

# TIG zavarivanje konstrukcijskog čeličnog lima

---

**Povrženić, Toni**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:742277>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Proizvodno strojarstvo



# ZAVRŠNI RAD

Student: Toni Povrženić

Mentor: Božić Tomislav, dipl.ing.

Karlovac, 2019.

## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni preddiplomski studij: Strojarsvo

Usmjerenje: Proizvodno strojarstvo

Karlovac, 10.04.2019

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Toni Povrženić**

Matični broj : 0110613004

Naslov: **TIG ZAVARIVANJE KONSTRUKCIJSKOG ČELIČNOG LIMA**

#### Opis zadatka:

Konstruktivski čelik je najzastupljeniji materijal u strojarstvu. Upotrebljava se za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja zato. U ovom radu obraditi će se konstruktivski čelik s aspekta mogućnosti spajanja primjenom topline. Biti će dan prikaz TIG postupka navarivanja konstruktivskog čelika. Također će se obraditi i problemi koji se javljaju pri zavarivanju te na koji način se isti mogu spriječiti.

**Zadatak zadan:**

**Rok predaje rada:**

**Predviđeni datum obrane:**

10.04.2019

**Mentor:**

**Predsjednik Ispitnog povjerenstva:**

Božić Tomislav, dipl.ing.

## IZJAVA I ZAHVALA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru Božić Tomislavu i profesorici Tomić Tanji na pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Ivanu Vovku sa Katedre za zavarene konstrukcije na pomoći u izradi eksperimentalnoga dijela rada te svima koji su na bilo koji način pridonijeli nastanku ovog rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji i kolegama na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom studiranja.

# Sadržaj

1. UVOD .....	11
1.1. OPĆENITO O KONSTRUKCIJSKIM ČELICIMA .....	11
1.1.1. UGLJIČNI ( NELEGIRANI ) ČELICI .....	11
1.1.2. LEGIRANI ČELICI .....	12
2. OPĆI KONSTRUKCIJSKI ČELICI .....	14
2.1. NELEGIRANI ČELICI ZA NOSIVE KONSTRUKCIJE .....	14
2.2. ČELICI ZA STROJOGRAĐNJU .....	15
3. OSTALI KONSTRUKCIJSKI ČELICI .....	15
3.1. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE .....	15
3.2. UGLJIČNI ČELICI ZA TANKE LIMOVE .....	16
3.3. NISKOUGLJIČNI ČELICI ZA TRAKE .....	17
3.4. ČELICI ZA CEMENTIRANJE .....	17
3.5. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE .....	18
3.6. ČELICI ZA OPRUGE .....	19
3.7. ČELICI POBOLJŠANE REZLJIVOSTI .....	19
3.8. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA .....	20
3.8.1. UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI .....	20
3.8.2. NISKOLEGIRANI ČELICI .....	20
3.8.3. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI .....	21
3.8.4. VISOKOLEGIRANI AUSTENITNI ČELICI .....	21
3.9. ČELICI ZA RAD NA NISKIM TEMERATURAMA .....	21
3.9.1. NISKOLEGIRANI (MIKROLEGIRANI) SITNOZRNATI ČELICI .....	22
3.9.2. ČELICI LEGIRANI NIKLOM ZA POBOLJŠANJE .....	22
3.9.3. Cr-Ni i Cr-Ni-N(Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N AUSTENITNI ČELICI .....	22
4. OPĆENITO O TIG ZAVARIVANJU .....	23
5. UTJECAJNI FAKTORI KOD TIG ZAVARIVANJA .....	25
5.1. ELEKTRIČNI LUK .....	25
5.2. VRSTA STRUJE I POLARITET ELEKTRODE .....	27
5.2.1. ISTOSMJERNA STRUJA ( DC) .....	27
5.2.2. TEHNIKA PULSNE STRUJE .....	30
5.2.3. IZMJENIČNA STRUJA ( AC ) .....	31
5.3. ZAŠTITNI PLINOVI .....	33

5.3.1.	ARGON.....	34
5.3.2.	HELIJ .....	35
5.3.3.	MJEŠAVINA ARGONA I VODIKA ( 2 – 5 % ).....	36
5.3.4.	MJEŠAVINA ARGONA I HELIJA ( DO 50 % ) .....	36
6.	OPREMA ZA TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	37
6.1.	PIŠTOLJ ( PLAMENIK ).....	37
6.2.	ELEKTRODE.....	41
6.3.	KABLOVI .....	43
6.3.1.	KABLOVI ZA PIŠTOLJ .....	43
6.4.	IZVOR NAPAJANJA .....	44
6.4.1.	TIP 1 - TRANZISTORI S REGULATOROM IZVORA NAPAJANJA – ISTOSMJERNA STRUJA.....	44
6.4.2.	TIP 2 – KOMUTIRANI TRANZISTORSKI IZVOR NAPAJANJA – ISTOSMJERNA STRUJA.....	44
6.4.3.	TIP 3 – TIRISTORSKI IZVORI NAPAJANJA ( SCR ) - – ISTOSMJERNA I IZMJENIČNA STRUJA .....	45
6.4.4.	TIP 4 – IZMJENIČNI ISPRAVLJAČ I INVERTERSKI IZVORI NAPAJANJA – ISTOSMJERNA I IZMJENIČNA STRUJA .....	46
6.5.	ZAVARLJIVOST KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA .....	47
6.5.1.	PUKOTINE U VARU.....	47
7.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	48
7.1.	NAVARIVANJE PLOČA.....	48
7.1.1.	PLOČA BROJ 1 .....	50
	PLOČA BROJ 2.....	51
7.2.	PRIPREMA UZORAKA.....	51
7.2.1.	REZANJE UZORAKA.....	52
7.2.2.	BRUŠENJE UZORAKA.....	52
7.2.3.	POLIRANJE UZORAKA.....	53
7.2.4.	NAGRIZAVANJE POVRŠINE.....	53
7.3.	ANALIZA UZORAKA .....	54
7.3.1.	MAKROSKOPSKO ISPITIVANJE .....	54
7.3.2.	MIKROSKOPSKO ISPITIVANJE.....	56
8.	ZAKLJUČAK .....	58
	LITERATURA.....	59

# Popis slika, tablica, dijagrama

Slika 1. Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika s 0,1% ugljik (Povećanje 200x).....	14
Slika 2. Postupak cementiranja čelika.....	18
Slika 3. Postupak poboljšavanja čelika.....	18
Slika 4. Dijagram naprezanje – istezanje čelika za opruge.....	19
Slika 5. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja.....	24
Slika 6. Uspostava električnog luka.....	25
Slika 7. Električni luk.....	26
Slika 8. Područja električnog luka kod TIG zavarivanja.....	26
Slika 9. Elektroda na negativnom a radni komad na pozitivnom polu.....	27
Slika 10. Karakteristični izgled el. luka kod zavarivanja sa istosmjernom strujom.....	28
Slika 11. Preporučena koncentričnost tijela i vrha elektrode kod zavarivanja istosmjernom strujom.....	29
Slika 12. Ispravni i neispravni vrh elektrode za zavarivanje istosmjernom strujom.....	29
Slika 13. Preklapanje zavarenih spojeva kod pulsirajućeg TIG zavarivanja.....	30
Slika 14. Dijagram za odabir parametra kod pulsnog zavarivanja.....	31
Slika 15. Vrste valova izmjenične struje.....	32
Slika 16. Karakterističan izgled izmjeničnog el. luka koji pokazuje katodno čišćenje površine.....	33
Slika 17. Karakteristika TIG zavarivanja u zaštiti argona i helija.....	34
Slika 18. Električni luk u argonu.....	35
Slika 19. Električni luk u heliju.....	36
Slika 20. Osnovna oprema kod TIG zavarivanja.....	37
Slika 21. Dijelovi pištolja.....	38
Slika 22. Vodom hlađeni plamenik.....	39
Slika 23. Plinom hlađen plamenik.....	40
Slika 24. Suvremeni pištolj za TIG zavarivanje „Lincoln“.....	41
Slika 25. Odabir veličine elektrode za određeni raspon struje.....	42

Slika 26. Tipovi elektroda i njihove karakteristike.....	42
Slika 27. Izvor napajanja preciznog TIG zavarivanja tipa 2.....	45
Slika 28. Izvor napajanja TIG/MIG/MAG 300 A tipa 3.....	46
Slika 29. Pukotina u varu.....	47
Slika 30. TIG aparat Fronius magic wave 2000.....	48
Slika 31. Očišćena pločica konstrukcijskog čelika 1.0038.....	49
Slika 32. Dijelovi pištolja koji su se koristili u TIG navarivanju.....	50
Slika 33. Lokacija testnih uzoraka prema normi.....	51
Slika 34. Aparat za brušenje i poliranje Buehler Gridrer/Polisher.....	52
Slika 35. Struers DAP – V.....	53
Slika 36. Radni prostor gdje se odvijao postupak nagrizavanja površina.....	54
Slika 37. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51.....	56
-----	
Tablica 1. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na svojstva konstrukcijskih čelika.....	16
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika DC01.....	48
Tablica 3. Kemijski sastav čelika DC01.....	48
Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala ZESG2.....	49
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala ZESG2.....	49
Tablica 6. Ploča broj 1, parametri TIG zavarivanja.....	50
Tablica 7. Ploča broj 2 parametri TIG zavarivanja.....	51
Tablica 8. Makroskopski uzorci ploče broj 1 .....	54
Tablica 9. Makroskopski uzorci ploče broj 2.....	54
Tablica 10. razine prihvatljivosti za nepravilnosti.....	54
Tablica 11. Ploča broj 1 mikroanaliza uzoraka.....	56
Tablica 12. Ploča broj 2 mikroanaliza uzoraka.....	57



## Popis kratica

TIG	Tungsten inert gas
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
C	ugljik
°C	stupnjevi celzijevi
Mn	mangan
Si	silicij
Cr	krom
Mo	molibden
Ni	nikal
Al	aluminij
W	wolfram
V	vanadij
HV	tvrdća po Vickersu
DC	istosmjerna struja
AC	izmjenična struja

## Popis jedinica

N	njutn
$\mu\text{m}$	mikrometar
K	kelvin
mm	milimetar
g	gram
$\text{cm}^3$	kubični centimetar
A	amper
s	sekunda
min	minuta
Hz	herc
l	litra

## Sažetak

U ovom radu opisan je postupak TIG zavarivanja konstrukcijskog čelika. Obradene su prednosti i mane istoga postupka. Dan je prikaz izvedbe postupka TIG zavarivanja. Analizirani su dijelovi, parametri i primjena TIG zavarivanja.

Prvo su opisane neke opće karakteristike konstrukcijskog čelika. Nakon toga opisan je TIG postupak zavarivanja. Također su navedene i objašnjene struje koje se koriste za zavarivanje kao i zaštitni plinovi te elektrode koje se koriste.

Nakon toga je opisan postupak zavarivanja konstrukcijskih čelika, njihova zavarljivost te parametri zavarivanja i utjecaj tih parametara na zavar.

U eksperimentalni dijelu rada prikazao se utjecaj jakosti struje na geometriju i izgled zavara. Napravila se makroskopska i mikroskopska analiza navara.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, konstrukcijski čelik

## Summary

This work describes the TIG welding of structural steel. The advantages and disadvantages of the same procedure are discussed. The day is an illustration of the TIG welding procedure. The parts, parameters and application of TIG welding were analyzed.

First, some general characteristics of constructional steel are described. The TIG welding process is also described. The currents used for welding as well as the protective gases and the electrodes used are also listed and explained.

Thereafter, the procedure for welding structural steels, their weldability, welding parameters and the influence of these parameters on the weld is described.

In the experimental part of the work, the influence of current power on the geometry and appearance of the weld was shown. Macroscopic and microscopic analysis of the weld was performed.

Key words: Tungsten inert gas, construction steel

## 1. UVOD

### 1.1. OPĆENITO O KONSTRUKCIJSKIM ČELICIMA

Zbog mnogostruke primjene ove grupe čelika traže se i različita mehanička svojstva, kako bi se za svaki iz ove grupe čelika mogla ostvariti i višestruka primjena. Koriste se za nosive konstrukcije u visokogradnji, mostogradnji, brodogradnji, gradnji vozila, gradnji spremnika i slično. [2]

S obzirom na mehanička svojstva konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstrukcijski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi i skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje). [1]

Konstrukcijski čelici se dijele na ugljične (nelegirani) i legirane. Nelegirani i legirani konstrukcijski čelici koji sadrže  $C < 0,60\%$  često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od  $-25$  do  $300$  °C, kao i za nosive i građevinske konstrukcije. [1]

#### 1.1.1. UGLJIČNI ( NELEGIRANI ) ČELICI

Ugljični čelici obične kvalitete svrstavaju se pretežno prema mehaničkim svojstvima te se koriste za slabije opterećene dijelove strojeva, uređaja, vozila ili za šipke i rešetke (npr. čelik S185). Svi nelegirani čelici običnog kvaliteta primjenjuju se u sirovom stanju (bez toplinske obradbe). [1]

Srednje ugljični čelici ( $0,25 - 0,60\%$  C) koriste se uglavnom u normaliziranom stanju, a u poboljšanom stanju služe za dijelove manjih presjeka. Čelici sa  $0,5-0,60\%$  ugljika primjenjuju se za dijelove otporne na trošenje, kao npr. zupčanici, pužni transporteri, ekscentri, klinovi. Sitni strojni dijelovi izrađuju se također od srednje ugljičnih čelika isporučenih u obliku limova, traka, žica, vučenih ili hladno valjanih šipki. [1]

## 1.1.2. LEGIRANI ČELICI

Legirani čelici za poboljšanje (0,25 - 0,60% C) mogu biti: [3]

- manganski (1,20-1,60% Mn) – za osovine vratila, Mn-Si za veće zupčanike
- kromovi (1-1,5% Cr-Si) - za jako opterećena koljenasta vratila, zupčanike
- krom-molibdenski (1% Cr; 0,2% Mo) - za sitnije žilave dijelove
- krom-niklovi (0,6-1,5% Cr i 1-3,5% Ni) - zupčanci mjenjača, dijelovi turbina koji rade na temperaturama do 500 °C

Za površinsko kaljenje koriste se Cr-Mn i Mn-Si čelici s 0,3-0,5% ugljika. Za cementaciju upotrebljavaju se čelici s  $C < 0,25\%$  i legirani s Cr, Cr-Mn, Cr-Mo i Cr-Ni. Tako se kromovi čelici (npr. čelik 15Cr3) koriste za bregaste osovine, osovine klipova, vretena i drugih dijelova izloženih trošenju. Slično ovome i krom-niklovi i krom-manganski čelici za cementaciju upotrebljavaju se za izradu zupčanika mjenjača i diferencijala (npr. čelici 15CrNi6, 16MnCr5), a krom-molibdenski čelici za bregaste osovine, zupčanike, kardanske zglobove (npr. čelik 25CrMo4). Čelici za nitriranje (npr. 34CrAlNi7, 34CrAlMo5) postižu traženu površinsku tvrdoću (900-950 HV) sitno dispergiranim nitridima aluminijska, kroma i molibdena, bez naknadne toplinske obradbe (neophodno je prethodno poboljšanje). Ugljik se ograničava na 0,45% radi sprječavanja stvaranja karbida kroma i molibdena koji imaju manju tvrdoću nego nitridi. [1]

Čelici za opruge trebaju imati visoku granicu razvlačenja, zadovoljavajuću istezljivost, te odgovarajuću dinamičku izdržljivost (npr. opruge automobila, odbojnici vagona, oslonci temelja strojeva). Posebno se za neke primjene traži otpornost na koroziju i povišene temperature. Tražena svojstva postižu se hladnom deformacijom (valjanje, vučenje) ili toplinskom obradbom. Svojstva elastičnosti poboljšava dodatak 0,15-1,8% silicija, a prokaljivost se kod većih presjeka povećava dodacima 1% mangana ili 1% kroma. [1]

Čelici za kotrljajuće ležajeve trebaju imati veliku tvrdoću i otpornost na trošenje, sposobnost obradljivosti rezanjem i deformiranjem, dobru prokaljivost uz minimalnu deformaciju. To su uglavnom kromovi čelici s visokim sadržajem ugljika i najviše čistoće (sastava 1% C i 0,50-1,50% Cr). Toplinska obradba se sastoji od kaljenja sa 850 °C u ulju i niskog popuštanja (160 °C). [1]

Čelici za rad pri niskim temperaturama sadrže nikal ili mangan i nizak sadržaj ugljika (0,10-0,15%). Pri 3-5% nikla temperatura prelaska u krhko stanje je oko -100 °C, a pri 8-10% nikla oko -200 °C. Uglavnom služe za izradu transportnih i stacionarnih rezervoara za suhi led (CO<sub>2</sub>) ili tekući metan (CH<sub>4</sub>). [1]

Čelici za ventile motora sa unutarnjim sagorijevanjem izloženi su pri radu visokim temperaturama (do 900 °C) i cikličkim promjenama temperature. Stoga moraju zadržati dobra mehanička svojstva na povišenim temperaturama i da budu vatrootporni. Najčešće se primjenjuju visokolegirani kromovi čelici X45CrSi19-3 (0,40% C; 3,2% Si; 9,0% Cr), X45CrMoV15 (0,5% C; 16,5% Cr; 2,0% Mo), a za najopterećenije ventile X6CrNiMoTi17/12/2 (0,45% C; 1,5% Si; 14,5% Cr; 1,3% Ni i 3% W). Za slabije opterećene usisne ventile može odgovarati čelik 67Si7 (0,6% C; 1,7% Si i 0,7-1% Mn). [1]

Čelici povišene čvrstoće (mikrolegirani čelici) razvijeni su posljednjih tridesetak godina s ciljem da se smanji masa konstrukcije: mostova, brodova, rezervoara, cisterni, cijevi pod pritiskom i sl. Tehnologija mikrolegiranja omogućila je proizvodnju nove kategorije čelika, koji predstavljaju konvencionalne ugljične čelike sa minimalnim dodacima legirajućih elemenata (manje od 0,50%), radi povećanja granice razvlačenja, čvrstoće i tvrdoće. [1]

## 2. OPĆI KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se koristi za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr. Opći konstrukcijski čelici dijele se na: [3]

- nelegirane čelike za nosive konstrukcije
- čelike za strojogradnju

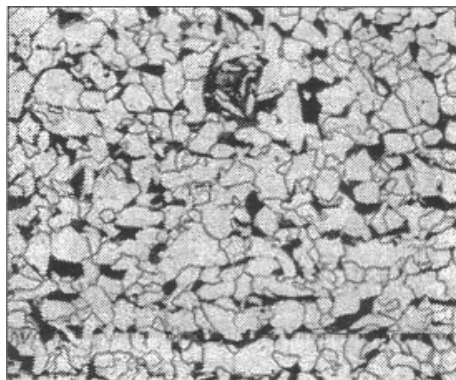
### 2.1. NELEGIRANI ČELICI ZA NOSIVE KONSTRUKCIJE

Od ove podskupine čelika se traži dovoljno visoka nosivost i sigurnost, a također je poželjno da ovi čelici budu dovoljno čvrsti kod rada pri povišenim temperaturama, zatim dovoljno otporni na trošenje i dovoljno dinamički izdržljivi. Od tehnoloških svojstava bitna je zavarljivost. Pokazatelj dobre zavarljivosti je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta –  $C_e$ , koji se računa prema formuli:

$$C_e = \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} [3]$$

Zavarljivost je bolja, što je niži postotak ugljika i što je niži stupanj legiranosti. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu, upravo zbog nezajamčenog kemijskog sastava, kao i višeg masenog udjela nečistoća nego kod ostalih čelika.

Isporučuju se uglavnom u toplovaljanom stanju, ili u normaliziranom stanju. Temperature uporabe su normalne i snižene (od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ ), a kod sniženih temperatura, povećava se opasnost od krhkog loma. [3]



Slika 1. Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika s 0,1% ugljika (povećanje 200x) [3]

## 2.2. ČELICI ZA STROJOGRADNJU

Čelici za strojogradnju se primjenjuju za one strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove, ili pak prenose sile i momente. Ovi su čelici nešto slabije zavarljivi, zato što imaju viši maseni udio ugljika, a također su više čvrstoće i niže istežljivosti od općih konstrukcijskih čelika. [3]

Iako imaju viši sadržaj ugljika nisu namijenjeni za kaljenje. Karakteristični čelici ove skupine prema EN 10027 su: E295 (Č0545) s oko 0,3% C, E335 (Č0645) s oko 0,4% C, te E360 (Č0745) s oko 0,5% C. [1]

## 3. OSTALI KONSTRUKCIJSKI ČELICI

### 3.1. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE

Cilj razvoja ove skupine konstrukcijskih čelika je postizanje što više granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a time i višeg dopuštenog naprezanja u radu. [3]

Međutim, polazeći od sve naglašenijih potreba za uštedom materijala i energije u posljednje vrijeme sve se veći značaj usmjerava prema žilavosti, zavarljivosti i sposobnosti oblikovanja. [1]

Za sve moderne visokočvrste zavarljive čelike karakteristično je da su mikrolegirani s niobijem, vanadijem, titanom ili nekim drugim mikrolegirajućim elementom. Razlika u odnosu na uobičajen sastav konstrukcijskih čelika je u relativno niskom sadržaju ugljika i dodatku mikrolegirajućeg elementa. Sadržaj mikrolegirajućeg elementa u mikrolegiranim čelicima iznosi od 0,01 do 0,1% a sadržaj ugljika je vrlo nizak (0,02-0,20%). Mikrolegirajući elementi ne mijenjaju osnovnu vrstu čelika tj. nelegirani čelik ostaje nelegiran, niskolegirani čelik ostaje niskolegiran. [1]



Mikrolegirajući elementi		Al	B	Nb	Te	Ti	V	Zr
	O	++	+			++	+	++
	S				(+)	++		++
	N	+	+	+		++	+	++
	C			+		+	+	+
Mikroskopski utjecaj	krupne (grube) izlučevine							+
	sitne (fine) izlučevine	+	(+)	+			+	+
	blokiranje dislokacija i granica zrna	+		+		+		
	utjecaj na oblik sulfida				+	+		+
Makroskopski utjecaj	povišenje čvrstoće na povišenim temperaturama	+				+		
	utjecaj na sposobnost toplog oblikovanja	-	(-)	-		+		
	usporavanje rekristalizacije			++		++	(+)	
	utjecaj na brzinu fazne transformacije	+	-	-, *		-, *	-	
	usitnjenje zrna	+		++		+	+	
	precipitacijsko očvršćivanje			++		++	+	
	poboljšavanje sposobnosti za hladno oblikovanje				+	+		+

(+) pozitivan utjecaj, (-) negativan utjecaj, \*) ovisno o prethodnoj toplinskoj obradbi

Tablica 1. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na svojstva konstrukcijskih čelika [1]

### 3.2. UGLJIČNI ČELICI ZA TANKE LIMOVE

Ugljični čelici od kojih se izrađuju tanki limovi, čija je debljina manja od 3 mm, dijele se u dvije grupe: [3]

- niskougljični čelici – limovi namijenjeni oblikovanju deformiranjem
- ugljični čelici za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima

Niskougljični čelici za tanke limove sadrže oko 0,1 % C. Najvažnije svojstvo koje se traži od ovih čelika je deformabilnost – duktilnost i zbog toga su prikladni za vučenje, savijanje i utiskivanje. Površina ovih limova omogućava nanošenje metalnih i nemetalnih prevlaka. Zavarljivost ovih čelika je dobra, zbog niskog sadržaja ugljika. [3]

Ugljični čelici sa zajamčenim mehaničkim svojstvima pripadaju u skupinu općih konstrukcijskih čelika. [3]

Primjeri ugljičnih čelika za tanke limove: Č0145, DC01 (Č0146), DC04 (Č0147 i Č 0148). [3]

### 3.3. NISKOUGLJIČNI ČELICI ZA TRAKE

Maseni udio ugljika kod ovih čelika je manji od 0,1 %; koriste se za izradu hladnovaljanih traka, a također se od njih izrađuju tanki limovi i žica. [3]

Kod ove skupine čelika, u praksi se navode i opisi stupnja tvrdoće, koji ovise o deformiranom ili žarenom stanju: [3]

- a) mekožareno stanje;
- b) očvrsnuto;
- c) 1/8 tvrdo;
- d) 1/4 tvrdo;
- e) 1/2 tvrdo;
- f) 3/4 tvrdo;
- g) tvrdo;
- h) svjetlotvrdo

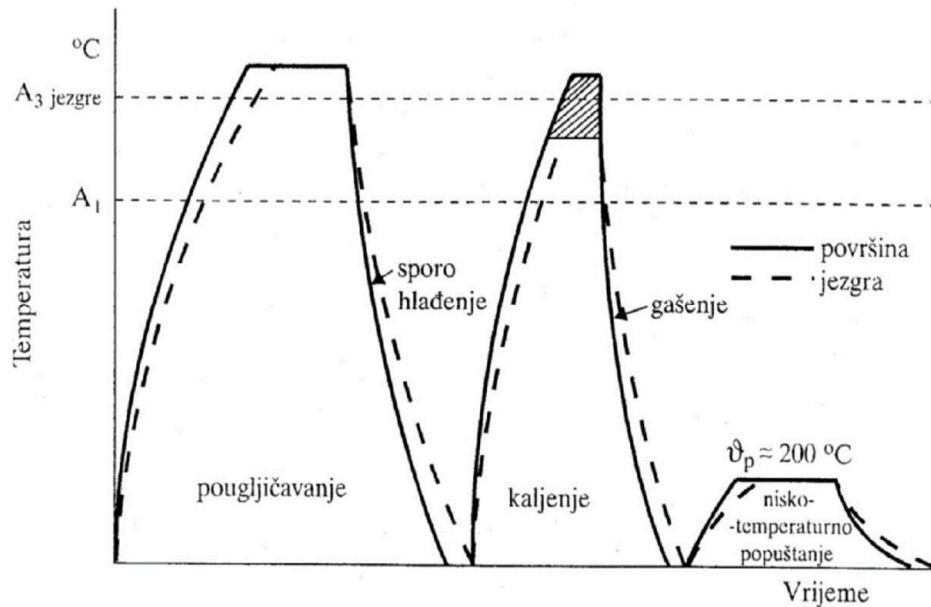
Vrste niskougljičnih čelika za trake su: DC01 i DC04 (Č0146, Č0147, Č0148). [3]

### 3.4. ČELICI ZA CEMENTIRANJE

Čelici za cementaciju predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava rubni sloj. Nakon pougljičavanja rubnog sloja provodi se kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost nepougljičene jezgre. Čelici za cementaciju uglavnom sadrže 0,1-0,2% ugljika prije pougljičavanja, a mogu biti ili nelegirani ili niskolegirani. [1]

Budući da niskougljični čelici s 0,1-0,2% ugljika nisu skloni povišenju tvrdoće kaljenjem (tek čelici s 0,25% C) potrebno im je radi zakaljivanja i povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima (0,8-0,9% C). [1]

Nakon cementacije pougljičena jezgra ostaje feritno-perlitna ukoliko proizvod nije prokaljen, tj. nastaje niskougljični martenzit u slučaju prokaljivanja. Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje s znatnim iznosom žilavosti. Nakon cementacije površinski slojevi sadrže visokougljični martenzit. [1]

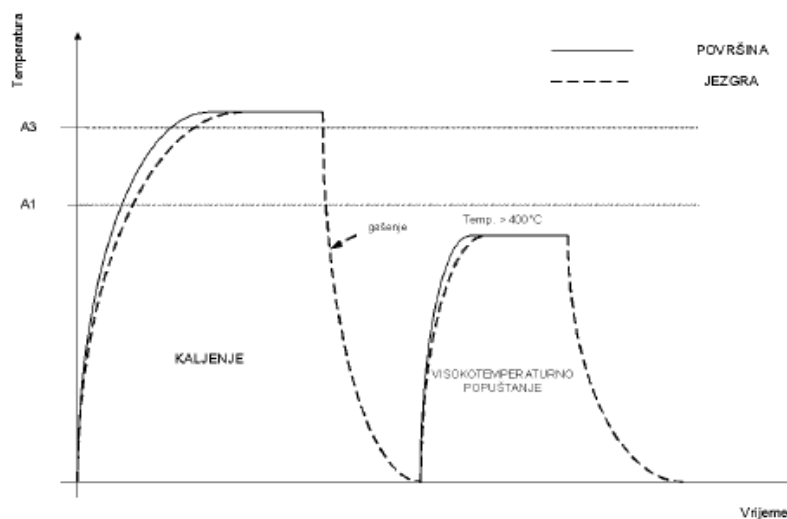


Slika 2. Postupak cementiranja čelika [3]

Primjeri čelika za cementiranje: C10 (Č1120), C15 (Č1220), C10E (Č1121), C15E (Č1221), 15Cr3 (Č4120), 16MnCr5 (Č4320), 20MnCr5 (Č4321), 20CrMo5 (Č4720), 20MoCr4 (Č7420), 15CrNi6 (Č5420), 18CrNi8 (Č5421). [3]

### 3.5. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Ova skupina čelika sadrži od 0,25 do 0,6 % C. Prema svom kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. To su nelegirani ili niskolegirani konstrukcijski čelici, koji postupkom poboljšavanja (kaljenje + visokotemperaturno popuštanje), postižu željenu granicu razvlačenja i čvrstoću, uz dobra svojstva žilavosti. [2]



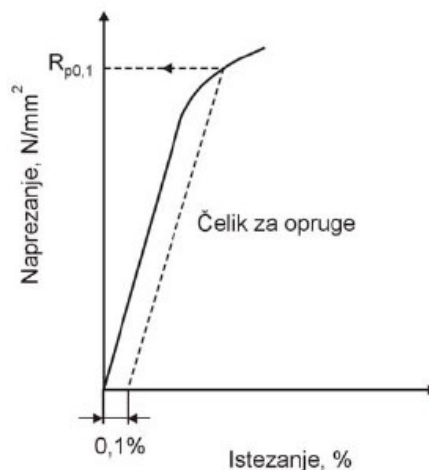
Slika 3. Postupak poboljšavanja čelika [3]

### 3.6. ČELICI ZA OPRUGE

Glavni zahtjev koji se postavlja pred čelike za opruge je da pod djelovanjem radnog opterećenja postignu traženu elastičnu deformaciju. U pogledu elastičnih deformacija svi čelici ostvaruju jednako opružno djelovanje koje je posljedica istog modula elastičnosti ( $E$ ) i modula smičnosti ( $G$ ) u slučaju torzijski opterećenih opruga. Iz toga slijedi da će svaki čelik imati isto opružno djelovanje dok mu je naprezanje niže od granice razvlačenja. [1]

Čelici za opruge moraju postići slijedeća svojstva:

- visoku granicu razvlačenja, odnosno granicu elastičnosti, kao i visoku vlačnu čvrstoću;
- sigurnost protiv krhkog loma;
- visoku dinamičku izdržljivost;
- otpornost na udarno opterećenje – žilavost.



Slika 4. Dijagram naprezanje – istezanje čelika za opruge [1]

### 3.7. ČELICI POBOLJŠANE REZLJIVOSTI

Namijenjeni su za izradu različitih sitnijih dijelova na visokoproduktivnim automatima, pa se zato nazivaju i „čelici za automate“. Ovi čelici moraju imati dobru rezljivost, dakle bolju obradljivost odvajanjem čestica u odnosu na druge čelike. [2]

Čelici poboljšane rezljivosti primjenjuju se za velikoserijsku proizvodnju, ili u slučaju izrade manjih količina, ako bi primjenom drugih čelika troškovi obrade bili previsoki. [2]

Kod ove skupine čelika, maseni udio sumpora je povišen na  $0,15$  do  $0,45\%$ , a isto tako je povišen maseni udio fosfora i mangana. [2]

Čelici poboljšane rezljivosti isporučuju se u hladno valjanom, hladno vučenom, ljuštenom i brušenom stanju. [2]

Čelici za automate se uglavnom koriste za slabije mehanički opterećene dijelove jer im je žilavost i dinamička izdržljivost slabija nego kod drugih konstrukcijskih čelika. Ovi čelici mogu biti prikladni za cementaciju (npr. čelici 10S20, 17S20, 10S22) ili za poboljšavanje (npr. čelici 35S20, 45S20). [1]

### 3.8. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

S obzirom na temperaturno područje primjene, razlikuju se 4 osnovne podskupine čelika: [2]

- a) ugljični (nelegirani) čelici;
- b) niskolegirani čelici;
- c) visokolegirani martenzitni čelici;
- d) visokolegirani austenitni čelici

#### 3.8.1. UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI

Radi se o nelegiranim niskougljičnim ( $\leq 0,22\% \text{ C}$ ) čelicima garantiranog sastava i garantiranih mehaničkih svojstava. S obzirom na radne temperature, pri kojima često nastupaju pojave umjetnog starenja, treba ovu grupu čelika načiniti posebno otpornom na starenje. Prikladni su za trajni rad pri povišenim temperaturama (do oko  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ), jer su im pri visokim temperaturama (iznad  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ) trajna svojstva čvrstoće i granica razvlačenja vrlo niska. [2]

Primjeri nelegiranih čelika za kotlovske limove: P235GH (Č1202), P265GH (Č1204). [3]

#### 3.8.2. NISKOLEGIRANI ČELICI

Ovi čelici su legirani s molibdenom, ili molibdenom i kromom, a kod nekih vrsta uz dodatak vanadija. Zbog niskog masenog udjela ugljika ( $< 0,25\%$ ), dobro su zavarljivi. Molibden i krom stvaraju posebne karbide, koji usporavaju pojavu puzanja, a povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Element molibden sprečava pojavu krhkosti kod popuštanja. Krom djeluje na povećanje mehaničke otpornosti, istežljivosti i oksidacijske postojanosti. [2]

Primjeri niskolegiranih toplinski čvrstih čelika: C35E (Č1431), 15Mo3 (Č7100), 13CrMo4-4 (Č7400). [3]

### 3.8.3. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI

Ovi čelici sadrže oko 1 % Mo i do 12 % Cr. U čvrstoj otopini ima manje od 12 % Cr, što uzrokuje manju korozivsku otpornost.

Otporni su na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju, ako se popuštaju na tvrdoću < 24 HRC, a kako sadrže molibden, nisu podložni krhkosti popuštanja, kao feritni nehrđajući čelici. Primijenjuju se za duži rad pri temperaturama od 550 – 600 °C, a primjer primjene su lopatice, rotor i kućišta parnih turbina. [2]

### 3.8.4. VISOKOLEGIRANI AUSTENITNI ČELICI

Ovi čelici se još dodatno legiraju s molibdenom, volframom, vanadijem, titanom i niobom, što omogućuje izlučivanje karbida, te precipitiranje toplinski postojanih intermetalnih faza, što još povisuje tu otpornost. Zbog vrlo visoke temperature rekrystalizacije (iznad 900 °C), moguća je njihova dugotrajna primjena pri temperaturama od 600 – 750 °C. Uz visoku otpornost na puzanje, austenitni čelici imaju vrlo dobru kemijsku otpornost, odnosno vatrootpornost. [2]

## 3.9. ČELICI ZA RAD NA NISKIM TEMERATURAMA

Kod čelika prikladnih za rad pri niskim temperaturama, najvažnije zahtijevano svojstvo je žilavost, što znači da se od ovih čelika traži neosjetljivost na krhki lom. Postoje 3 osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama:

- Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici
- Čelici legirani s niklom (1,5 – 9 % Ni) za poboljšavanje
- Cr-Ni i Cr-Ni-N(Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N austenitni čelici [2]

### 3.9.1. NISKOLEGIRANI (MIKROLEGIRANI) SITNOZRNATI ČELICI

Primijenjuju se u normaliziranom stanju do  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a poboljšani niskolegirani sitnozrnati čelici se primijenjuju na temperaturama do  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [3]

### 3.9.2. ČELICI LEGIRANI NIKLOM ZA POBOLJŠANJE

Primijenjuju se u temperaturnom intervalu od  $-85$  do  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nikal je djelotvoran element za povišenje žilavosti pri niskim temperaturama, zato što pospješuje stvaranje sitnog zrna i vrlo žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja. [3]

### 3.9.3. Cr-Ni i Cr-Ni-N(Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N AUSTENITNI ČELICI

Ovi čelici imaju dovoljnu žilavost čak i u blizini apsolutne nule. Primjena čelika za rad pri niskim temperaturama su: spremnici tekućih plinova pod tlakom, cjevovodi za tekuće plinove, te razni uređaji u tehnici hlađenja. [3]

## 4. OPĆENITO O TIG ZAVARIVANJU

Zavarivanje TIG postupkom ( Tungsten Inert Gas ) ili elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina ( Gas Tungsten Arc Welding – GTAW ) je postupak ručnog zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu odnosno smjesi neutralnih plinova, gdje se koristi netaljiva wolframova elektroda i neki dodatni materijal.

Postupak se temelji na uspostavljanju i održavanju električnog luka između volframove netaljive elektrode i radnog komada uz zaštitu neutralnog ili inertnog plina, odnosno odgovarajuće mješavine plinova.

TIG postupak razvijen je za zavarivanje magnezija i njegovih legura, a danas se upotrebljava za zavarivanje različitih metala od aluminija, titana, nehrđajućih čelika, tankih čeličnih limova i drugih neželjeznih metala i legura.

Kao zaštitni plin koristi se argon ili helij koji ima svrhu da stvori zaštitnu atmosferu koja se može što lakše ionizirati i štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline.

Početak razvoja TIG zavarivanja povezuje se sa početkom II. svjetskog rata u svrhu zamjene plinskog zavarivanja u avionskoj industriji. [5]

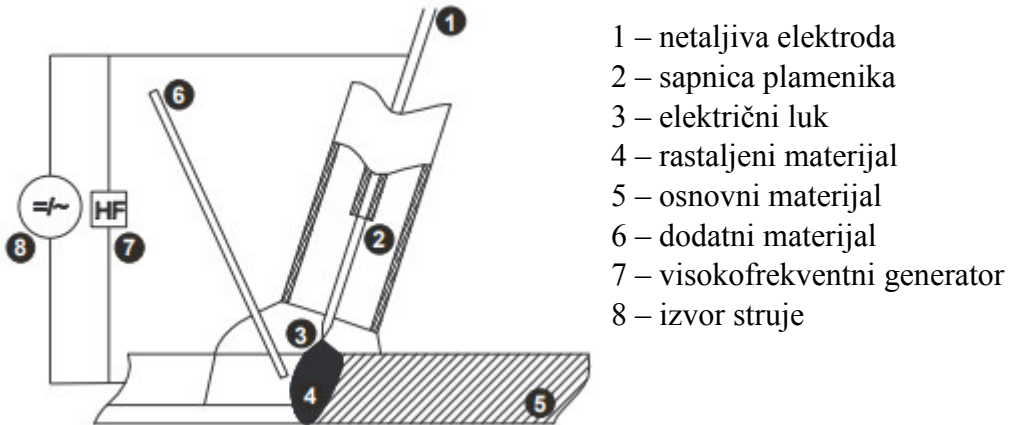
Prednosti TIG zavarivanja: [5]

- Primjenjiv za zavarivanje svih materijala
- Nema rasprkavanja kapljica
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Visoka kvaliteta zavara
- Nema troske, dima i isparavanja
- Raspon debljine zavara 1 – 6 mm (okvirno)
- Brzina dodavanja dodatnoga materijala je neovisna o energiji električnog luka
- Mogućnost automatizacije



Nedostaci TIG zavarivanja: [5]

- Neekonomičan za veće debljine ( mala količina nataljenog materijala )
- Otežan rad na otvorenom ( vjetar )
- Kvalitetna priprema spoja ( geometrija... )
- Čistoća površine
- Utjecaj ljudskog faktora ( zavarivač )



Slika 5. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [8]

## 5. UTJECAJNI FAKTORI KOD TIG ZAVARIVANJA

### 5.1. ELEKTRIČNI LUK

Električni luk kod TIG zavarivanja se uspostavlja između netaljive wolframove elektrode i osnovnog materijala. U njemu nema prijenosa kapljica metala te rasprskavanja ovih kapljica kao kod ostalih elektrodočnih postupaka pa je rezultat toga vrlo čist i kvalitetan zavar te smanjeno isparavanje i dimovi. [6]

Luk je izrazito vruć, oko 20 000 °C u točki blizu vrha elektrode ali ne u samoj elektrodi tako da se za optimalnu penetraciju i ekonomičnost razmak mora održavati što je moguće manjim. [7]

Uspostavljanje električnog luka kod TIG postupka zavarivanja se može ostvariti s i bez dodira vrha wolframove elektrode s radnim komadom u električnom luku. U pravilu se koristi uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha elektrode uz pomoć visokofrekventne električne struje.

Uspostavljanje električnog luka sa dodiranjem wolframove elektrode s radnim komadom se koristi kod uređaja za zavarivanja istosmjernom strujom. Kada elektroda dotakne radni komad zatvori se strujni krug i poteče električna struja i kada se odmakne vrh elektrode od radnog komada uspostavi se električni luk kroz ionizirani zaštitni plin.

Uspostavljanje električnog luka bez dodira wolframove elektrode s radnim komadom se više koristi za uspostavu električnog luka uz pomoć visokofrekventne struje. [6]

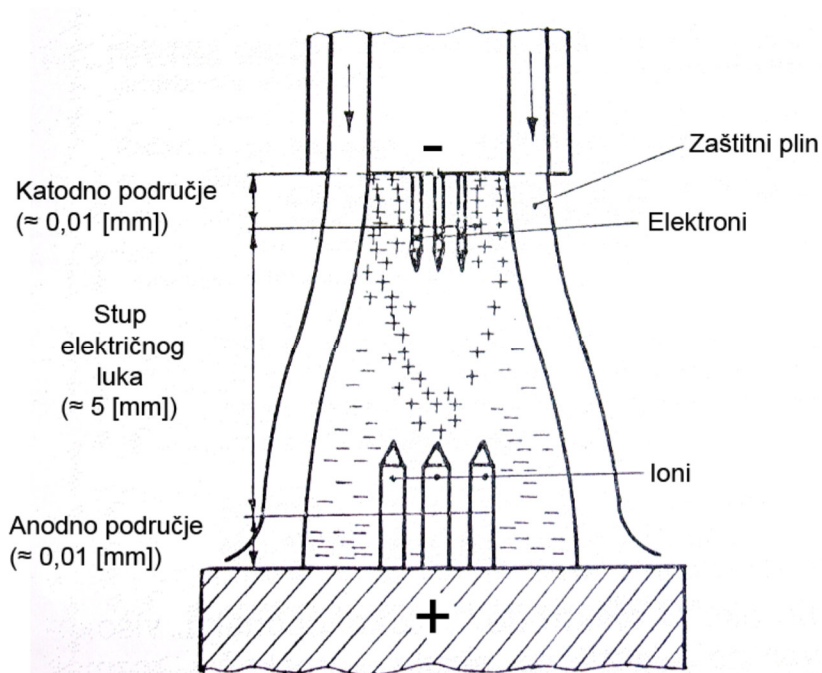


Slika 6. Uspostava električnog luka [8]



Slika 7. Električni luk [8]

Električni luk se sastoji od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus pola) malih su duljina ( $\approx 0,01$  mm), 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 električnog luka, a najčešće odgovara promjeru netaljive elektrode. [8]



Slika 8. Područja električnog luka kod TIG zavarivanja [10]

## 5.2. VRSTA STRUJE I POLARITET ELEKTRODE

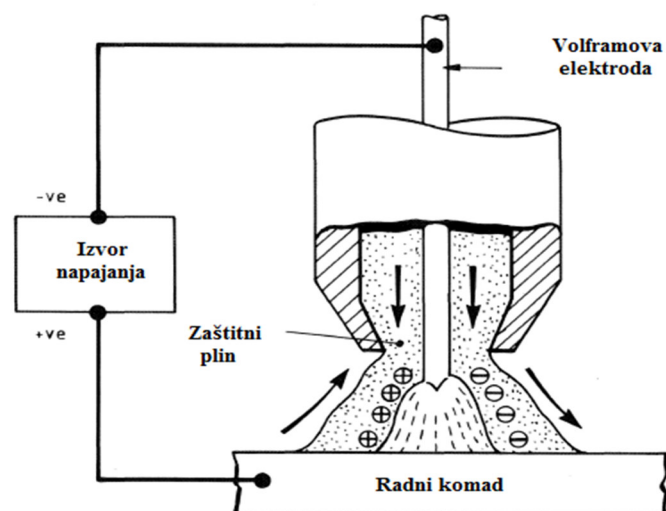
Zavarivanje wolfram elektrodom u zaštiti argona izvodi se sa izmjeničnom ili s istosmjernom strujom. Izbor struje sa kojom će se zavarivati zavisi o vrsti osnovnog materijala. Razlikujemo tri vrste: [8]

1. Istosmjerna struja, elektroda na pozitivnom polu
2. Istosmjerna struja, elektroda na negativnom polu
3. Izmjenična struja

### 5.2.1. ISTOSMJERNA STRUJA ( DC)

Istosmjerna struja pri pravoj polarnosti se koristi pri zavarivanju nehrđajućih i vatrootpornih čelika, bakra, titana, nikla i njihovih legura. Kao izvori struje koriste se transformatori, generatori ili ispravljači. Oni su svi sa strmo padajućom karakteristikom. [9]

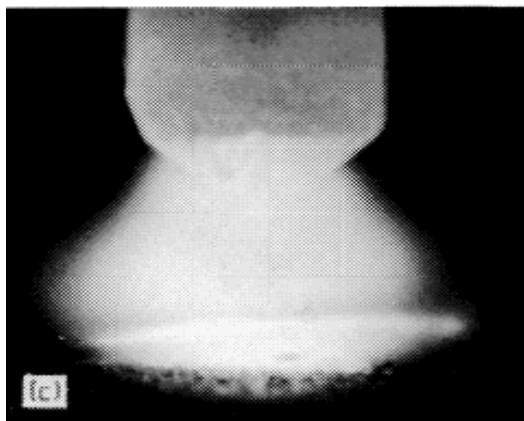
Prilikom zavarivanja istosmjernom električnom strujom elektrodom na negativnom polu elektroni teku od negativne elektrode na pozitivni radni komad, a pozitivni ioni teku prema negativnoj elektrodi, a kod zavarivanja istosmjernom strujom elektrodom na pozitivnom polu elektroni teku prema vrhu pozitivne elektrode. [10]



Slika 9. Elektroda na negativnom a radni komad na pozitivnom polu [7]

Kod zavarivanja sa istosmjernom strujom, elektroda obično ima negativni polaritet. Svojstva elektronske ionske emisije smanjuju rizik od pregrijavanja koji se inače može dogoditi s pozitivnim polaritetom elektrode. Struja tako ioniziranog plina ili plazme može postići

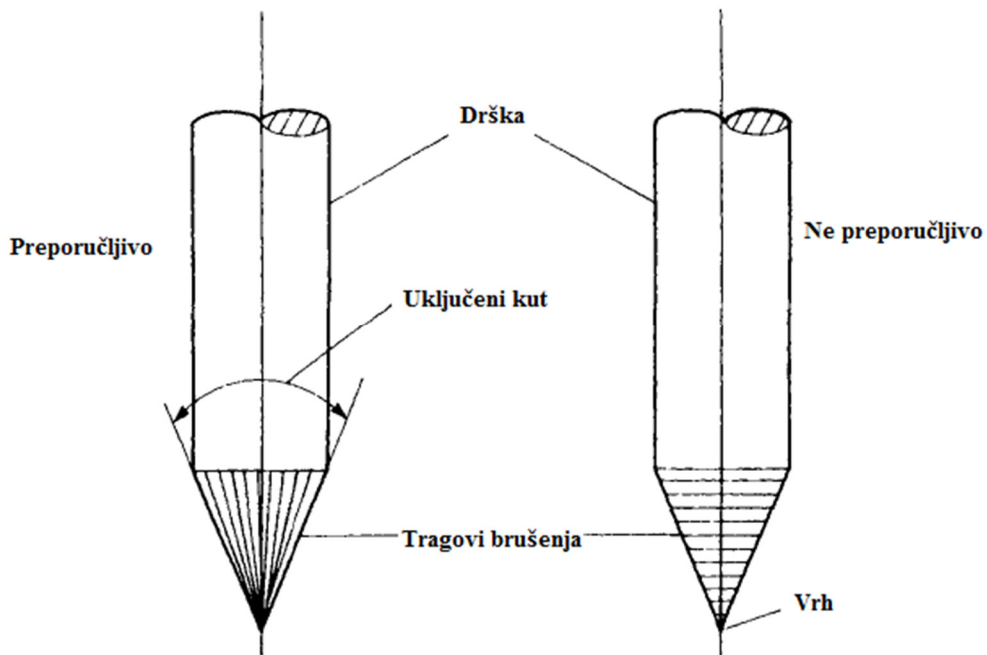
temperaturu od nekoliko tisuća stupnjeva Celzijusa, barem u središnjoj jezgri luka u blizini elektrode. Prema tome, raspon struje zavarivanja je od nekoliko ampera do nekoliko stotina ampera (odabranih prema debljini materijala) te se može izvršiti brzo taljenje. Međutim, rad postupaka s wolframovim lukom u praksi je u biti vrlo jednostavan jer je toplina potrebna za taljenje metala određena samo postavljanjem struje zavarivanja u odnosu na brzinu zavarivanja, općenito u rasponu 0,1-300A. [7]



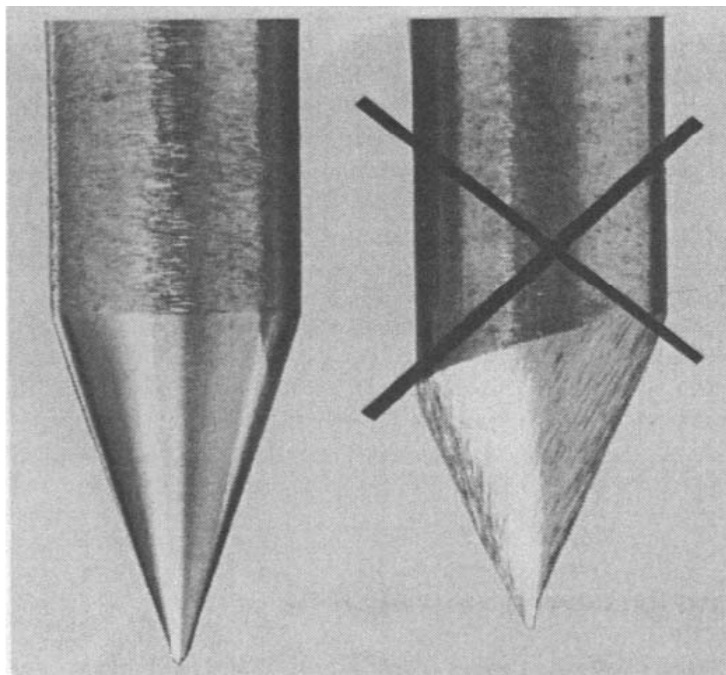
Slika 10. Karakteristični izgled el. luka kod zavarivanja sa istosmjernom strujom [7]

Elektrode za zavarivanje s istosmjernom strujom su od čistoga wolframa ili od wolframa s 1, 2 ili 4% thorium dioksidom, thorium dioksid se dodaje kako bi se poboljšala emisija elektrona koja olakšava paljenje luka. Alternativni dodaci za snižavanje funkcije rada elektrona su lantan oksid ili cerij oksid koji poboljšavaju startne karakteristike, osiguravaju izvrsnu stabilnost električnog luka, nižu potrošnju elektroda i zamjenjuju thorium dioksid koji je radioaktivan. Pri uporabi toriranih elektroda preporučuje se poduzimanje mjera opreza pri rukovanju i skladištenju te, ako je moguće, izbjegavanje kontakta s prašinom za brušenje i dim. [7]

Kod zavarivanja istosmjernom strujom mora se koristiti elektroda malog promjera, fino izbočena (približno  $30^\circ$ ) kako bi se stabilizirali lukovi niske struje na manje od 20A. Kako se struja povećava, jednako je važno podesiti promjer elektrode i kut vrha. Previše fini vrh elektrode uzrokuje prekomjerno širenje plazma struje, zbog velike gustoće struje, što može rezultirati značajnim smanjenjem omjera dubine prema širini vara. [7]



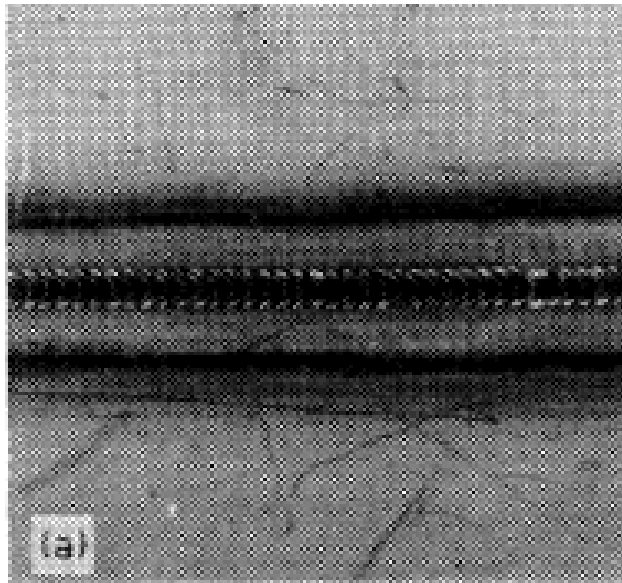
Slika 11. Preporučena koncentričnost tijela i vrha elektrode kod zavarivanja istosmjernom strujom [7]



Slika 12. Ispravni i neispravni vrh elektrode za zavarivanje istosmjernom strujom [7]

### 5.2.2. TEHNIKA PULSNE STRUJE

Osnovna značajka ove tehnike je da se primjeni puls visoke struje koji uzrokuje brzo prodiranje materijala. Ako se visoka struje održava, pojavit će se prekomjerna penetracija i naposljetku sagorijevanje. Stoga se puls prekida nakon određenog vremena, a zavaru je dopušteno da se stvrdne. Tako se zavarivanje odvija u nizu diskretnih koraka s frekvencijom impulsa usklađenom na brzinu pomaka kako bi se dobilo približno 60% preklapanja zavarenih mjesta. [7]



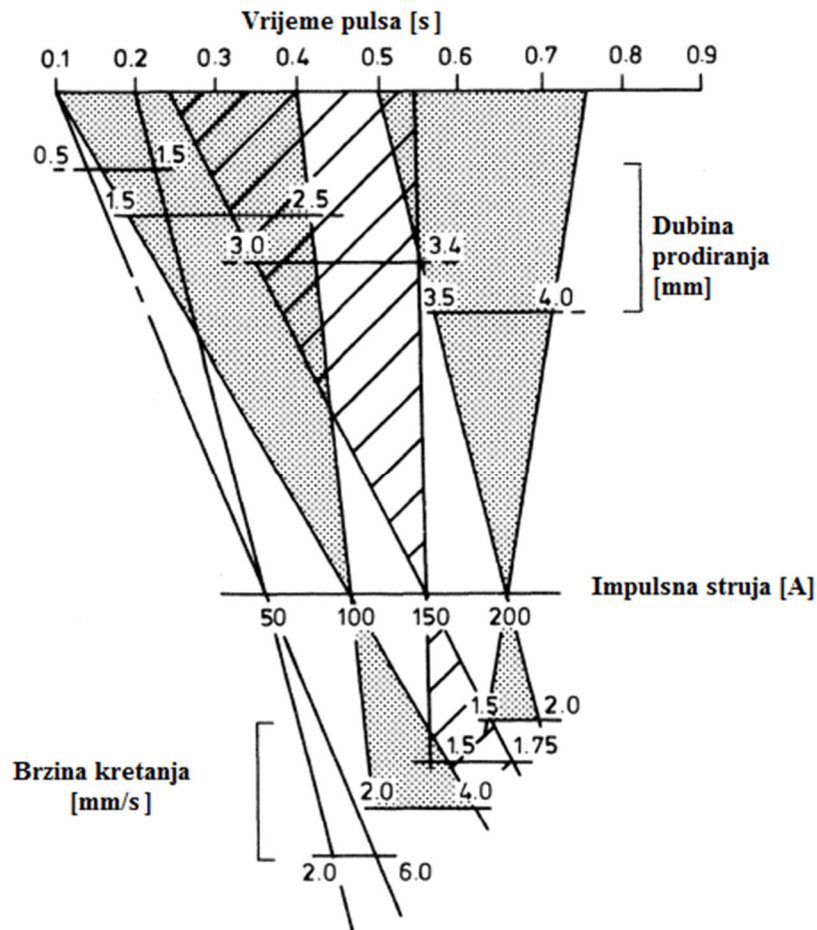
Slika 13. Preklapanje zavarenih spojeva kod pulsirajućeg TIG zavarivanja [7]

Usprkos očiglednim prednostima pulsirajućeg procesa u proizvodnji tehnika može se pojaviti kao daljnja komplikacija u tom većem broju treba uzeti u obzir parametre zavarivanja: [7]

- Vrijeme pulsa
- Razina pulsa
- Vrijeme hlađenja
- Razina hlađenja

Preferirane struje su oko 300 A za bakar, 150 A za ugljični čelik, 100 A za kupronikl ( slitina bakra i nikla ) i 50 A za olovo. Na operateru je da samo podesi vrijeme impulsa da postigne penetraciju koja je određena isključivo debljinom. Na primjer, za zavarivanje nehrđajućeg čelika debljine 2,5 mm na 100 A, zahtijeva se impuls od 4,4 sec, dok se za materijal debljine

1,5 mm vrijeme impulsa smanjuje na 0,1 sek pri istoj struji. Razina hlađenja je normalno postavljena na približno 15A, koji osigurava najveću moguću disipaciju topline u tom periodu dok je dovoljno visoka da održava stabilan luk. Razdoblje hlađenja je normalno jednako vremenu pulsa, ali može biti oko dva do tri puta veće kod zavarivanja debljih dijelova. [7]



Slika 14. Dijagram za odabir parametra kod pulsog zavarivanja [7]

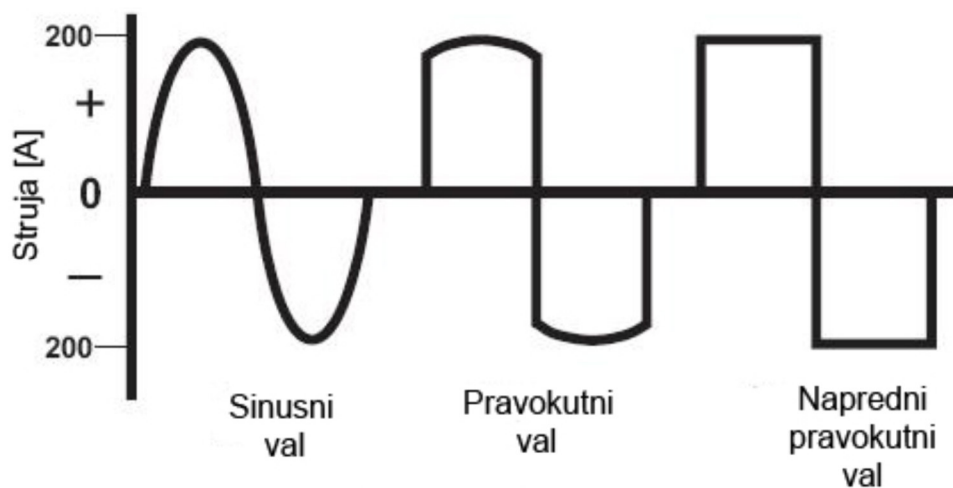
### 5.2.3. IZMJENIČNA STRUJA ( AC )

TIG zavarivanje se također provodi s izmjeničnom strujom, pri čemu polaritet elektrode titra na frekvenciji od 50 Hz, što znači da je elektroda pedeset puta u sekundi na pozitivnom polu, a isto toliko puta na negativnom polu. Tehnika se koristi za zavarivanje aluminija i magnezijeve legure, gdje su razdoblja kada je elektroda pozitivna učinkovita u katodnom čišćenju tvrdokornog oksidnog filma na površini materijala. U usporedbi s istosmjernim zavarivanjem, nedostaci tehnike leže u niskoj penetracijskoj sposobnosti luka i, kako se luk gasi pri svakoj promjeni struje. Niska penetracija rezultira posebno s tupom ili "baliranom" elektrodom koja je uzrokovana visokim stupnjem zagrijavanja tijekom pozitivnog polu-ciklusa. Tamo gdje je potrebno duboko prodiranje, alternativa je upotreba zavarivanje sa izmjeničnom strujom s



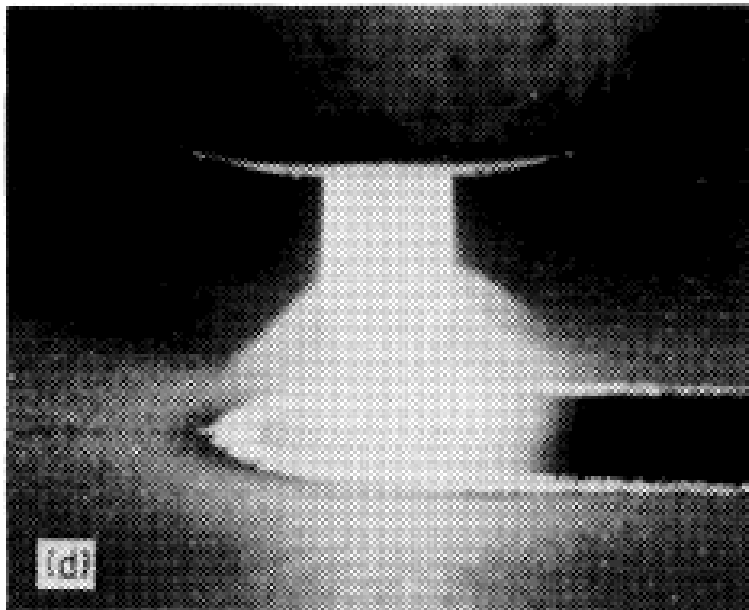
helijem kao zaštitnim plinom, koji ne pati od ovih nedostataka i donekle je tolerantan na površinski oksid. Upotreba helija, međutim, nije osobito atraktivna zbog svoje visoke cijene. [7]

Nedavno je dostupna nova generacija izvora izmjenične struje; njihova glavna značajka je da izlazna struja pretpostavlja kvadratni valni oblik u usporedbi s konvencionalnim sinusnim valom. Dostupne su dvije vrste izvora energije, koje se razlikuju u načinu na koji se proizvodi kvadratni valni oblik. Dok je "kvadrirani" sinusni valni oblik generiran pomoću invertiranog AC-a, istinski kvadratni valni oblik se proizvodi pomoću uključenog DC napajanja. U oba slučaja značajka TIG zavarivanja je da se struja drži relativno visoko, a zatim se brzo prenosi u suprotni polaritet. [7]



Slika 15. Vrste valova izmjenične struje [10]

Dodatna značajka izmjeničnog izvora energije kvadratnog vala je kapacitet za neravnotežu strujnog valnog oblika, tj. variranje udjela elektrode pozitivnog pola na negativni polar elektrode. U praksi se postotak pozitivnog polariteta elektrode može mijenjati od 30-70% pri fiksnom ponavljanju na frekvenciji od 50 Hz. [7]



Slika 16. Karakterističan izgled izmjeničnog el. luka koji pokazuje katodno čišćenje površine [7]

### 5.3. ZAŠTITNI PLINOVI

Zadatak zaštitnog plina je da osigura ionizaciju između elektrode i radnog komada, te da štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Određivanje protoka zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti metala koji se zavaruje, vrsti zaštitnog plina, položaju zavarivanja i obliku spoja. Protok plina treba biti optimalni jer premala količina plina ne može istjerati sav zrak s mjesta zavarivanja. Preveliki protok plina osim što je neekonomičan, štetan je jer uzrokuje vrtloženje plina što smanjuje zaštitu taline jer dolazi do uvlačenja zraka u takav (turbulentan) proces. [6]

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Važno je za naglasiti da zaštitni plin direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. [8]

Ovi tekući plinovi se drže na vrlo niskim temperaturama, u slučaju argona na  $-180^{\circ}\text{C}$ , tako da je položaj velikih kriogenih spremnika kritičan. [11]

<b>Karakteristika</b>	<b>Ar</b>	<b>Mješavina Ar/He</b>	<b>He</b>
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
Oblik 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

Slika 17. Karakteristika TIG zavarivanja u zaštiti argona i helija [12]

### 5.3.1. ARGON

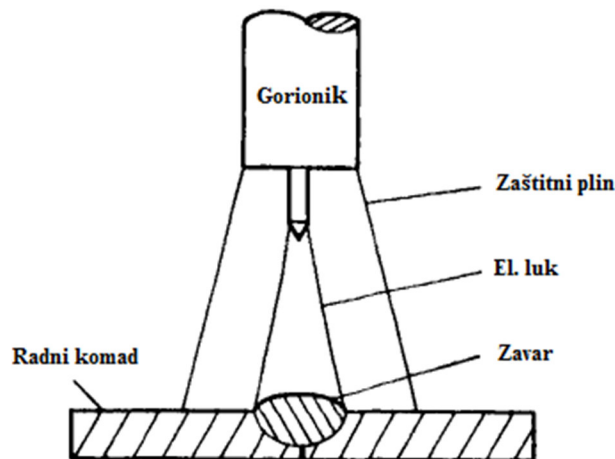
To je najčešći i najekonomičniji plin koji se koristi u TIG zavarivanju i dobiva se kao nusproizvod kada se zrak ukapljuje kako bi se proizveo kisik; argon koji je prisutan u zraku je oko 0,9%. Prednosti argona su niski ionizacijski potencijal i toplinska vodljivost. Također, budući da je oko 1,5 puta gušći od zraka, održava dobru pokrivenost pokrivača na luku nego helij. [11]

Argon se koristi kod zavarivanja čelika, nehrđajućih čelika, aluminijskog i titana. [8]

Ionizacijski potencijal argona je oko 15,5 elektron volta. Ovo je napon potreban za uklanjanje elektrona iz stabilnog atoma i pretvaranje u naelektrični atom ili pozitivni ion, pri čemu se plin u području luka pretvara u plazmu. Ostatak zaštitnog plina oko luka isključuje aktivne komponente okolnog zraka i sprečava, ili barem minimizira oksidaciju metala.

Argon daje visoku gustoću energije luka, tj. Visoku koncentraciju energije unutar područja luka. To omogućuje proizvodnju uskih šavova i može se dobiti s čistoćom većom od 99,90%, što je bitno za zavarivanje. [11]

Dostupan je niz argonskih mješavina u kombinaciji s dodavanjem vodika između 1 - 5%. Ovi plinovi koncentriraju luk i mogu povećati brzinu zavarivanja, ali se češće koriste za bolji izgled završenog zavarivanja. Vodik se klasificira kao redukcijski plin. Treba napomenuti da uključivanje vodika može dovesti do poroznosti zavora, tako da je pravilo ovdje da se koristi najniži omjer vodika u argonu u skladu s dobrim zavarivanjem i za čvrstoću i izgled. [7]



Slika 18. Električni luk u argonu [11]

### 5.3.2. HELIJ

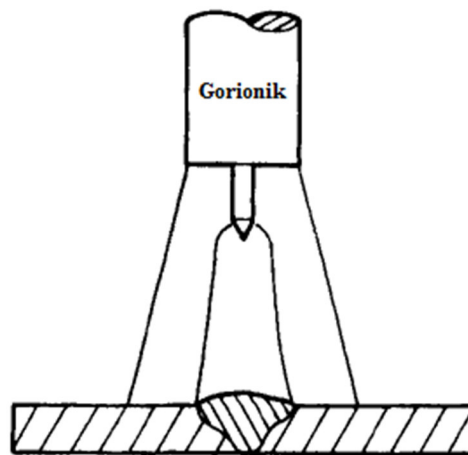
Helij je idealan zaštitni plin, ali skuplji i stoga nije toliko široko korišten posebno za ručno zavarivanje. Njegov ionizacijski potencijal je 24,5 elektron volta, s izvrsnom toplinskom provodljivošću daje dublju penetraciju nego argon za danu strujnu i lučnu prazninu.

Kod ekvivalentne duljine luka, helij ima veći napon luka od argona. Odnos (amperi • volti • vrijeme = džuli) pokazuje da povećanje napona luka znatno povećava unos topline u zavarivanje, tako da će helij ili smjese argona i helija postići željeni rezultat pri obradi debelih metala. Međutim, dužine luka moraju se držati vrlo blizu toleranciji kada se koristi helij, a to znači da je prikladnije za strojno zavarivanje, a rijetko se koristi za ručno zavarivanje, osim ako to radi visoko kvalificirani djelatnik.

Drugi nedostaci helija su potreba za visokim protocima, s pratećim povećanjima troškova i činjenice da može spriječiti udaranje luka pri niskim strujama. Iznad 150 A ima neke prednosti za deblje metale.

Smjese helija / argona dostupne su s postotkom argona u rasponu od 50-75%. Oni su idealni za većinu metala i legura, osobito bakra i aluminijska. Kada se koristi u automatskom sustavu za zavarivanje, helij može, u nekim okolnostima, u cijelosti spriječiti otvoreni luk i gotovo sigurno će imati negativan učinak na pulsiranje luka.

Ako je apsolutno neophodno koristiti čisti helij, rješenje bi moglo biti prvo da se uspostavi luk u argonu visoke čistoće, a zatim da se brzo uspostavi helij kada se uspostavi luk. [7]



Slika 19. Električni luk u heliju [11]

### 5.3.3. MJEŠAVINA ARGONA I VODIKA ( 2 – 5 % )

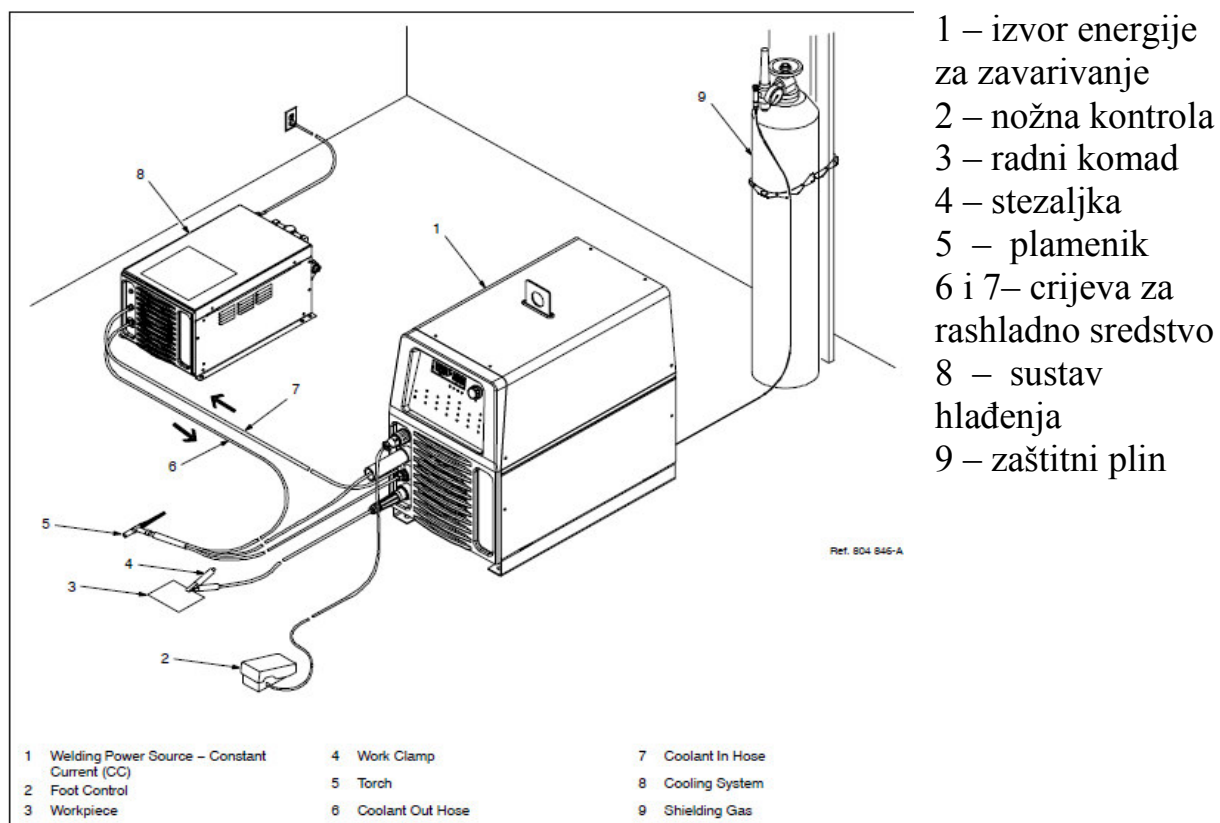
Ova mješavina stvara reducirajući efekt, tvori izgled zavara. Prednosti su da nema površinske oksidacije te da je električni luk uži i ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Nedostaci su da postoji opasnost od pojave vodikom uzrokovanih pukotina te poroznost kod aluminijska. [7]

### 5.3.4. MJEŠAVINA ARGONA I HELIJA ( DO 50 % )

Helij utječe na povećanje energije električnog luka što omogućava više brzine i bolju penetraciju. Nedostaci su visoka cijena i poteškoće kod uspostavljanja električnog luka. [7]

## 6. OPREMA ZA TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Osnovna opremu za sve TIG postupke zavarivanja čini: izvor energije, ručno ili strojno upravljani pištolj ( plamenik ), inertni plin dovođen iz cilindra ili boce pod nekim tlakom te kablovi odgovarajuće veličine za provođenje struje zavarivanja od izvora napajanja do pištolja. [11]

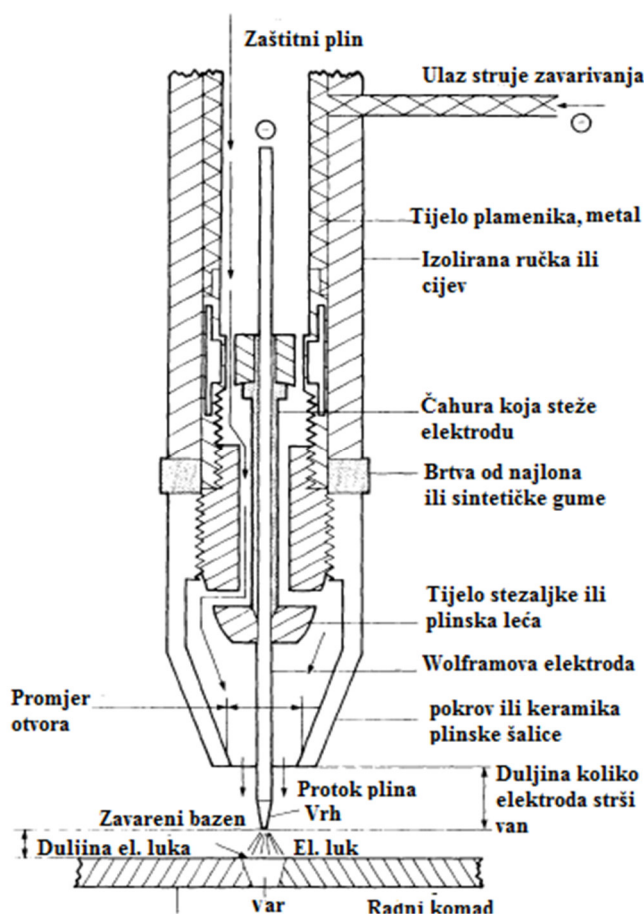


Slika 20. Osnovna oprema kod TIG zavarivanja [13]

### 6.1. PIŠTOLJ ( PLAMENIK )

Ovdje imamo jednostavnu podjelu jer postoje dvije osnovne vrste a to su ruka i stroj.

Pištolj nosi netaljivu volframovu elektrodu u podesivom steznom uređaju i može biti opremljen raznim keramičkim mlaznicama za usmjeravanje protoka plina u područje luka. Od samog početka komercijalnog TIG procesa došlo je do malih promjena u dizajnu pištolja, osim što je uvođenje moderne plastike i sintetičkih guma manje težine omogućilo da se pištolji učine manjim, lakšim i lakšim za rukovanje.



Slika 21. Dijelovi pištolja [11]

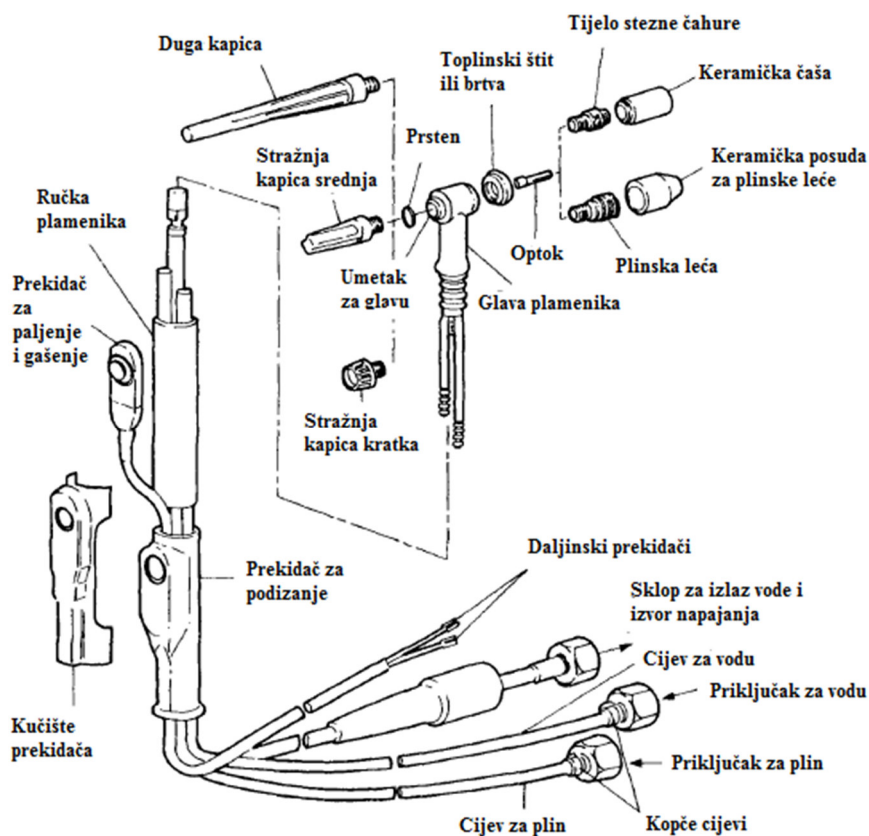
Ručno TIG zavarivanje zahtijeva postojanu ruku, tako da je lagani pištolj velika prednost. Međutim, pištolj bi uvijek trebao biti odabran s obzirom na kapacitet.

Upotrebljujući pištolj koji će nositi maksimalnu struju zavarivanja koja će vjerojatno biti potrebna, zavarivaču će pružiti pomoć i osigurati da sklop mlaznice i elektrode omogući potpuni pristup području koje se zavaruje.

Dostupna je iznimno velika raznolikost keramičkih šalice za plin i to je često početnicima je teško odlučiti što je najbolje za određeni posao. Keramika se razvrstava prema veličini otvora i grubo pravilo vođenja bi bilo da se za manju elektrodu i niži protok plina uzima šalice sa manjim otvorom. Brzina protoka plina ovisi o vrsti plina i promjeru otvora čašice.

Protok zaštitnog plina kroz gorionik ima neki učinak hlađenja koji je dovoljan za niske brzine zavarivanja. Međutim, iz ekonomskih razloga bolje je da se protok plina održava na minimumu, ali se tada smanjuje učinak hlađenja. To znači da bi se pištolj mogao zagrijati tijekom neprekidne upotrebe i trebati vodeno hlađenje. Pištolji za struje veće od 125 A općenito su dostupni sa hlađenjem plinom ili vodom. [11]

U nekim slučajevima voda je usmjerena u i iz plamenika odvojenim cijevima, ali nije neuobičajeno da se voda za hlađenje koncentrično odvodi od plamenika preko strujnog ulaznog kabela, koji također hladi kabel. Protok rashladne vode samo treba biti prilično mali (oko 1,5 l / min), a zbog ekonomičnosti najbolje je da su vodeni hladnjaci recirkulacijskog tipa. [7]



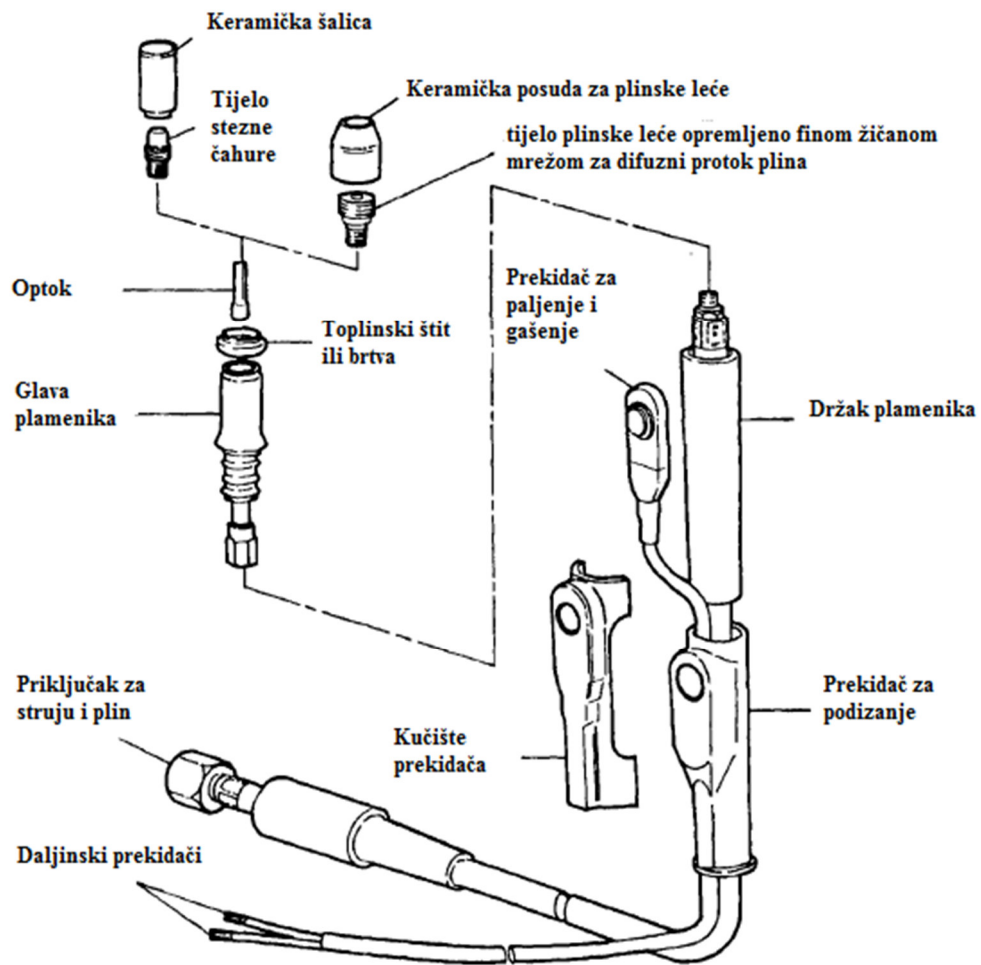
Slika 22. Vodohlađeni plamenik [7]

Proizvođači su uložili mnogo truda kako bi osigurali da se plamenicima lako rukuje i da se različiti sastavni dijelovi lako zamjenjuju. Na većini keramičke mlaznice mogu se mijenjati u roku od nekoliko sekundi i ne bi trebalo trajati mnogo dulje za promjenu volframove elektrode. Metalni sastavni dijelovi kvalitetnoga plamenika trebaju uvijek biti izrađeni su od bakra ili kvalitetnog mesinga niskog otpora. [7]

Prilikom odabira TIG plamenika uvijek se moramo pitati:

- Ima li plamenik dovoljan kapacitet za maksimalnu struju kojom će se zavarivati
- Je li ugodno za zavarivača koji ručno zavaruje
- Je li pogodan za zavarivanje tamo gdje je pristup nezgodan ili ograničen?
- Je li metoda hlađenja prikladna za potrebnu proizvodnju?





Slika 23. Plinom hlađen plamenik [7]

Protok struje u pištolju koji se koristi u ručnom zavarivanju obično se kontrolira prekidačem papučice, ostavljajući jednu ruku slobodnu za nanošenje žice ili malim gumbom na samom pištolju koji uključuje i isključuje struju zavarivanja.

Dostupni su i neki pištolji koji imaju fleksibilan vrat. Oni su korisni tamo gdje je pristup zavarivanju vrlo težak. [7]



Slika 24. Suvremeni pištolj za TIG zavarivanje „Lincoln“ [14]

TIG svjetiljke su prilično robusne, ali ih treba održavati čistima. Sve spojeve pištolja, tj. Struju za zavarivanje, zaštitni plin i vodu za hlađenje, treba držati zategnute. Opuštena strujna veza unutar pištolja može uzrokovati unutarnje iskrenje s naknadnim pregrijavanjem i nije poželjno curenje plina i vode.

S pažnjom svjetiljka može dugo trajati i pružati dobru uslugu tijekom cijelog radnog vijeka. [11]

## 6.2. ELEKTRODE

Elektrode za TIG zavarivanje su posljednja karika u lancu između izvora napajanja i vara i zato su kritične za cijeli proces. One se klasificiraju kao nepotrošive, što nije točno. Istina je, međutim, da oni trebaju trajati što je duže moguće iz ekonomskih razloga, da moraju nositi najveću potrebnu struju zavarivanja i da se ne smiju raspadati na vrhu dok se zavaruju, čime se zagađuje sami var.

Elektrode za TIG zavarivanje gotovo su u potpunosti izrađene od wolframa (koji ima temperaturu taljenja od 3370 °C i vrije na 6135 °C. Općenito se mogu dobiti u obliku okruglog štapića dužine oko 150 mm i u različitim promjerima počevši od oko 0,25 mm do 6 mm. Mogu se dobiti i veći promjeri ako je porebno. [7]

	Promjer [mm]	Elektroda negativna		Elektroda pozitivna		Popularna veličina
		Kapacitet [A]	Kapacitet [A]	Kapacitet [A]	Kapacitet [A]	
	0.010	0.25	up to 5	N/A		
	0.020	0.5	up to 15	N/A		✓
3/64	0.040	1.0	15-50	up to 20		✓
1/16	0.064	1.6	50-100	20-50		✓
3/32	0.080	2.0	50-150	50-100		✓
	0.096	2.4	50-200	50-150		
1/8	0.128	3.2	200-300	150-200		✓
3/16	0.180	4.8	250-400	200-300		✓
1/4	0.250	6.4	400-600	300-400		✓

Slika 25. Odabir veličine elektrode za određeni raspon struje [7]

Razvojem TIG zavarivanja i izvora struje za zavarivanje dolazilo je i do većih zahtjeva u pogledu uspostave i stabilnosti električnog luka pa se danas upotrebljavaju elektrode koje nisu od čistog volframa, već se legiraju kako bi se poboljšale njezine radne karakteristike. [8]

Tip elektrode	Oznaka (boja)	Primjena i karakteristike
W	ZELENA	dobra stabilnost luka kod AC zavarivanja, otporna na onečišćenja, niža cijena
dodatak oksida 1,8-2,2 % CeO <sub>2</sub>	SIVA	karakteristike slične kao i kod elektroda sa torijevim oksidom, laka uspostava luka, duži vijek trajanja
dodatak oksida 1,7-2,2 % ThO <sub>2</sub>	CRVENA ŽUTA LJUBIČASTA NARANČASTA	laka uspostava luka, veća stabilnost luka, podnosi veće opterećenje, duži vijek trajanja, otežana stabilnost luka kod oblog oblikovanja na AC strujama
dodatak oksida 1,3-1,7 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZLATNA CRNA PLAVA	vrlo slične karakteristike kao kod elektroda s torijevim oksidom
dodatak oksida 0,15-0,40 % ZrO <sub>2</sub>	SMEĐA	izvršne karakteristike kod AC zavarivanja i zaobljenog vrha elektrode, visoka otpornost na onečišćenja, laka uspostava električnog luka, prikladno kod zahtjeva gdje nije dozvoljeno prisutstvo volframa u zavaru

Slika 26. Tipovi elektroda i njihove karakteristike [8]

Osim pravilnog izbora legirane elektrode, jednako je važna i priprema iste. Priprema se sastoji od zaobljena ili zašiljenja vrha prilikom čega valja imati na umu da geometrija netaljive elektrode direktno utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja Al, Mg i legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljatu geometriju vrha elektrode.

Elektrode su označene bojom, a DIN standard je dodijelio kodiranu boju. Međutim, neke boje, osobito narančasta i roza i crvena često su teške za razlikovati jednu od druge, stoga treba biti vrlo oprezni kada se mora odabrati određeni tip. [11]

## 6.3. KABLOVI

### 6.3.1. KABLOVI ZA PIŠTOLJ

Kompozitni strujni kabeli često su najneugodniji dio kod TIG zavarivanja često zbog kvara priključaka dopuštajući propuštanje vode ili uvođenje zraka u zaštitni plin.

Za plinske hladene pištolje postoje dva tipa kabela, prvi dvodjelni tip koji koristi izolirani kabel za zavarivanje za prijenos struje i zasebno crijevo za zaštitni plin. Glavna prednost ovog sustava je u tome što je lako popravljivo i dugi vijek trajanja. Gubitak je fleksibilnost i relativno visoka cijena. Najbolja opcija je uporaba kabla s ugrađenim bakrenim vodičem unutar veće cijevi kroz koje prolazi zaštitni plin. Prednost u tome je što crijevo djeluje kao izolator za bakrene niti uz istovremeno opskrbljivanje zaštitnim plinom, a fleksibilnost se znatno poboljšava iako se gubi lakoća održavanja. Takvi tipovi kablova se prodaju u tri osnovna oblika: PVC crijevo, ojačana PVC crijeva i gusto crijevo od gume. Gumeno crijevo je daleko superiorniji materijal kombinirajući izvrsnu fleksibilnost s nenadmašnom otpornošću na toplinu.

S vodenim hlađenim pištoljima konstrukcija strujnih kabela obično je jednog tipa. U njima kabel djeluje kao odvodna cijev za rashladnu vodu. Posljedica toga je dvostruka; nema toplinskog starenja crijeva, a površina poprečnog presjeka bakrenih niti u kabelu može se smanjiti zbog hlađenja vodom. Smanjenje težine je također prednost kada se koriste vodeno hlađeni pištolji u usporedbi s plinskim hladnjacima s sličnim učinkom koji zahtijevaju mnogo teži kabel. Ponovno korištenje gumenog crijeva je od koristi fleksibilnosti i životnom vijeku pištolja. [11]

## 6.4. IZVOR NAPAJANJA

Izvor energije je srce svih sustava za zavarivanje; pouzdanost, točnost i dugi vijek trajanja je poželjna karakteristika koja određuje izbor. Izvor napajanja mora pretvarati električnu mrežu, sa svojim varijacijama, u što stabilniju zavarivačku struju. To čini pomoću transformatora za smanjenje mrežnog napona i proporcionalno povećanje struje preko sekundarnih namotaja i pretvara to u zavarivačku struju. [7]

Radni ciklus mjeri se na temelju toga koliko dugo se maksimalna struja može koristiti u određenom razdoblju, bez da dođe do pregrijavanja ili unutarnjeg oštećenja. Općenito se smatra da postoje četiri glavna osnovna tipa: [7]

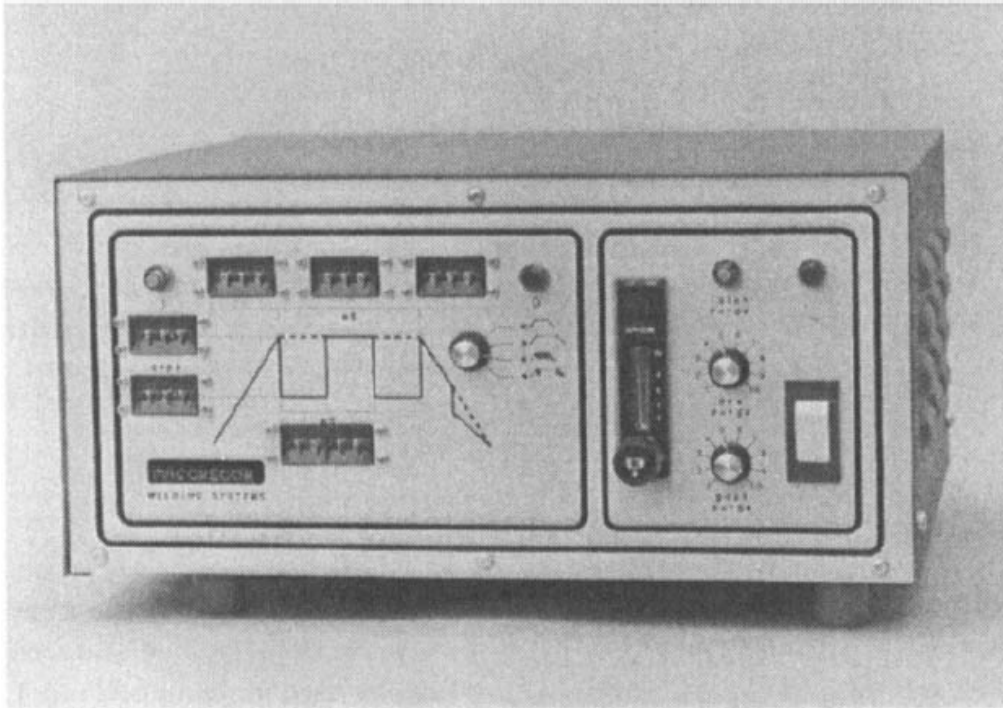
- Tip 1 - tranzistor s regulatorom izvora napajanja - istosmjerna struja
- Tip 2 - komutirani tranzistorski izvor napajanja - istosmjerna struja
- Tip 3 - tiristorski izvor napajanja ( SCR ) - istosmjerna i izmjenična struja
- Tip 4 – izmjenični ispravljač i inverterski izvori napajanja – izmjenična i istosmjerna struja

### 6.4.1. TIP 1 - TRANZISTORI S REGULATOROM IZVORA NAPAJANJA – ISTOSMJERNA STRUJA

Oni koriste energetske tranzistore za regulaciju struje, s analognim upravljanjem iz niskog strujnog signala. Oni su slabi u učinkovitosti, ali daju točnu i vrlo stabilnu kontrolu struje zavarivanja i osiguravaju pulsiranje s različitim valnim oblicima i frekvencijom. [7]

### 6.4.2. TIP 2 – KOMUTIRANI TRANZISTORSKI IZVOR NAPAJANJA – ISTOSMJERNA STRUJA

Koristeći energetske tranzistore s HF prekidačem istosmjernog napajanja, ti izvori napajanja daju slične strujne kontrolne karakteristike kao i izvori tipa 1, ali su električki učinkovitiji, ali daju manji raspon pulsirajuće frekvencije i valnih oblika. To su precizne, stabilne, tranzistorizirane jedinice i koriste se za posebnu i automatsku uporabu kada su potrebni iznimno stabilni i dosljedni lukovi. Oni su sveobuhvatno specificirani i mogu biti vrlo skupi. Oni se kreću u rasponu od 0,1 A do najviše 100 do 150 A. [7]



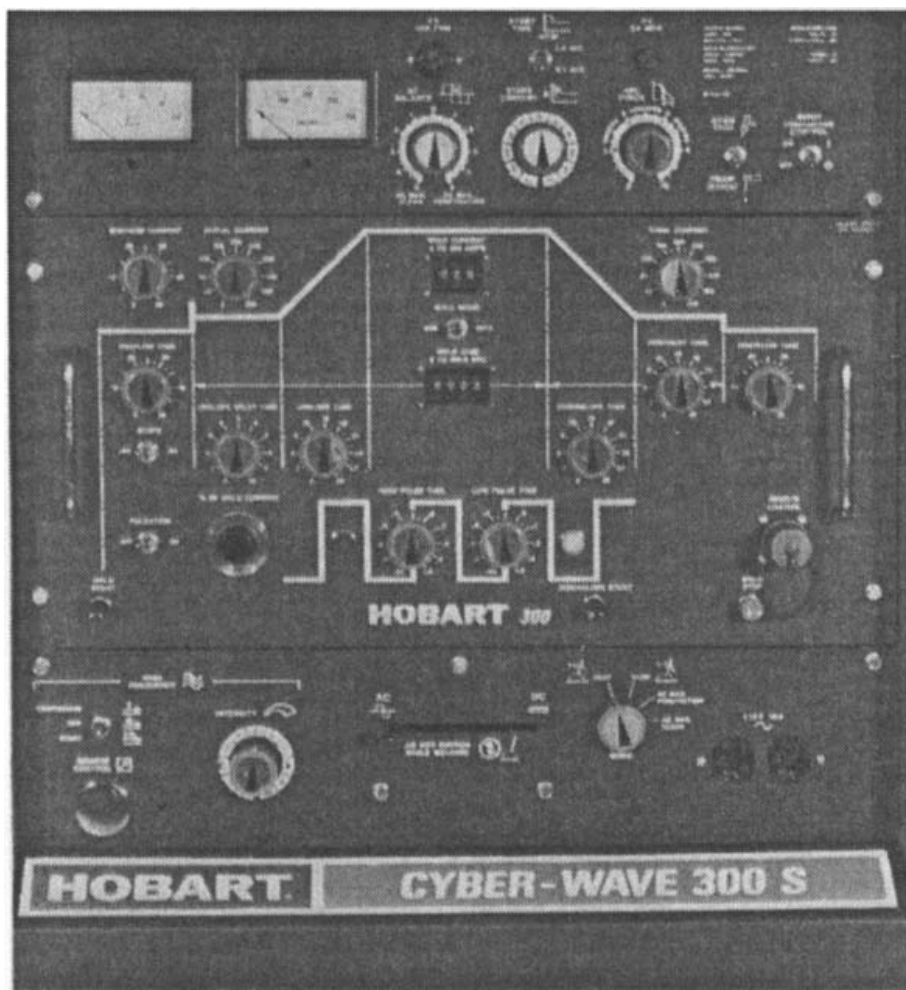
Slika 27. izvor napajanja preciznog TIG zavarivanja tipa 2 [7]

Značajke izvora napajanja tipa 2 su: [7]

- stabilizacija mrežne i izlazne struje
- računalno prihvatljivost
- kontrole protoka i vremena nakon čišćenja
- tajmer zavarivanja točan do 0,1 sec
- trenutno povišenje i smanjivanje vremenske kontrole

#### 6.4.3. TIP 3 – TIRISTORSKI IZVORI NAPAJANJA ( SCR ) - – ISTOSMJERNA I IZMJENIČNA STRUJA

Vrlo napredna elektronika koja koristi tiristore umjesto dioda na izlaznoj strani transformatora. Ovi izvori napajanja daju izvrsnu točnost struje i vremena zavarivanja, kvadratne izmjenične oblike valova, i mogu se koristiti u pulsnom modu, iako s ograničenom frekvencijom. U ovu kategoriju spadaju i mnogi izvrsni izvori energije te se neki mogu naknadno opremiti pulsirajućim i vremenskim kontrolama. Idealni su za opću i poslovnu uporabu. [7]



Slika 28. Izvor napajanja TIG/MIG/MAG 300 A tipa 3 [7]

#### 6.4.4. TIP 4 – IZMJENIČNI ISPRAVLJAČ I INVERTERSKI IZVORI NAPAJANJA – ISTOSMJERNA I IZMJENIČNA STRUJA

Visokokvalitetne jedinice koje se uglavnom koriste za ručno istosmjerno/izmjenično zavarivanje. Također prikladni za ugradnju u mehanizirane, robotske i poluautomatske stanice za zavarivanje za zavarivanje srednje visoke kvalitete. Raspon do najviše oko 450 A, stabilan luk do 8- 10 A. Posebno prikladni za zavarivanje aluminija i njegovih legura. [7]

Značajke izvora tipa napajanja tipa 4: [7]

- Upravljanje protokom plina
- Daljinsko prebacivanje luka
- Mjerenje i kontrola trenutne razine zavarivanja
- Mogućnost prebacivanja iz TIG u MIG / MAG zavarivanje

## 6.5. ZAVARLJIVOST KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA

Temperatura metala tijekom zavarivanja može biti u rasponu od temperature rastaljenog metala pa sve do neoštećenog metala. Mikrostruktura i mehanička svojstva dijela grijaćeg čelika mijenjaju se kao rezultat zavarivanja. Takve promjene ovisit će o sastavu čelika i brzini grijanja i hlađenja čelika. Količina nastalog martenzita i tvrdoća čelika ovise o sadržaju ugljika, kao i o brzini grijanja i hlađenja. Konstrukcijski čelik lako je otporan na sve procese, jer ima malu tvrdoću. Ako čelik ne može osloboditi napetosti nastala prilikom zavarivanja martenzitna transformacija i rezultirajuća visoka tvrdoća mogu dovesti do pucanja u varu ili u zoni zahvaćenoj toplinom. Stupanj otvrdnjavanja u zoni utjecaja topline važan je čimbenik koji određuje zavarljivost konstrukcijskog čelika. [4]

### 6.5.1. PUKOTINE U VARU

Metal zavarivanja obično ima manje problema s pucanjem izazvanim vodikom. To je vjerojatno rezultat opće upotrebe metala za punjenje s nižim sadržajem ugljika. Međutim, vodik može u značajnoj mjeri oštetiti var. Jedan oblik pucanja izazvanog vodikom, koji se pojavljuje u varu, pojavljuje se kao male svijetle točke na lomljenim površinama razbijenih uzoraka vara. Uvjeti koji dovode do stvaranja pukotina u varu mogu se minimizirati zagrijavanjem zavarenog spoja tijekom određenog razdoblja na temperaturi od 90 °C do 700 °C. [4]



slika 29. Pukotina u varu [4]



## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni rad se radio sukladno normi ISO 15614-1 (Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale –Specifikacija postupka zavarivanja –1. dio: Elektrolučno zavarivanje). U eksperimentalnom dijelu je provedeno TIG navarivanje čeličnog konstrukcijskog lima 1.0330 (DC01) debljine 3 mm istosmjernom strujom. Specifikacija osnovnoga materijala prikaza je u tablici 2. i u tablici 3. Uspoređujući mikrostrukturu osnovnog materijala sa slikama iz metalografskog atlasa može se reći da se struktura feritno perlitna.

Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm <sup>2</sup> ]	220
Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	320
Istezanje AS [%]	28

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika DC01

Kemijski element	Udio kemijskog elemenata [%]
C	0,12
P	0,045
Mn	0,6
S	0,045

Tablica 3. Kemijski sastav čelika DC01

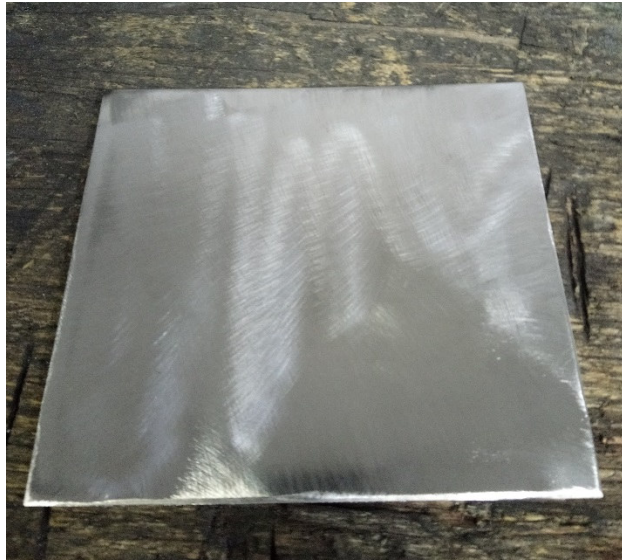
### 7.1. NAVARIVANJE PLOČA

Postupak navarivanja se izvodio TIG aparatom Fronius magic wave 2000.



Slika 30. TIG aparat Fronius magic wave 2000

Pločice su se prije navarivanja očistile od nečistoća i masnoća. Dijelovi TIG aparata su se provjerili kao što se i provjerila zaštitna oprema kao što su rukavice, maska za zavarivanje itd.



Slika 31. Očišćena pločica konstrukcijskog čelika 1.0330

Prilikom navarivanja koristila se sapnica broj 7, elektroda promjera 1,6 mm crvene oznake te dodatni materijal oznake 15125 ( ZESG2).

Promjer žice [mm]	1,6
Granica razvlačenja [N/mm <sup>2</sup> ]	>490
Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	580
Istezanje [%]	30
Udarni rad loma [J]	130

Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala ZESG2

Kemijski element	Udio kemijskog elemenata [%]
C	0,07
Si	0,82
Mn	1,52
P	≤0,012
S	≤0,015

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala ZESG2

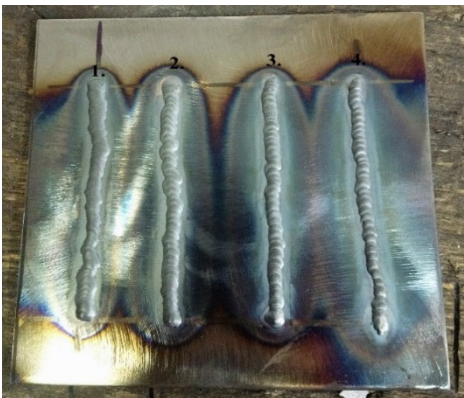


Slika 32. Dijelovi pištolja koji su se koristili u TIG navarivanju

Postupak navarivanja je proveden na dvije ploče debljine 3 mm te su na svakoj ploči navareni 4 navara. Prilikom navarivanja parametar koji se mjenjao je bila struja dok se ostali parametri nisu mjenjali.

### 7.1.1. PLOČA BROJ 1

Kod navarivanja kod ploče broj 1 duljine navara su bile 8 cm. Navarivanje se provodilo sa strujama od 140 A, 120 A, 100 A i 80 A. Nakon svakog prolaza navara ploča je bila ohlađena zrakom te je nakon hlađenja svaki navar označen sa flomasterom.




Broj navara	I (A)	U (V)	$V_z$ (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
1.	140	15	16	10	Argon
2.	120	14,8	16	10	Argon
3.	100	14,7	16	10	Argon
4.	80	14,5	16	10	Argon

Tablica 6. Ploča broj 1, parametri TIG zavarivanja

## PLOČA BROJ 2

Kod navarivanja ploče broj 2 duljina navara je također bila 8 cm i navarilo se 4 navara sa istim strujama od 140 A, 120 A, 100 A i 80 A. Brzina navarivanja nije bila 16 cm/min nego 11 cm/min. Ploča je također bila hladena zrakom nakon svakog prolaza navara te je svaki navar bio označen flomasterom.

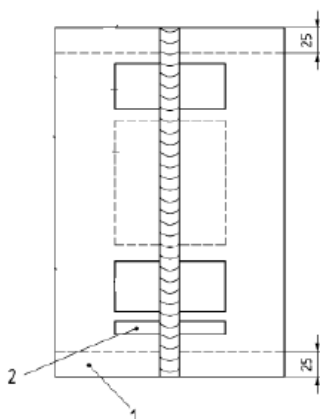


Broj navara	I (A)	U (V)	$V_z$ (cm/min)	Q (l/min)	Vrsta plina
5.	140	14	11	10	Argon
6.	120	13,8	11	10	Argon
7.	100	13,6	11	10	Argon
8.	80	13,4	11	10	Argon

Tablica 7. Ploča broj 2 parametri TIG zavarivanja

## 7.2. PRIPREMA UZORAKA

Sljedeća slika pokazuje lokaciju testnih uzoraka prema normi HRN EN ISO 15614-1. Područje 1 prikazuje dio koji se treba odbaciti a područje 2 je dio koji se uzima za makroskopsko ispitivanje.



Slika 33. Lokacija testnih uzoraka prema normi [14]

### 7.2.1. REZANJE UZORAKA

Uzorci su rezani na rezaču. Nakon rezanja uzoraka srh i troska koji su nastali kod rezanja na rubovima trebali su se izbrusiti. Kada su se maknuli srh i troska poravnali su se vrhovi koji nisu bili ravni.

### 7.2.2. BRUŠENJE UZORAKA

Sljedeći korak je bio brušenje i poliranje površine koje su bile namjenjene za gledanje na mikroskopu. Brušenje se vršilo na aparatu za brušenje i poliranje marke Buehler Gridrer/Polisher.

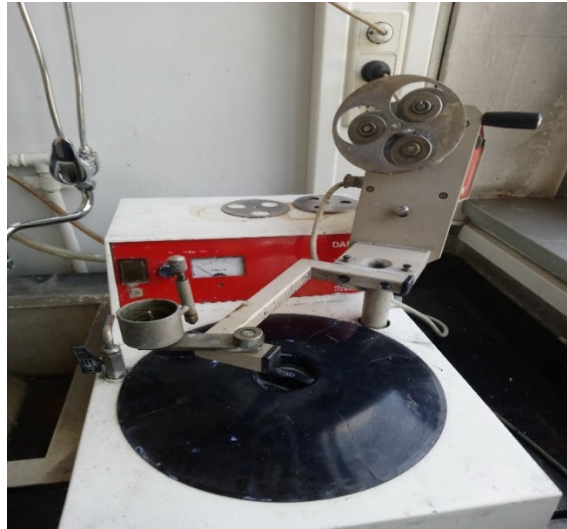


Slika 34. Aparat za brušenje i poliranje Buehler Gridrer/Polisher

Kod postupka brušenja koristili su se brusni papiri oznake P320, P500, P1000, P2400 i P4000 gdje oznaka P320 označava najhrapaviji a oznaka P4000 najfiniji papir. Brzina brušenja je bila 300 o/min.

### 7.2.3. POLIRANJE UZORAKA

Nakon brušenja iste te površine su se polirale. Poliranje se vršilo na aparatu Struers DAP – V.



Slika 35. Aparat za poliranje Struers DAP – V

Kod poliranja koristile su se dijamante paste i tkanine te lubrikant. Poliranje se odvijalo u dva koraka. U prvom dijelu se koristila dijamanta pasta te papir od 3  $\mu\text{m}$  i poliranje je trajalo 2 min. U drugom dijelu se koristila tekućina te papir od 0,03  $\mu\text{m}$  i poliranje je trajalo 1 min. U oba koraka brzina poliranja je bila 150 o/min.

### 7.2.4. NAGRIZAVANJE POVRŠINE





Postupak nagrizavanja se odvijao tako da su se pripremile dvije posude. U jednoj posudi je bila otopina od 3% nitala, a u drugoj obična voda. Uzorci su se uronili u otopinu od nitala te su se u njoj držali otprilike 6 sec. Nakon toga su se uronili u posudu sa vodom da bi se prekinula kemijska reakcija. Na kraju su se uzorci pobrisali te posušili.



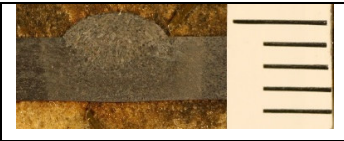



Slika 36. Radni prostor gdje se odvijao postupak nagrizavanja površina

### 7.3. ANALIZA UZORAKA

#### 7.3.1. MAKROSKOPSKO ISPITIVANJE

			
Navar broj 1	Navar broj 2	Navar broj 3	Navar broj 4
Struja zavarivanja: 140A	Struja zavarivanja: 120A	Struja zavarivanja: 100A	Struja zavarivanja: 80A
Brzina navarivanja: 16 cm/min	Brzina navarivanja: 16 cm/min	Brzina navarivanja: 16 cm/min	Brzina navarivanja: 16 cm/min

Tablica 8. Makroskopski uzorci ploče broj 1

			
Navar broj 5	Navar broj 6	Navar broj 7	Navar broj 8
Struja zavarivanja: 140A	Struja zavarivanja: 120A	Struja zavarivanja: 100A	Struja zavarivanja: 80A
Brzina navarivanja: 11 cm/min	Brzina navarivanja: 11 cm/min	Brzina navarivanja: 11 cm/min	Brzina navarivanja: 11 cm/min

Tablica 9. Makroskopski uzorci ploče broj 2

Kontrola se vršila prema tablici broj 6 u kojoj su definirane razne razine prihvatljivosti za nepravilnosti.

HRN EN ISO 5817 ref. br.	HEN EN ISO 6520-1 ref. br.	Oznaka	Razina 1	Razina 2 Razina kvalitete prema HRN EN ISO 5817
1.1	100	Pukotina	Nije dozvoljeno	B (nije dozvoljeno)
1.5	401	Nedostatak taljenja (nepotpuno taljenje)	Nije dozvoljeno	B (nije dozvoljeno)

Tablica 10. razine prihvatljivosti za nepravilnosti

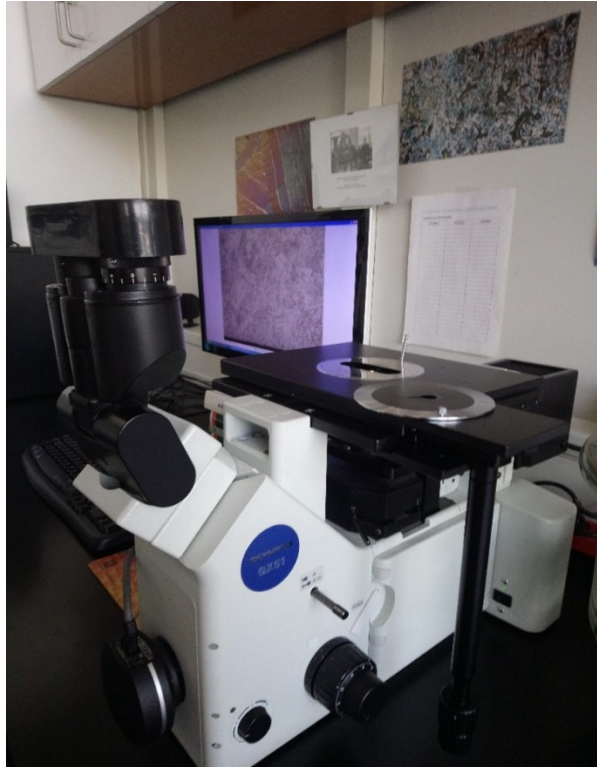
HRN EN ISO 5817 ref. br.	HRN EN ISO 6520-1 ref. br.	Oznaka	Razina 1	Razina 2 Razina kvalitete prema HRN EN ISO 5817
1.6	4021	Nepotpuna penetracija korijena	Nije dozvoljeno	B (nije dozvoljeno)
1.16	512	Prekomjerna asimetrija kutnog zavara	$h \leq 3 \text{ mm}$	B
1.9	502	Višak zavara (sučeljni zavar)	Nema posebnih zahtjeva	C
1.10	503	Prekomjerna konveksnost (kutni zavar)	Nema posebnih zahtjeva	C
1.21	5214	Prekomjerna visina zavara	Nema posebnih zahtjeva	C
1.11	504	Prekomjerna penetracija	Nema posebnih zahtjeva	C
1.12	505	Neispravan rub zavara	Nema posebnih zahtjeva	C

Nastavak tablice 10.



## 7.3.2. MIKROSKOPSKO ISPITIVANJE

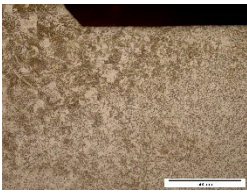
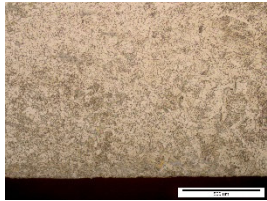
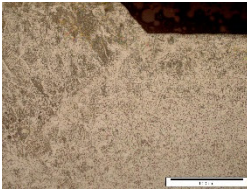
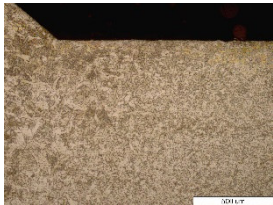
Analiza uzoraka se izvršila na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51. Analizirali su se svi uzorci a uvećanje je bilo 100 puta.



Slika 37. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]	Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]
1.	140	877,2	2.	120	709,3
Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]	Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]
3.	100	676	4.	80	1070

Tablica 11. Ploča broj 1 mikroanaliza uzoraka

					
Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]	Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]
5.	140	422,7	6.	120	776
					
Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]	Broj navara	Struja [A]	Širina zone utjecaja topline [μm]
7.	100	414,7	8.	80	439,3

Tablica 12. Ploča broj 2 mikroanaliza uzoraka

## 8. ZAKLJUČAK

TIG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja koji bez obzira na neke bitne nedostatke (brzina zavarivanja, mali depozit dodatnog materijala, ekonomičnost) zauzima važno mjesto u izradi strojarskih konstrukcija, a glavni razlog tome je prilagodljivost procesa zahtjevima konstrukcije i iznimna kvaliteta zavarenog spoja. Primjena TIG postupka je vrlo široka bez obzira što se uglavnom koristi kod zavarivanja pozicija debljine do 6 mm.

U ekperimentalnom dijelu je istraživana utjecaj struje zavarivanja na geometrijska svojstva navara izvedenih TIG postupkom na konstrukcijskom čeliku DC01.

Jakost struje kod TIG zavarivanja ima važan utjecaj na tehnološki proces, kvalitetu oblika zavara.

Provedeno je TIG navarivanje u dva slučaja. U prvom slučaju je brzina navarivanja iznosila 16 cm/min, kao zaštitni plin se koristio argon, a varijabla koja se mjenjala je bila jakost struje. U drugom slučaju je brzina zavarivanja iznosila 11 cm/min, zaštitni plin je ostao argon, jakost struje se opet mjenjala.

Može se ustanoviti da jakost struje utječe na geometrijske karakteristike navara. Povećanjem jakosti struje povećava se zona utjecaja topline, mjenja se širina i visina lica zavara .

Optimalni parametri za zavarivanje TIG postupkom konstrukcijskog čelika debljine 3 mm bi bili da je struja zavarivanja otprilike 100 A, te da brzina zavarivanja iznosi 12 cm/min.

## LITERATURA

- 1) dr. sc. Kožuh S., Specijalni čelici, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2010.
- 2) Novosel M., Krumes D., Željezni materijali II. dio: konstrukcijski čelici, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1995.
- 3) Kostandin T., Materijali 2, Interna skripta, Karlovac, 2013
- 4) Kearns W.H., Metals and their weldability, welding handbook, American welding society, 1997
- 5) <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>
- 6) Babić N., Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304, str. 8
- 7) Lucas W., TIG and PLASMA Welding, Process techniques, recommended practices and applications,
- 8) Horvat M., Kondić V., Brezovečki D., Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja
- 9) Palić V., Zavarivanje I, Novi Sad 1983.
- 10) Branilović D., TIG zavarivanje, Završni rad, 2011., FSB
- 11) Muncaster P., Practical TIG ( GTA ) welding, Abington Publishing, 1991
- 12) Miller Electric Mfg. Co., Guidelines for gas tungsten arc welding (GTAW), 2008.
- 13) <https://www.americanweldingsupply.com/lincoln-accessories/welding-torches/pta-17v-tig-torch-12-5-ft-1pc-k1782-6.html>
- 14) <http://www.tpsweldtech.com/tig-torch-LT17GV-4mtr-35-50>
- 15) Sinanović A., Sustav osiguravanja kvalitete u proizvodnji zavarivanjem, Završni rad, 2013., FSB