROMOTECH.”  
<https://www.promotech.eu/en/products/rail-tug-welding-cutting-tractor/> (accessed Jun. 22, 2020).
- [34] “FMW Multi Welding System.” <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/multi-welding-systems/fmw-multi-welding-system/fmw-multi-welding-system> (accessed Jun. 22, 2020).
- [35] “Arc Welder Tig Welding Robot, Automation Grade: Automatic, Rs 2000000 /unit | ID: 18781970030.”  
<https://www.indiamart.com/proddetail/tig-welding-robot-18781970030.html> (accessed Jun. 01, 2020).
- [36] “Rail Bull | Welding & Cutting Track Carriage - PROMOTECH.”  
<https://www.promotech.eu/en/products/welding-cutting-track-carriage-with-oscillation/> (accessed Jun. 25, 2020).
- [37] D. Čordaš, *Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom*. Pula: Vlastita naklada, 2007.

## 5. Popis slika

Slika 1.1 Zavarivanje taljenjem [1] .....	1
Slika 1.2 Zavarivanje pritiskom [1] .....	2
Slika 2.1 Upotreba nehrđajućih čelika [4] .....	4
Slika 2.2 Mikrostruktura feritnog čelika (povećanje 100:1) [6] .....	5
Slika 2.3 Mikrostruktura martenzita [7] .....	6
Slika 2.4 Mikrostruktura austenitnog čelika [6] .....	7
Slika 2.5 Mikrostruktura duplex čelika [8] .....	8
Slika 2.6 Oblik vrha elektrode i količina zagrijanosti ovisno o struji [1] .....	10
Slika 2.7 Oprema za TIG zavarivanje [9] .....	11
Slika 2.8 Pištolj za TIG zavarivanje [10] .....	12
Slika 2.9 TIG pištolj s nagibom glave 120° [11] .....	13
Slika 2.10 Pištolj s fleksibilnom glavom [12] .....	13
Slika 2.11 Pištolj s rotirajućom glavom [13] .....	13
Slika 2.12 TIG pištolj (MILLER) za automate s kablovima za izvor struje i hlađenje [11] .....	14
Slika 2.13 TIG pištolj za automat (CK Worldwide) [14] .....	14
Slika 2.14 Pozicije zavarivanja prema HRN EN ISO 6947:2019 i ASME .....	19
Slika 2.15 Utjecaj jakosti struje na oblik zavara [18] .....	22
Slika 2.16 Utjecaj unosa prevelike topline u zavar [20] .....	24
Slika 2.17 Impulsna struja [21] .....	24
Slika 2.18 Preporuke za plinove s obzirom na mikrostrukturu nehrđajućeg čelika [22] .....	25
Slika 2.19 Sapnice za TIG zavarivanje [23] .....	26
Slika 2.20 Staklene sapnice [24] .....	27
Slika 2.21 Shema metode vruće žice za TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika [16] .....	28
Slika 2.22 Arcrover 15 [28] .....	31
Slika 2.23 Sustav navođenja za Arcrover 15 [28] .....	32
Slika 2.24 Gantry Welding System [29] .....	33
Slika 2.25 GO-FER® IV [30] .....	34
Slika 2.26 FCH glave za zavarivanje [31] .....	35
Slika 2.27 CW-7 [32] .....	35
Slika 2.28 Rail Tug [33] .....	36
Slika 2.29 Višenamjenski sustav za zavarivanje [34] .....	37
Slika 2.30 Spiralni zavar [34] .....	37
Slika 2.31 Robot za tig zavarivanje [35] .....	38

Slika 2.32 Rail Bull automat [36] .....	39
Slika 2.33 Dimenzije Rail Bulla [36] .....	40
Slika 2.34 Izgled zavara s obzirom na njihanje (I – trapezoidni uzorak; II – bez oscilacija) [36]	40
Slika 2.35 Glave za zavarivanje cijevi u cijevnu stijenu [37] .....	42
Slika 2.36 Zatvorena glava za orbitalno zavarivanje [37] .....	43
Slika 2.37 Otvorena glava za orbitalno zavarivanje [37] .....	43

## 6. Popis tablica

Tablica 2.1 Feritni čelici [6] .....	5
Tablica 2.2 Označavanje i primjena zavarenih i i zalemljenih spojeva [1] .....	17
Tablica 2.3 Parametri za zavarivanje sučeonog spoja [16].....	22
Tablica 2.4 Parametri za zavarivanje kutnih spojeva [16].....	23
Tablica 2.5 Preporuke za plinove iz kataloga Linde [22].....	25
Tablica 2.6 TIG pištolj sa ugrađenim sustavom dobave žice [26] .....	28
Tablica 2.7 Tehničke specifikacije Rail Bulla [36] .....	41

Sveučilište  
Sjever



IZJAVA O AUTORSTVU

1  
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, Filip Kocijan pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom *Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:  
*Filip Kocijan*

Kocijan  
(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, Filip Kocijan neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom *Automatizirano TIG zavarivanje nehrđajućih čelika* čiji sam autor.

Student:  
*Filip Kocijan*

Kocijan  
(vlastoručni potpis)