

# ISPITIVANJE KONTROLE KVALITETE SPOJEVA IZRAĐENIH ROBOTIZIRANIM TIG POSTUPKOM

---

**Bosiljevac, Nikola**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**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:128:134688>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**



**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 REPOZITORIJI

# ISPITIVANJE KONTROLE KVALITETE SPOJEVA IZRAĐENIH ROBOTIZIRANIM TIG POSTUPKOM

---

**Bosiljevac, Nikola**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**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:128:134688>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-16**



**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  
STROJARSKI ODIJEL**

**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ  
STROJARSTVA**

**Nikola Bosiljevac**

**ISPITIVANJE KONTROLE  
KVALITETE SPOJEVA  
IZRAĐENIH ROBOTIZIRANIM  
TIG POSTUPKOM**

Karlovac, 2019.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODIJEL**

**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ  
STROJARSTVA**

**Nikola Bosiljevac**

**ISPITIVANJE KONTROLE  
KVALITETE SPOJEVA  
IZRAĐENIH ROBOTIZIRANIM  
TIG POSTUPKOM**

Mentor: Tomislav Božić, dipl.ing.stroj.

Karlovac, 2019.

## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – student Nikola Bosiljevac, OIB: 33850574698, matični broj: 0246036711, upisan kao absolvent akademske godine 2018./2019., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć mentora Tomislava Božića, dipl.ing. strojarstva kojem se ovim putem zahvaljujem.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i djevojci što su bili uz mene za vrijeme studiranja i izrade diplomskog rada.

Nikola Bosiljevac

---

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
SAŽETAK.....	III
SUMMARY .....	IV
1.Uvod.....	1
1.1. Povijest zavarivanja .....	2
2.TIG postupak zavarivanja .....	4
2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja .....	4
2.2. Oprema za TIG zavarivanje .....	7
2.2.1. Izvori struje za TIG zavarivanje.....	8
2.2.2. Pištolj za zavarivanje.....	10
2.2.3. Sapnica za zaštitni plin.....	11
2.2.4. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje.....	12
3.Modificirane varijante TIG zavarivanja.....	15
3.1. Impulsno TIG zavarivanje.....	15
3.2. Visokoučinsko TIG zavarivanje sa aktivirajućim prahom.....	15
3.3. K-TIG –visoko penetracijski postupak- „, tehnika ključanica (keyhole)“ .....	15
3.4. TIG točkasto zavarivanje .....	16
3.5. TIP TIG postupak.....	16
3.6. Orbitalno TIG zavarivanje .....	18
4.Priprema spojeva, izbor i granične debljine .....	19
4.1. Priprema netaljivih volfram elektroda.....	19
4.2. Izbor parametara za zavarivanje.....	20
5. Industrijske robotske stanice .....	21
5.1. Općenito o industrijskim robotima.....	21
5.2. Programiranje robota za zavarivanje.....	24

5.2.1. On-line metoda programiranja .....	25
5.2.2. Off -line metoda programiranja.....	26
5.2.3. Hibridna (mješovita ) metoda programiranja .....	26
5.3 Primjena senzora kod robotiziranog zavarivanja .....	27
6. Kontrola i osiguranje kvalitete kod zavarivanja.....	32
6.1. Vizualna kontrola .....	33
6.2. Ultrazvučna kontrola .....	34
6.3. Magnetska metoda.....	34
6.4. Penetratska metoda.....	35
7. Eksperimentalni dio.....	37
7.1. Uvod.....	37
7.2. Svojstva materijala .....	37
7.3. Priprema materijala i spoja.....	38
7.4. Zavarivanje.....	40
7.5 Kontrola i ispitivanje.....	43
8.Zaključak.....	54
9. Popis slika .....	55
Literatura .....	58

# SAŽETAK

## ISPITIVANJE KONTROLE KVALITETE SPOJEVA IZRAĐENIH ROBOTIZIRANIM TIG POSTUPKOM

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni zavareni spoj .

Kako je zavarivanje općenito težak i monoton posao, ponekad i opasan po život zavarivača, javila se potreba za uvođenjem automatiziranog sustava, odnosno robota u sam proces (industrijski robot).

Rad je koncipiran u nekoliko cjelina. U uvodu je ukratko opisana uloga i povijest zavarivanja. Druga cjelina predstavlja sve o TIG postupku zavarivanja i potrebnoj opremi.

Modificirane varijante TIG zavarivanja opisane su u trećoj cjelini.

U četvrtom poglavlju definirana je zona spoja i granice debljine. Peti dio rada opisuje s robotske stanice, načini programiranja i primjena senzora za korekciju putanje zavarivanja.

U nastavku je analiziran praktični dio rada.

Na kraju rada nalazi se osvrt na diplomski rad u cijelosti.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, robotizirano zavarivanje, TIG robot, senzori za robotizirano zavarivanje, kontrola kvalitete, ispitivanje bez razaranja.



## **SUMMARY**

### **EVALUATING THE QUALITY CONTROL OF JOINTS MADE BY ROBOTISED TIG PROCESS**

Welding is a process in which two or more identical or varied materials are joined by melting or by pressing, with or without adding an additional material, to obtain a homogeneous welded joint.

Since welding is generally difficult and monotonous, sometimes dangerous to the life of the person performing the weld, there is a need to introduce an automated system, i.e. robots into the process itself (industrial robot).

The graduation thesis is composed of eight chapters. The introductory part briefly describes the role and history of welding. The second chapter is about TIG welding and the necessary equipment. Modified variants of TIG welding are described in a third chapter. In the fourth chapter, the joint zone and the thickness limit are defined. The fifth chapter of thesis describes robotic cells, programming modes and application of welding path correction sensors. Further is an analysis of the practical part of the thesis.

At the end of the thesis there is a conclusion.

Keywords: TIG welding, robotised welding, TIG robot, robotic welding sensors, quality control, non-destructive testing

## 1.Uvod

Zavarivanje je postupak koji ima značajnu ulogu tijekom oblikovanja i izrade proizvoda i raznih konstrukcija načinjenih iz metalnih ili nemetalnih materijala. Kao sve ostale vrste spajanja materijala i zavarivanje ima svoj osnovni cilj, a to je osiguranje kompaktnosti spojenih dijelova i mogućnosti pouzdanog podnošenja predviđenih naprezanja.

Kako je zavarivanje općenito težak i monoton posao, ponekad i opasan po život zavarivača, javila se potreba za uvođenjem automatiziranog sustava, odnosno robota u sam proces.

Zbog mnogostranosti primjene industrijskih robota u današnjici, teško je postaviti definiciju koja bi navedenom pojmu dala jedinstveno značenje. Najpreciznija definicija kojom ih možemo opisati je ta da je industrijski robot automatski upravljani, višefunkcionalan, reprogramabilan, manipulacijski uređaj s nekoliko stupnjeva slobode, koji može biti statičan ili pokretan. [1] Najvažnije svojstvo industrijskih robota je mogućnost reprogramiranja kojim ih se osposobljava za obavljanje novih funkcija i time doprinosi svestranosti u industrijskoj primjeni.

Otegotnu okolnost za čovjeka isto tako predstavljaju prisilni i neprikladni položaji rada u kojima robot može izvesti kvalitetniji i jednoličniji spoj. Uzimajući u obzir i činjenicu da robot u proizvodnim uvjetima može obavljati svoju zadaću učinkovitije, postaje nesumnjivo da roboti i te kako mogu zamijeniti čovjeka zavarivača, što u suvremenim industrijskim prilikama vrlo često i jest slučaj.

## 1.1. Povijest zavarivanja

Prvo korištenje samorodnog bakra započelo je prije 10000 godina, ali korištenje metala nije bilo šire moguće dok čovjek nije naučio izdvajati metale iz ruda taljenjem. Povijest spajanja metala javlja se u brončanom i u željeznom dobu, a najizraženiji prostori na kojima se pojavila su prostori današnje Europe i Bliskog istoka. Razvila se kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, posuda, oružja, građevina i nakita. Sve do kraja 19. stoljeća, jedino je bilo poznato kovačko zavarivanje, s kojim su kovači stoljećima spajali željezo i čelik grijanjem i udaranjem čekića. U 20. stoljeću među prvima postupcima koji su se razvili su bili elektrolučno zavarivanje i plinsko zavarivanje. Nakon toga su se razvili mnogi ostali postupci zavarivanja, ali među najzastupljenijim je postalo ručno elektrolučno zavarivanje. Danas se postupak zavarivanja može obavljati u radionici, na otvorenom prostoru, u vodi ili čak u svemiru.

U Hrvatskoj se značajniji razvoj zavarivanja postigao uoči drugog svjetskog rata, a među najznačajnijim poduhvatima je veliki zavareni cestovni most preko rijeke Save u Zagrebu. Izradilo ga je i montiralo poduzeće iz Slavenskog Broda-Đuro Đaković koje je ujedno i bilo tada „Prva jugoslavenska tvornica strojeva, mostova i vagona“. Na tom su se mostu zavarivali limovi debljine do 95mm i čvrstoće 440 MPa.

Kod izrade zavarenih konstrukcija pred tehnologa zavarivanja se postavljaju različiti kriteriji. Prije svega to su zahtjevi za kvalitetu i pouzdanost (sigurnost) zavarenih spojeva na konstrukciji, minimalne troškove izrade, minimalan utrošak materijala i energije, te minimalno onečišćenje čovjekove okoline. Jedan od putova ka ispunjenju spomenutih zahtjeva je primjena visokoučinskih postupaka zavarivanja, konkretno: Zavarivanje laser MIG hybrid, visokoučinski automatski TIG postupak, orbitalno TIG zavarivanje, zavarivanje u uskom žlijebu, Vertomatic-automatsko elektroplinsko zavarivanje, STT (Surface-Tension-Transfer) postupak zavarivanja i elektrootporni postupci zavarivanja. Visokoučinski postupci zavarivanja su postupci zavarivanja koji povećavaju produktivnost zavarivanja uz postizanje barem minimalno zahtijevane kvalitete i pouzdanosti zavarenih spojeva i koji omogućavaju postizanje prihvatljive cijene zavarene konstrukcije na tržištu.[2]

Visokoučinski postupci zavarivanja - zanimljivi su stajališta povećanja produktivnosti i smanjenja troškova izrade zavarenih proizvoda (tehnoložnost – “cost effective design”).

Pokazatelji produktivnosti:

- količina depozita, broj zavarenih proizvoda (npr. cijevi), duljina izvedenih zavara (količinska norma)

- vrijeme potrebno za zavarivanje (vremenska norma).

Visokoučinski postupci zavarivanja obično se vežu uz određeni stupanj mehanizacije, automatizacije i robotizacije, ali isto tako primjenu suvremene tehnologije zavarivanja (npr. TIME postupak zavarivanja, zavarivanje praškom punjenim žicama, ...).

## **2.TIG postupak zavarivanja**

### **2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja**

Zavarivanje TIG postupkom ili elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, je postupak zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu ili neutralnoj smjesi plinova, koji koristi netaljivu volframovu elektrodu (ili volfram s dodacima, npr. torijevog oksida ili oksida drugih elemenata kao cirkonij, lantan, itrij) i posebno dodatni materijal. [3]

TIG postupak razvijen je za potrebe zrakoplovne industrije za zavarivanje legura lakih metala, a kasnije se njegova primjena proširila i na izradbu uređaja i postrojenja za kemijsku i procesnu industriju gdje se zavaruju nehrđajući čelici, aluminij, bakar i njihove legure.

Princip zavarivanja je vrlo jednostavan. Naime električni luk se uspostavlja između netaljive volfram elektrode i osnovnog materijala, pri čemu se uspostavljanje električnog luka vrši sa i bez dodira volframove elektrode s radnim komadom: [4]

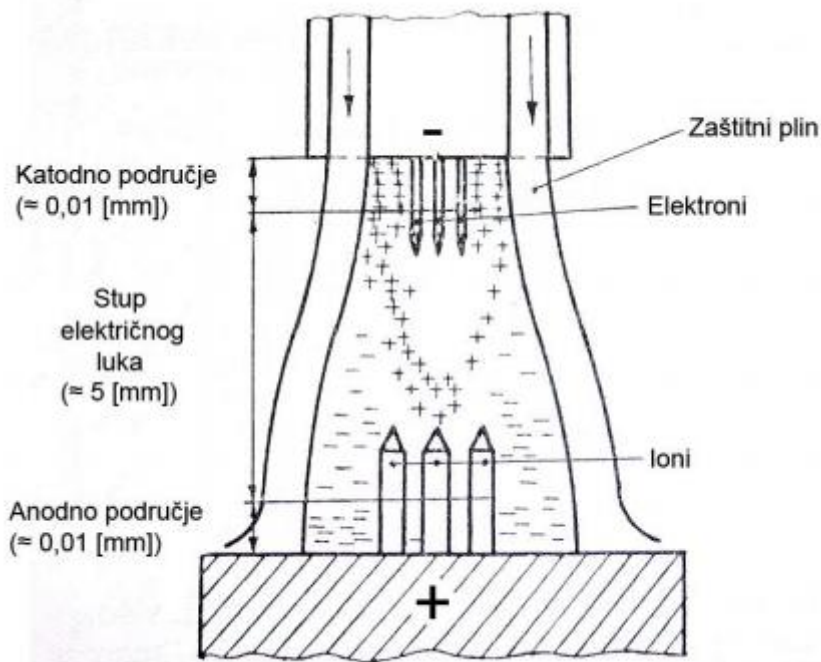
1. Uspostavljanje električnog luka sa dodiranjem volframove elektrode s radnim komadom.

Upotrebljava se kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom koji nemaju u sebi ugrađen uređaj visokofrekventne električne struje. Provodi se laganim povlačenjem vrha elektrode po površini radnog komada. Nakon što se vrh elektrode dotakne s radnim komadom zatvori se strujni krug i poteče električna struja te se odmicanjem vrha elektrode od radnog komada uspostavi električni luk kroz ionizirani zaštitni plin.

2. Uspostavljanje električnog luka bez dodira volframove elektrode s radnim komadom.

Uglavnom se koristi ovaj način uspostave električnog luka, i to uz pomoć visokofrekventne električne struje. Vrh elektrode se prinese blizu površine radnog komada (na oko  $\varnothing$  elektrode) te visokonaponska, visokofrekventna struja „preskoči“ razmak između vrha elektrode i radnog komada u vidu izboja iskri i tako stvori električni luk.

Kod uspostavljanja i održavanja električnog luka glavni nosilac ionizacije je zaštitni plin.



**Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod Tig zavarivanje [4]**

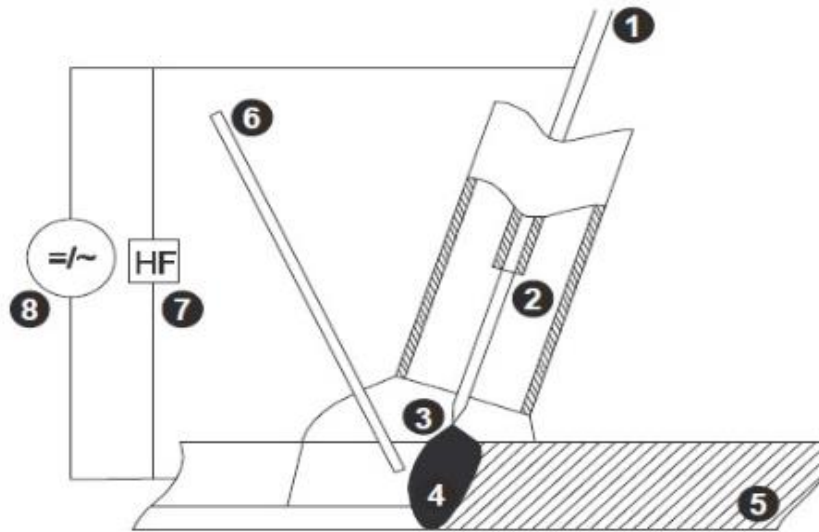
Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji se iz anodnog i katodnog područja te područja stupa električnog luka: [4]

1. Anodno područje električnog luka ili područje plus pola je ispred anode. Male je veličine ( $\approx 0,01$  mm), a sastoji se od oblaka elektrona koji velikom brzinom udaraju na anodu i tu oslobađaju svoju energiju, pri čemu se razvija toplina na anodi (2000 –5000 K) pri čemu se tali metal.
2. Katodno područje električnog luka ili područje minus pola nalazi se ispred katode. Također je male veličine ( $\approx 0,01$  mm), a sastoji se od oblaka iona koji su privučeni katodom i koji velikom brzinom udaraju na površinu katode, pri čemu se također razvija toplina (manja nego na anodi).
3. Stup električnog luka je najduže područje (3 – 5 mm), ovisno o naponu električnog luka, a nalazi se između anodnog i katodnog područja. Sastoji se od mješavine elektrona, iona, neutralnih atoma i molekula. Uslijed privlačnih sila katode i anode kroz područje stupa električnog luka prolaze elektroni i ioni te se tako održava električni luk.

Prednosti ovog postupka su: primjenjiv za zavarivanje svih materijala, nema rasprskavanja kapljica, zavarivanje u svim položajima, zavarivanje u radionici i na terenu, visoka kvaliteta

zavara, nema troske, dima i isparavanja, raspon debljina 1-6mm, brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka te mogućnost automatizacije o kojoj će biti govora u sljedećim poglavljima.

S druge strane nedostaci su: neekonomičnost za veće debljine (mala količina nataljenog materijala), otežan rad na otvorenom, potrebna kvalitetna priprema spoja, čistoća površine, utjecaj ljudskog faktora, cijena plina.



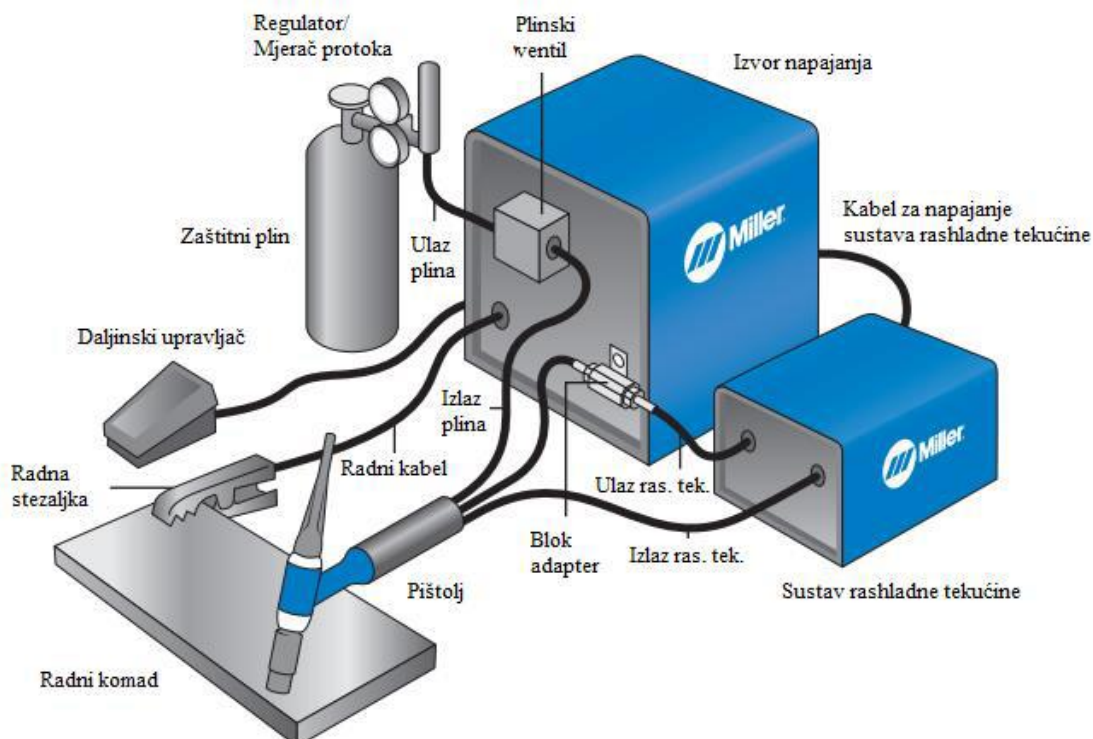
Slika 2. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [7]

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

## 2.2. Oprema za TIG zavarivanje

Osnovni dijelovi od kojih se sastoji uređaj za ručno TIG zavarivanje prikazani su na slici 3. [5]:

1. izvor struje (u kojemu se nalazi transformator, strujni ispravljač i upravljačka elektronika) i sistem za hlađenje
2. nožni prekidač
3. radni komad
4. stezna kliješta
5. pištolj za zavarivanje
6. izlazno crijevo sustava za hlađenje pištolja za zavarivanje
7. ulazno crijevo sustava za hlađenje pištolja za zavarivanje
8. sustav hlađenja
9. boca sa zaštitnim plinom (s regulatorima tlaka i protoka plina)



Slika 3. Shematski prikaz TIG zavarivanja [6]



Princip rada uređaja za TIG zavarivanje je sljedeći: kontrolni ormarić u kojem se nalazi transformatorsko napajanje, strujni ispravljač, upravljačka elektronika i sistem za rashlađivanje pištolja, priključeni su na električnu mrežu. Na samom kontrolnom ormariću nalazi se prekidač za paljenje. Ovisno o materijalu koji se zavaruje, mora se pripaziti na koji pol (-/+/AC) se spaja naš pištolj (volframova elektroda). Drugi kraj se spaja uz pomoć steznih kliješta na radni komad kako bi zatvorili strujni krug. Između radnog komada i pištolja za zavarivanje paralelno je spojen visokofrekventni modul koji omogućava lakše uspostavljanje el.luka te štiti zavarivača od strujnog udara zbog "Skin" efekta. Zaštitni inertni plin se nalazi u atestiranoj čeličnoj boci. Na vrhu boce smješten je reducir ventil na kojeg se dalje nadovezuju mjerni instrumenti i regulatori tlaka i protoka. Kroz gumeno crijevo preko elektromagnetskih ventila propušta se plin (Ar i He) sve do pištolja. Plin izlazi iz sapnice pištolja te štiti samo područje zavara i volframovu elektrodu od kontaminacije okolnim nečistim medijem.

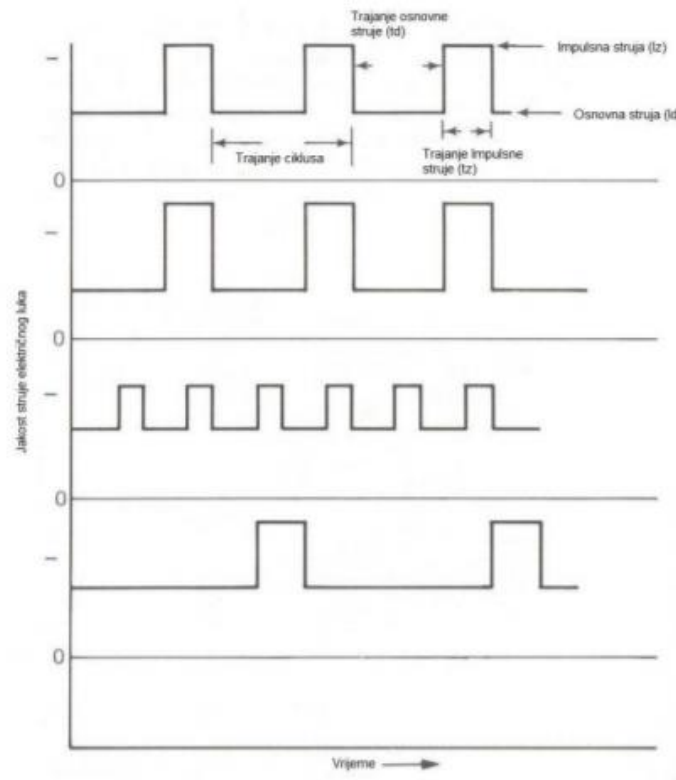
U modernije vrijeme većina uređaja koji mogu raditi s višim strujama zavarivanja imaju integrirani sistem hlađenja pištolja pomoću tekućine za hlađenje (voda ili antifriz), rashladna tekućina prolazi kroz gumeno crijevo preko elektromagnetskog ventila, zatim prolazi sve do pištolja i iz pištolja nazad u rashladni sistem u kojem se nalazi hladnjak s crpkom za cirkulaciju. Kroz poseban vodič prolazi el.struja sve do prekidača na pištolju. Svi su ovi priključci (plin, struja, tekućina za hlađenje) spojeni direktno na pištolj posebnim polikablom i preko njega se svi ti priključci mogu uključiti ili isključiti. Danas postoje i bežični prekidači u obliku papuča koje olakšavaju rad [5].

### **2.2.1. Izvori struje za TIG zavarivanje**

- DC izvori- Cr-Ni čelici, ne legirani čelici, titan
- AC/DC izvori – Al, Mg
- AC skuplji zbog HF modula (uspostavljanje i održavanje električnog luka!)

Izvori električne struje za impulsno TIG zavarivanje građeni su tako da se mogu programski podesiti za mijenjanje jakosti struje u određenim vremenskim intervalima tijekom zavarivanja. Pojednostavljeno protumačeno, impulsno TIG zavarivanje je način zavarivanja gdje se jakost električne struje ritmički mijenja u dvije razine. U određenom vremenskom razdoblju (tz), čija dužina se može podesiti, prolazi električna struja veće jakosti (Iz) s kojom se tali i protaljuje, potom slijedi struja manje jakosti (Id), opet u određenom vremenskom razdoblju (td), koja dozvoljava skrućivanje pretaljenog mjesta, ali ne i hlađenje. Tako se u

određenim vremenskim intervalima, ponavlja zavarivanje jačom pa slabijom električnom strujom, a zavareni spoj izgleda kao da je sastavljen od niza točkica protaljivanja koje se preklapaju jedna preko druge. Na slici 4. prikazana je mogućnost dobivanja različitih pravokutnih impulsnih oblika električnog luka uz pomoć posebnog impulsnog TIG napajanja . [7]



**Slika 4. Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [7]**

Jednostavno rečeno, impulsni TIG je sistem u kojem se struja električnog luka ritmički odvija između dvije razine. U periodu više struje provodi se zagrijavanje i taljenje (zavarivanje), a u periodu niže struje hlađenje i skrućivanje pojedinih točkastih zavara. Kontrolirani zavar postiže se osiguravanjem određenog preklopa pojedinačnih točkastih zavara.

Kod elektrolučnog postupka raspodjela toplinske energije može se podijeliti u tri faze [8]:

- a) temperaturno polje pomiče se u smjeru zavarivanja, zajedno sa izvorom, pri čemu temperatura raste,
- b) kvazistacionarno stanje, može se u jednom trenutku opisati temperaturno polje,
- c) snižavanje temperature i vremensko izjednačavanje, koje nastaje po završetku zavarivanja.

Kod impulsnog TIG postupka bitno je umanjen problem toplinske ravnoteže, ulazne i efektivne energije, odnosno postoji [8]:

- a) ograničenje prirasta toplinske energije u nekom volumenu, a time i temperature
- b) mogućnost korištenja visokih strujnih impulsa u kratkom vremenu, većih od struje zavarivanja kod TIG postupka ("klasičnog") čime se umanjuje unesena toplinska energija i omogućuje hlađenje taline zavara.

U svijetu se proizvode izvori za zavarivanje kod kojih je upravljački dio izveden s transduktorom, tiristorskim ili tranzistorskim krugom. U novije vrijeme veliku primjenu imaju izvori za zavarivanje s tranzistorskom kontrolom izlazne struje, zbog svoje kvalitete, pouzdanosti i manje mase [8].

### ***2.2.2. Pištolj za zavarivanje***

Pištolji za TIG zavarivanje se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe [4]:

#### **1. Bez hlađenja rashladnom tekućinom**

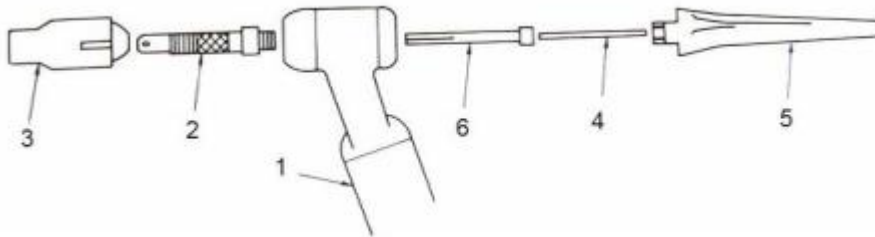
- hladi se samo zrakom,
- manje jakosti struje zavarivanja (150-200 A),
- kraća vremenska opterećenja.

#### **2. S hlađenjem rashladnom tekućinom**

- rashladna tekućina je voda ili antifriz,
- veće jakosti struje zavarivanja,
- duža vremenska opterećenja.

Postoje pištolji različitih oblika i dimenzija, ovisno o mjestu na kojem se zavaruje te pristupačnosti mjesta zavora. Tipičan pištolj za ručno TIG zavarivanje sastoji se od [4]:

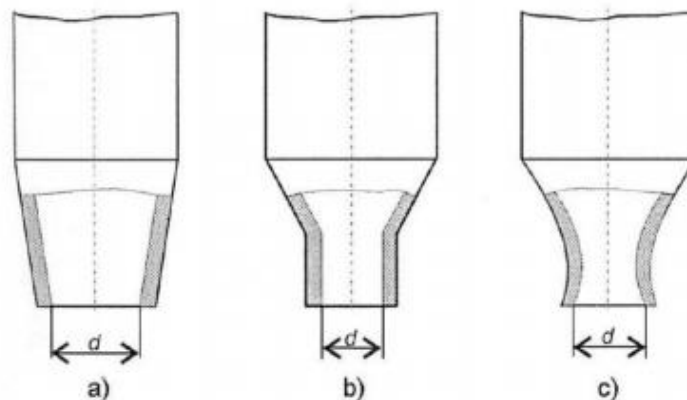
1. držača za ruku – u njemu završavaju svi provodnici (el. struje za zavarivanje, el. struje za komande, dovod i odvod vode, dovod plina) te se nalazi gumb za uključivanje procesa zavarivanja,
2. stezač volframove elektrode sa steznom kontaktnom cjevčicom,
3. sapnice za plin,
4. volframove elektrode,
5. zaštitne kape na volframovoj elektrodi,
6. kontaktne cjevčice – služi za dovođenje struje zavarivanja na elektrodu



Slika 5. Pištolj za TIG zavarivanje [9]

### 2.2.3. Sapnica za zaštitni plin

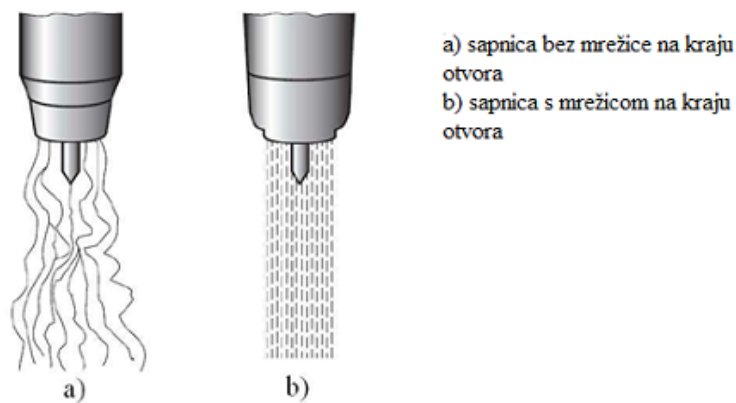
Služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, a može biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja, kao što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Najčešće korištene izvedbe sapnica [10]

Sapnica može biti izrađena od različitih materijala koji su otporni na visoke temperature. Najčešće je izrađena od vatrootpornog minerala, keramike (za manje i srednje jakosti struje zavarivanja) i iz kromiranog bakra hlađena vodom (za veće jakosti struje zavarivanja) [3]. Izbor veličine sapnice se određuje prema promjeru elektrode za zavarivanje, budući da je kod veće jakosti struje zavarivanja potrebna i veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode. Kod elektroda manjeg promjera (do promjera 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 – 1:6, dok je kod elektroda većeg promjera taj odnos približno 1:4. [4]

Na kraj otvora sapnice se može staviti mrežica koja poboljšava stabilnost protoka plina i na taj način sprječava turbulencije te je protok zaštitnog plina stabilan i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada, kao što je prikazano na slici 7.



**Slika 7. Turbolentno i laminarno strujanje zaštitnog plina [11]**

Prednost dugog stabilnog toka zaštitnog plina je činjenica da elektroda može više viriti van iz pištolja te zavarivač ima bolji pregled nad talinom zavara. [11]

#### **2.2.4. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje**

Osnovni zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu, koja se što lakše ionizira te da zaštiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoliša. Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje.

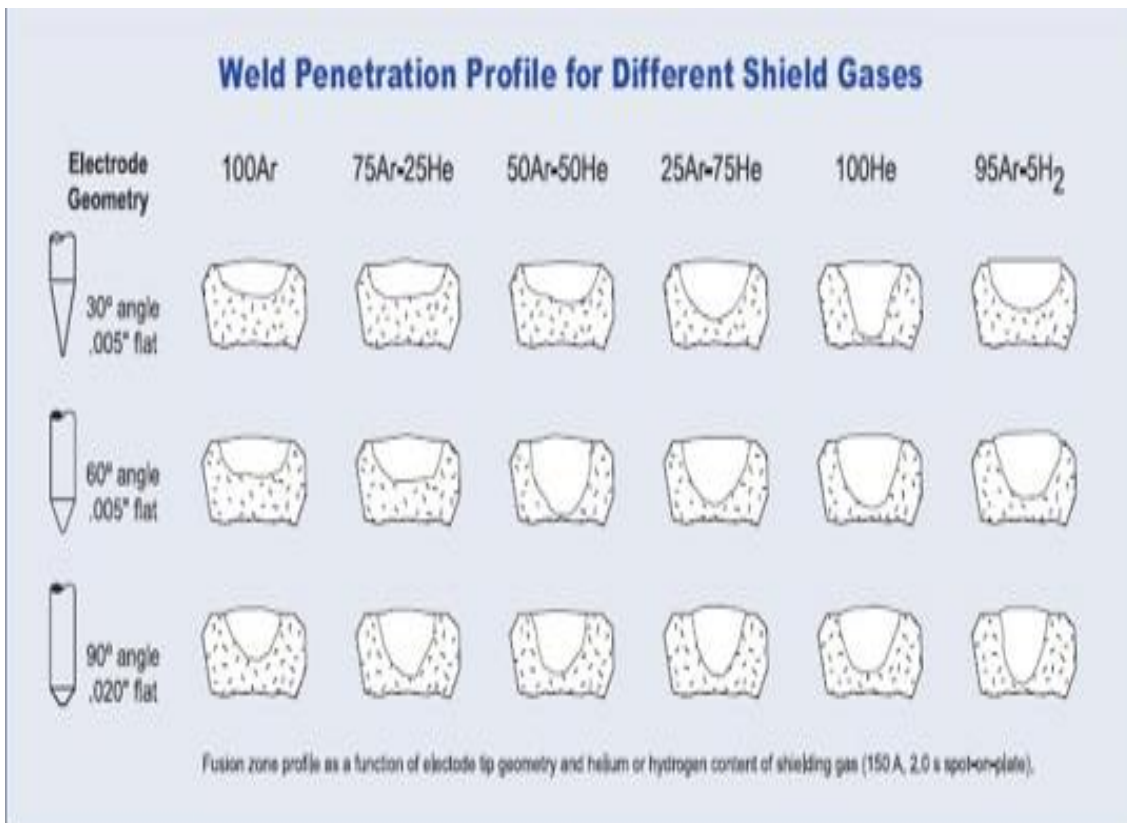
Utjecaj zaštitnih plinova se održava na [12]:

- električno - fizikalna svojstva,
- metalurške procese u talini zavara,
- tehnološke parametre,
- geometriju zavara,
- površinski izgled zavara,
- stabilnost i paljenje električnog luka.

Kod TIG zavarivanja se kao zaštitni plinovi koriste mješavine inertnih plinova do kojih su najčešće korišteni argon i helij.

Izbor zaštitnih plinova je ovisan o vrsti osnovnog materijala i primjeni [13]:

- argon je najčešće korišten zaštitni plin, a koristi se kod zavarivanja čelika, nehrđajućih čelika, aluminijskih legura, titanijskih legura,
- argon + vodik (2 do 5%) ima reducirajuće djelovanje, bolji izgled zavara, nema površinske oksidacije. Električni luk je uži i ima veću energiju, te omogućava veće brzine zavarivanja. Nedostatak je opasnost od pojave vodikom uzrokovanih pukotina i poroznosti kod aluminijskih legura,
- argon + helij (do 50%); helij utječe na povećanje energije električnog luka, što omogućava više brzine i bolju penetraciju. Nedostatak je visoka cijena i poteškoće kod uspostavljanja električnog luka,
- argon + dušik (1 do 3%) koristi se kod zavarivanja duplex i austenitnih čelika, niklovih legura,
- dušik, dušik + vodik ili argon se koriste za zaštitu korijena zavarenog spoja.



**Slika 8. Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik i dubinu zavara [21]**

### **3.Modificirane varijante TIG zavarivanja**

Postoje mnogobrojne varijante modificiranog TIG postupka, od kojih se najčešće koriste impulsno zavarivanje, visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom, K-TIG postupak, orbitalno zavarivanje cijevi, zavarivanje s vrućom žicom (TIP-TIG), točkasto zavarivanje i zavarivanje s dvostrukom zaštitom. [14]

#### **3.1. Impulsno TIG zavarivanje**

Ovakav postupak omogućava optimalno korištenje energije, jer se jačina struje značajno povećava samo u kratkom periodu vremena kada se rastopljeni vrh dodatnog materijala odvaja i prenosi u metalnu kupku. Impulsno TIG zavarivanje je veoma pogodno za automatsko (orbitalno) zavarivanje cijevi. [14]

#### **3.2. Visokoučinsko TIG zavarivanje sa aktivirajućim prahom**

Ova varijanta postupka uspostavljena je s ciljem da se poveća efikasnost penetracije kod procesa TIG zavarivanja. Ova varijanta koristi aktivirajući prašak, a naziv je prema tome dobila od Active Flux TIG, A-TIG. A-TIG je proces u kojem je zbog suženja luka i modificiranog tijeka taline penetracija u osnovnom materijalu znatno dublja nego kod konvencionalnog TIG zavarivanja. Kombinacija dublje penetracije i viših brzina zavarivanja povećava efikasnost zavarivačkog procesa.

#### **3.3. K-TIG –visoko penetracijski postpak- „, tehnika ključanica (keyhole)“**

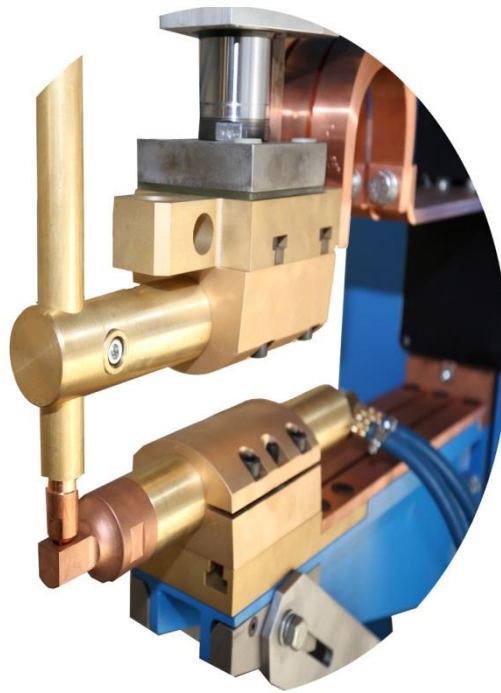
K-TIG je automatizirani visokobrzinski, jedno prolazni proces s punom penetracijom koji eliminira potrebu za dodatnim materijalom, pripremom rubova ili vještinama zavarivača. Proizvodi zavare bez greške brzinama većim do 100 puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak za materijale debljine do 16 mm. Nema potrebe za naknadnom obradom korijena ili lica zavara, čišćenjem ili brušenjem.

K-TIG postupak je jednostavan za uporabu, struktura luka i ključanica se razvijaju spontano i održavaju se automatski kontrolnim sustavom kroz proces zavarivanja. Zbog svoje jednostavnosti niski su troškovi održavanja, sustav je robustan i pouzdan [15].



### 3.4. TIG točkasto zavarivanje

Postupak omogućava dobivanje spoja preklapanjem, bez prethodne perforacije radnih komada. Postupak je veoma jednostavan i ne zahtijeva veliku vještinu operatera, veoma je produktivan te je moguća automatizacija. Postupak je primjenljiv na niskolegirane čelike, Al, debljine 0.5 do 2 mm. Vrijeme zavarivanja je 0.5 do 5 s [14].



Slika 9. Primjer TIG točkastog zavarivanja [14]

### 3.5. TIP TIG postupak

Primjena konvencionalnog TIG postupka zavarivanja ne može se u potpunosti odgovoriti potrebama suvremenog tržišta s aspekta proizvodnosti i ekonomičnosti. Stoga je u tu svrhu udovoljavanja potrebama tržišta 1999. godine inženjer Siegfried Plasch osmislio i patentirao postupak zavarivanja pod nazivom TIG zavarivanje s vođenim dodavanjem vrućeg ili hladnog dodatnog materijala (TIP TIG) [16].

varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavara te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Osnovni koncept postupka:

Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala, omogućava nečistoćama i plinovima izlaz iz taline te poboljšava žitkost taline što rezultira većim taloženjem dodatnog materijala. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja mogu se vrlo efikasno zavarivati opći konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici (feritni, austenitni i austenitno – feritni), visokolegirani čelici, aluminij i njegove legure, titan i slično.

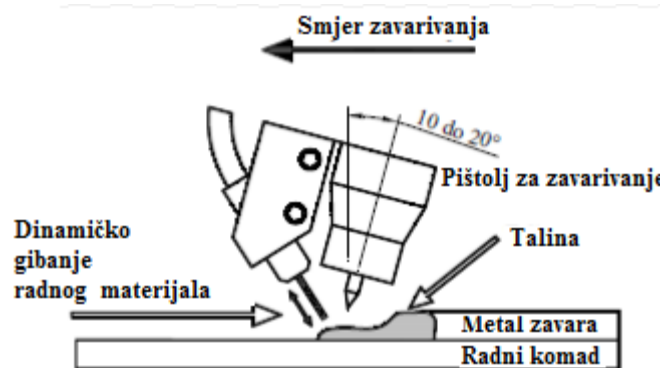
Primjenom TIP TIG postupka dobiva se [17]:

znatno veći depozit u odnosu na klasični TIG,

visoku kvalitetu zavara,

dobar estetski izgled i geometriju zavara bez potrebe za naknadnom obradom,

smanjeni unos topline u radni komad što rezultira smanjenjem deformacija radnog komada te manji negativni utjecaj na mikrostrukturu.

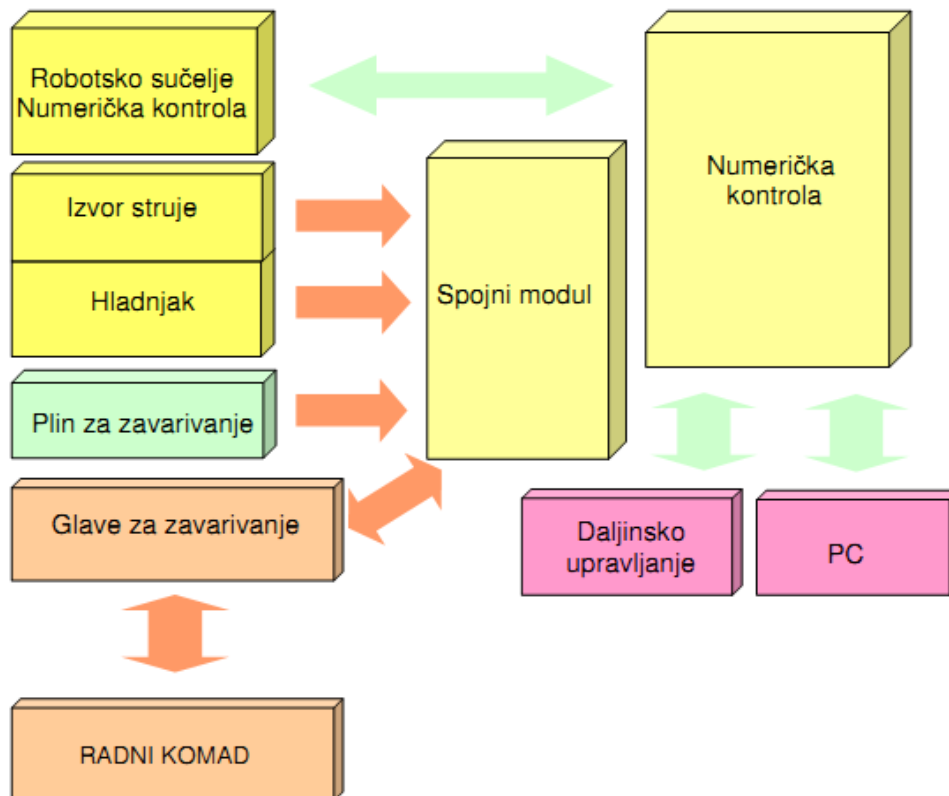


Slika 10. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [18]

### 3.6. Orbitalno TIG zavarivanje

Rotaciju oko radnog komada obavlja dio opreme za orbitalno zavarivanje koji nazivamo orbitalnim glavama za zavarivanje. Orbitalna glava za zavarivanje se sastoji od fiksnog dijela koji služi za fiksiranje glave na radni komad i dijela koji rotira i na sebi nosi pištolj za zavarivanje. Na taj način pištolj za zavarivanje može svojom kretnjom opisivati kružnicu oko radnog komada. U praksi se mogu susresti načini zavarivanja koji bi se mogli nazvati orbitalnim zavarivanjem, gdje radni komad rotira dok pištolj miruje što je u suprotnosti s definicijom orbitalnog zavarivanja. Međutim, u ovom slučaju se ipak radi o zavarenom spoju koji čini kružnicu i koji nastaje minimalnom rotacijom od  $360^\circ$ , ali sada radnog komada, a ne pištolja odnosno električnog luka. Pištolj za zavarivanje može se u ovom slučaju postaviti u najpovoljniji položaj glede utjecaja sile gravitacije na talinu zavara i konfiguracije radnog komada. Prednost ovog sistema je u tome što rezultati mogu biti konstantniji i moguće je ostvariti veće brzine zavarivanja, ali je velika mana fleksibilnost primjene [18].

#### Shematski prikaz orbitalnog sustava za zavarivanje



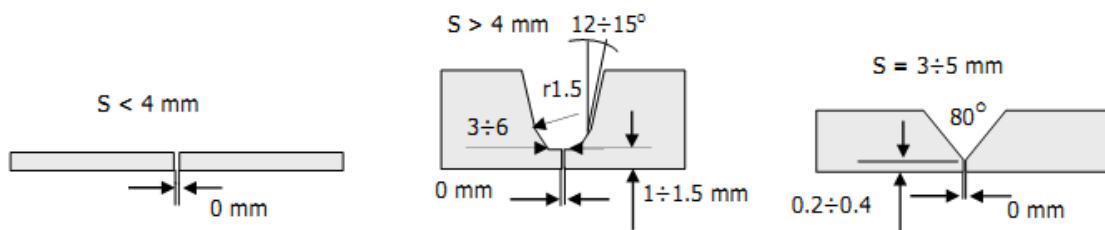
Slika 11. Shematski prikaz orbitalnog sustava za zavarivanje [18]

## 4. Priprema spojeva, izbor i granične debljine

Priprema spojeva za zavarivanje prilagođena je zahtjevima mehaniziranog zavarivanja, te ovisi o izabranom postupku zavarivanja ili pak kombinaciji postupaka (korijen + popuna). Kod izbora oblika i dimenzija spoja za zavarivanje osim postupka za zavarivanje treba uzeti u obzir debljinu i vrstu materijala, te ponekad i položaj za zavarivanje.

Priprema spoja mora se raditi strojno za to namijenjenim alatima. Tolerancije pripreme smiju odstupati u granicama od 10 do 20%. Međutim granične vrijednosti tolerancija ne bi trebale prelaziti granice za kutove od  $\pm 10^\circ$ , te za linearne dimenzije i radijuse od  $\pm 0,3$  mm.

U praksi se sreću vrijednosti koje prelaze navedene tolerancije i uspješno se rješavaju. U tom slučaju jedini uvjet za pristupanje zavarivanju je zadana tolerancija mjera propisanih normi i zahtjeva naručitelja.[19]



Slika 12. Priprema spojeva za TIG postupak bez i sa dodanim materijalom (hladna žica) [19]

### 4.1. Priprema netaljivih volfram elektroda

Netaljiva volfram elektroda je izvor električnog luka i jedan je od najvažnijih čimbenika orbitalnog TIG zavarivanja koji se često zapostavlja od strane korisnika. Netaljivu volfram elektrodu mora se brusiti strojno. Kontroliran i pouzdan start ovisi o kvaliteti brušenja i sastavu netaljive volfram elektrode, ali dakako i o vrsti zaštitnog plina za zavarivanje. Za konstantnu kvalitetu zavarenog spoja izuzetno je važno uz ostale parametre zavarivanja imati konstantnu udaljenost netaljive volfram elektrode od radnog komada, kut i način brušenja

elektrode. Uobičajeni kutovi oštrenja netaljive volfram elektrode za orbitalno TIG zavarivanje su između  $20^\circ$  i  $40^\circ$  (kod većih kutova električni luk je nestabilan), te udaljenosti netaljive volfram elektrode od 0,8 do 2,5 mm. Za orbitalno zavarivanje uglavnom se koriste netaljive volfram elektrode WL15, WT 20, WT40.[16]

#### **4.2. Izbor parametara za zavarivanje**

Prilikom procesa zavarivanja cijevi jedan izuzetno bitan faktor koji moramo imati u vidu je progresivno zagrijavanje cijevi u području zone zavarenog spoja. To područje se zagrijava progresivno i akumulira energiju od električnog luka za vrijeme rotacije električnog luka oko cijevi.

Ukoliko se unos energije ne smanjuje tijekom procesa zavarivanja i nastanka zavarenog spoja, volumen taline metala zavara će kontinuirano rasti, a metalurške promjene bit će neizbježne. U svim pozicijama balans taline metala zavara je važan, odnosno važno je kontrolirano održavanje ravnoteže između sile gravitacije i sila površinske napetosti taline metala zavara s ciljem ostvarivanja jednolike visine korijena zavarenog spoja i geometrije lica zavarenog spoja.

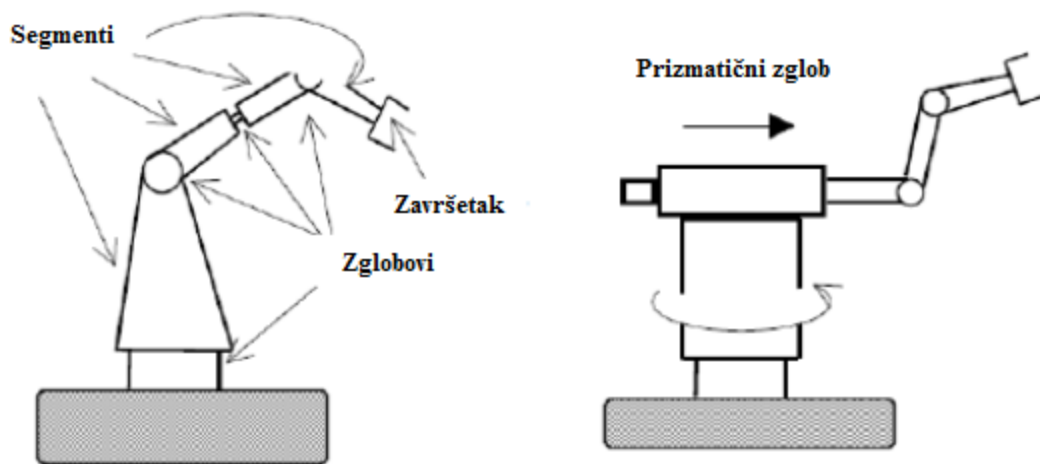
Ova se ravnoteža i kontrola veličine taline metala zavara može uspješno riješiti preko odgovarajućih parametara zavarivanja i to: vrijednostima impulsne struje, frekvenciji impulsa, brzini zavarivanja. Smanjivanje unosa energije uobičajeno se ostvaruje preko vrijednosti impulsne i osnovne struje, ali i preko brzine zavarivanja za određene sektore.

Uobičajeni parametri zavarivanja koji se programski određuju su: plin prije i poslije, struja paljenja, struja zagrijavanja, impulsna i osnovna struja, brzina zavarivanja, brzina i način dodavanja dodatnog materijala, vrijednost AVC kontrole, parametri njihanja, te sva pripadajuća vremena. [16]

## 5. Industrijske robotske stanice

### 5.1. Općenito o industrijskim robotima

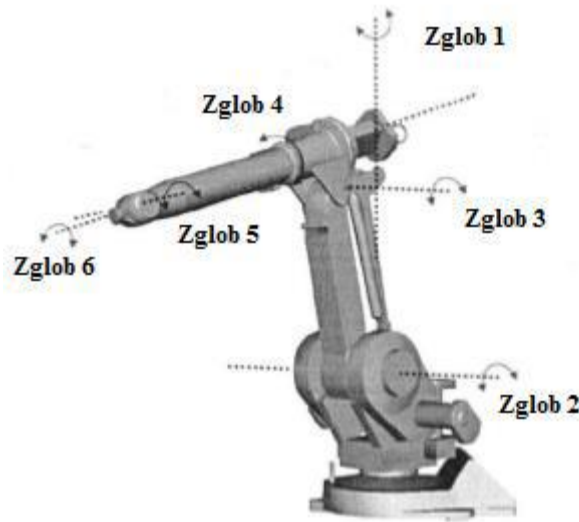
Industrijski robot se sastoji od čvrstih segmenata koji su međusobno povezani zglobovima. Uloga zglobova je također da omogućuju relativno gibanje susjednih segmenata te su obično opremljeni odgovarajućim sensorima kako bi se mogao izmjeriti njihov relativan položaj. Ukoliko je riječ o rotacijskim zglobovima tada odklon u položaju predstavlja kut zgloba, s druge strane robot može imati i translacijske odnosno prizmatične zglobove kako je vidljivo sa slike 13.



Slika 13. Shematski prikaz segmenata i zglobova robotskim manipulatorom [22]

Broj stupnjeva slobode gibanja robotskog manipulatora je broj nezavisnih varijabli pozicije koje moraju biti određene kako bi bio poznat položaj svih dijelova mehanizma. S obzirom da je robot najčešće kinematski lanac, svakom zglobu je dodijeljena jedna varijabla, što implicira da je broj stupnjeva slobode gibanja jednak broju zglobova.

Na završni dio kinematskog lanca postavlja se alat koji odgovara primjeni industrijskog robota. Položaj manipulatora izražava se upravo preko položaja završnog sklopa s alatom, točnije preko relativnog položaja koordinatnog sustava TCP-a (Tool Center Point) ili središnje točke alata s obzirom na referentni koordinatni sustav nepokretnog temelja robota. Na slici 14., shematskim 3D prikazom predstavljen je industrijski robot sa šest stupnjeva slobode gibanja i sfernom strukturom, što znači da su mu svi zglobovi rotacijski [22].



**Slika 14. 3D shematski prikaz industrijskog robota sa 6 stupnjeva slobode gibanja [23]**

Roboti se mogu podijeliti u tri generacije [24]:

Prva generacija robota naziva se programirani roboti. Roboti bez osjetila i s vrlo ograničenom inteligencijom.

Druga generacija robota (senzitivni roboti) opremljena je nizom senzora (vizualni, taktilni, sensor sile), a mogu imati i sustave za raspoznavanje.

Treća generacija robota opremljena je, osim sustavima za raspoznavanje i računalima nove generacije pomoću kojih je moguće vršiti vođenje multivarijabilnog procesa s više izlaznih i ulaznih varijabli.

Osnovne komponente industrijskog robota su [24]:

Mehanička struktura ili manipulator koji se sastoji od niza krutih segmenata povezanih pomoću zglobova.

Aktuatori (pogoni) postavljaju manipulator u određeno kretanje pomicanjem zglobova. Najčešće se upotrebljavaju električni i hidraulički motori, a ponekad i pneumatski.

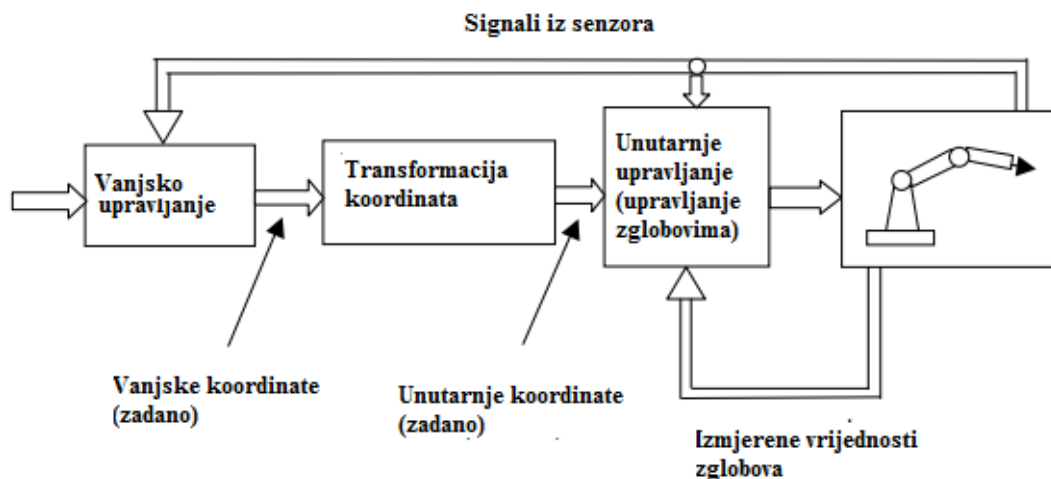
Sustav upravljanja (računalo) omogućuje upravljanje i nadzor kretanja manipulatora.

Generalno se može reći da se robot sastoji od nekoliko temeljnih sustava, a to su [25]:

Sustav programiranja kod kojeg operater mora postupkom programiranja „naučiti“ robota da obavi specifičnu zadaću. Kod „teach in“ metode, pomoću privjeska za učenje robotom se

upravlja do određenih prostornih točaka koje se spremaju u memoriju zajedno s ostalim procesnim parametrima. Za programiranje kompleksnih zadataka ovom metodom potrebno je mnogo vremena, a robot je pri tome izdvojen iz proizvodnje, što nije poželjno. Kod „off-line“ metode koriste se odgovarajući računalni software-i pri čemu fizički pristup robotu nije potreban i ne mora se izdvajati iz proizvodnog procesa.

Upravljački sustav jednostavnog industrijskog robota interpretira i prerađuje zadani program te generira vrijednosti zglobnih kuteva, brzina i ubrzanja, ali i drugih signala, ovisno o vrsti robota i primjeni te posredstvom energetskog i mehaničkog sustava „tijelo“ robota izvršava zadaću, a izlazne vrijednosti koje bilježi mjerni sustav se u sklopu povratne veze vraćaju u upravljačku jedinicu, s tim da je danas u primjeni pretežno prisutno nezavisno, interno upravljanje zglobovima, slika 15.



Slika 15. Pojednostavljeni primjer upravljanja industrijskim robotom [25]

Energetski sustav odnosi se na vrstu pogona koji se koriste za pokretanje robota. Pogoni mogu biti hidraulični, pneumatski, hidropneumatski i električni.

Mehanički sustav robota sačinjavaju sve mehaničke komponente od kojih je izgrađen poput: segmenata, osovina, vratila, prijenosnika gibanja, momenata i slično.

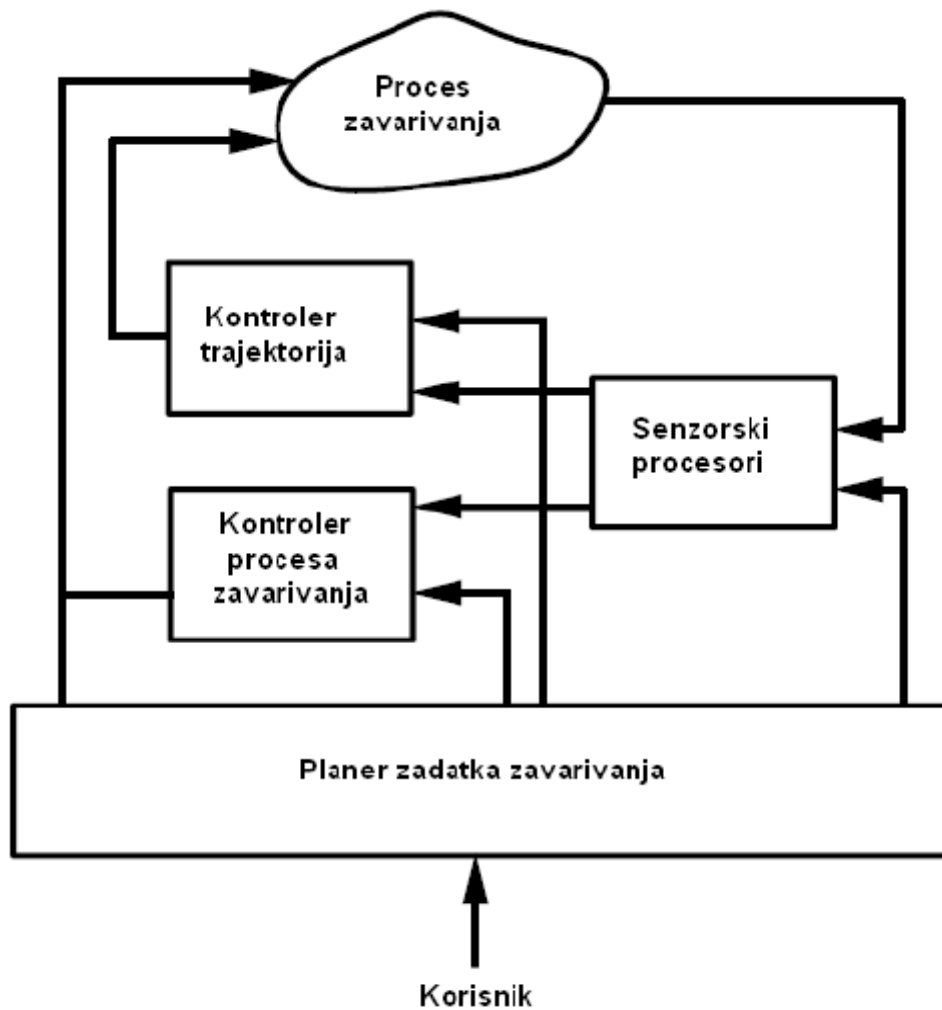


Mjerni (senzorski) sustav se dijeli na senzore unutarnjeg stanja i senzore vanjskog stanja. Senzori unutarnjeg stanja služe za mjerenje položaja, brzine te sile, odnosno ubrzanja. Senzori vanjskog stanja najviše ovise o specifičnoj primjeni robota i mogu biti različiti: mehanička ticala, matični senzori dodira, ultrazvučni, infracrveni, vizualni senzori, itd.

## **5.2. Programiranje robota za zavarivanje**

Ovaj se proces najčešće naziva "učenje" robota. Robot za zavarivanje je potrebno isprogramirati za obavljanje često složenih i teških zadataka zavarivanja gdje su putanje robota u pravilu vrlo nelinearne. Razlikujemo dva ključna pojma: putanja i trajektorija. Pod pojmom putanja se podrazumijeva krivulja koja dovoljno točno definira prostorne pozicije i orijentacije alata. Trajektorija definira promjene brzine i ubrzanja duž putanje zavarivanja. Kretanje vrha alata može biti od točke do točke ili kontinuirano, po linearnoj ili kružnoj putanji.

Da bi robotizirani postupak zavarivanja bio kvalitetan, nužno je da se robot može prilagoditi određenim promjenama u uvjetima i okolini zavarivanja te izvršiti odgovarajuću reakciju u vidu korekcije gibanja ili čak parametara procesa, a to se postiže adaptivnim upravljanjem procesa. Struktura adaptivne kontrole temelji se na modulima koji imaju određene zadaće i koji međusobno komuniciraju, slika 16.



**Slika 16. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim procesom zavarivanja [26]**

U svijetu industrijskih robota danas postoje tri vodeća načina programiranja robota: Off-line, On-line, i hibridno (miješano) programiranje, kao kombinacija prije navedenih.

### **5.2.1. On-line metoda programiranja**

On-line metoda programiranja provodi se na radnom položaju robota te ga je u skladu s tim potrebno isključiti iz proizvodnje. Glavna vrsta on-line programiranja je tzv. „teach in“ programiranje, a dijeli se na izravno i neizravno.

Izravno učenje odvija se na način da operater ručno vodi robota po putanji pri čemu se ključne točke, odnosno pozicije, spremaju u memoriju, što omogućuje robotu da kasnije ponovi gibanje. Ovaj način programiranja je zastario i stoga se danas vrlo rijetko koristi u industriji, pa tako i u okviru tehnologije zavarivanja. Kod neizravnog operater koristeći tipke na upravljačkoj ploči vodi robota po željenoj putanji spremajući u memoriju pozicije, ali i druge

procesne parametre poput napona, jakosti struje, brzine zavarivanja i slično. Već dvije spremljene točke predstavljaju program. Nakon izvršenog učenja provodi se testiranje programa s ciljem provjere da li će robot dosljedno interpretirati i izvršiti zadani program.

Prednost ove metode programiranja jest da nije potrebna dodatna nabavka softwera i hardwera, lako se uči pa nije potreban visoko obrazovani kadar ljudi. S druge strane, mane su mu da za vrijeme programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju. Uzme li se u obzir da u pogonu zna biti i više robota to je jako dugotrajna metoda [27].

### ***5.2.2. Off-line metoda programiranja***

Riječ je o programiranju koje se vrši na računalu i ne zahtijeva fizičko kretanje robota koji se stoga ne izdvaja iz proizvodnog procesa, što je ekonomski pogodno i predstavlja temeljnu prednost u odnosu na „teach in“ programiranje. Smisao off-line programiranja je u projektiranju što većeg broja tehnoloških procesa na zasebnom radnom mjestu, neovisno o robotu i u što kraćem roku.

Današnji programski paketi za off-line programiranje povezuju konstruiranje proizvoda s projektiranjem pojedinačnih robotskih stanica, robotiziranih sustava i simulacijom proizvodnog procesa. Kod projektiranja tehnologije zavarivanja, grafičkom simulacijom u takvim paketima se generira „kod“ programa za robota[27].

### ***5.2.3. Hibridna (mješovita ) metoda programiranja***

Osnovno svojstvo ove metode programiranja jest da se dio programa vezan uz skup točaka u prostoru, odnosno putanje pištolja, zadaje on-line metodom, čime se implementiraju neke od prednosti te metode programiranja kao što su zadavanje točki pozicija relativno s obzirom na izradak pod vizualnim promatranjem operatera u realnom prostoru, kao i kolizijska provjera na samom mjestu. Dok se dio programa vezan uz operacijski tok, odnosno značajke zavarivanja, provodi off-line čime se ostvaruju određene uštede jer, iako je ukupno trajanje programiranja nešto duže nego što bi to bio slučaj kod cjelovitog on-line programiranja, vremenski dio koji otpada na on-line fazu je opet kraći od trajanja potpune on-line metode, što jasno sugerira da je pri tome robot manje vremena izdvojen iz proizvodnje te su manji ekonomski gubici. Dakle, u okviru on-line dijela pomoću upravljačke konzole robot se vodi

po stazi i memoriraju se točke položaja. U off-line dijelu se, uz zapamćene točke pozicija, izrađuje program za zavarivanje[27].

### **5.3 Primjena senzora kod robotiziranog zavarivanja**

Senzori su uređaji za mjerenje određenih parametara u okolini robota koji posredstvom povratne veze u sklopu upravljačke strukture omogućavaju robotu da se adaptira odnosno prilagodi novonastalim uvjetima. Kod robotiziranog zavarivanja se prema tome primjenjuju senzori za mjerenje parametara svojstvenih tehnologiji zavarivanja kako bi se mogao postići proces koji odgovara traženim zahtjevima u okviru WPS-a (Welding Procedure Specification) i u skladu s time kvalitetan zavareni spoj.

Primjena senzora paralelna je zahtjevima za točnošću procesa. Drugim riječima, ako se proces zavarivanja može održavati kvalitetnim i produktivnim uz manju primjenu senzora i jednostavniju upravljačku strukturu te ako se uzme u obzir i skupocjenost pojedinih senzora, tada će to biti optimalno rješenje. TIG postupak zavarivanja se najčešće robotizira iz više razloga: zbog svestranosti primjene u industriji, pogodnosti opreme za robotizaciju, ali i zbog ekonomskih razloga po pitanju primjene senzora. Naglasak na senzorskom sustavu je i kod zavarivanja s velikim brzinama, a veća se točnost procesa općenito traži kod izradaka manjih dimenzija i s uskim tolerancijama, što je posebno izraženo kod robotiziranog laserskog zavarivanja.

Generalno se senzori kod robota za zavarivanje mogu podijeliti na senzore za tehnološke parametre i senzore za praćenje žlijeba i zavarenog spoja.

Senzori prve skupine mjere tehnološke parametre procesa zavarivanja važne za njegovu stabilnost i koriste se za svrhe praćenja i kontrole. Senzori druge skupine se uglavnom primjenjuju za traženje žlijeba i praćenje linije zavarivanja te omogućuju robotu da korigira putanju ukoliko se jave geometrijska odstupanja, ali i za praćenje slobodnog kraja žice, taline te skrutnutog zavara.

Senzori za mjerenje tehnoliških parametara:

Mjerenje napona – u pravilu vršiti što je moguće bliže električnom luku. Struja preko kontaktne cjevčice ulazi u elektrodu odnosno žicu, ali i u razmaku od kontaktnog dijela, pa do vrha žice javlja se pad napona od, otprilike, 0,3 V, ovisno o karakteristikama procesa.

Mjerenje jakosti struje – za takvo mjerenje se koriste dvije vrste senzora za mjerenje jakosti struje, a to su senzor na principu Hallovog efekta, koji se sastoji od željezne jezgre kroz koju prolazi vodič sa strujom te shunt, gdje struja prolazi kroz statički otpornik pri čemu se mjeri vrijednost napona iz kojeg se potom izvodi jakost struje.

Mjerenje brzine dovođenja žice - Iako se za definiranje procesa obično zadaju parametri napona i jakosti struje, u stvarnim uvjetima jakost struje je posljedica određene brzine dovođenja žice. Porastom brzine dovođenja žice raste jakost struje i dolazi do bržeg trošenja elektrode, smanjenjem brzine dovođenja opada jakost struje, a s njome i brzina taljenja elektrode [28].

Senzori za mjerenje napona i brzine dovođenja žice odnose se na MIG postupak.

Senzori za praćenje žlijeba i putanje zavarivanja

Ovi senzori služe robotu u svrhu traženja i praćenja žlijeba te putanje zavarivanja za vrijeme procesa zavarivanja.

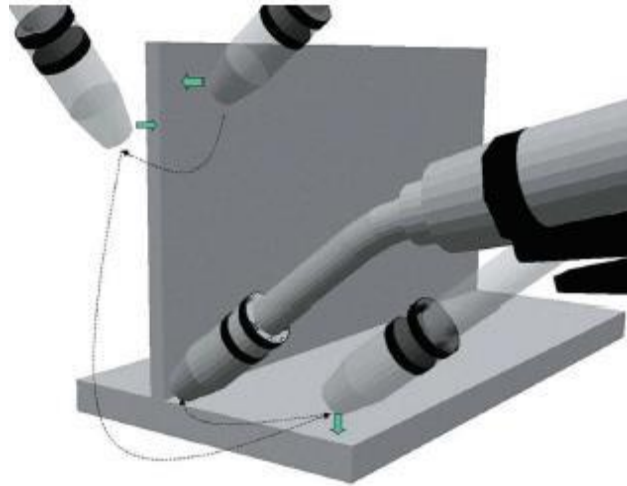
Mehanički senzori

Ova vrsta senzora koristi igličaste, kuglaste ili valjkaste senzore za detekciju radne površine i poziciju pripreme zavara. Nedostatak im je što se mogu primijeniti samo kod priprema zavara većih dimenzija i ograničeni su na detekciju samo ravnih zavara.

Električni senzori

Električni senzori uz pomoć dodatnog napajanja spojenog na metalnu sapnicu i taljivu elektrodu pomiču se do radnog komada sve do trenutka kada ga dodirnu.

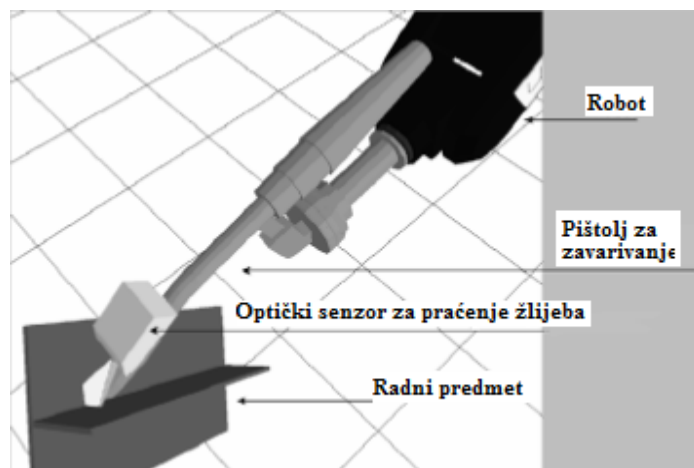
U trenutku kada sapnica ili elektroda dođe u kontakt s radnim komadom električni krug se zatvara u točki dodira kratkog spoja, a signal se prosljeđuje do kontrolne kutije koja određuje točnu koordinatu gdje je nastao kratki spoj, slika 17.



**Slika 17. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [28]**

### Optički senzori

Optički senzori prate žlijeb tijekom procesa zavarivanja projiciranjem i cikličkim njihanjem laserskog snopa, u ravnini okomitoj na liniju zavara i os skeniranja, koji se reflektira prema CCD kameri. Primljeni analogni signali se pretvaraju u digitalne iz kojih se potom definiraju geometrijske značajke spoja te se vrši potrebno korigiranje položaja i orijentacije. Senzor je spojen tako da se nalazi na prednjem dijelu pištolja i skenira područje ispred samog električnog luka.



**Slika 18. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [22]**

Vrijeme procesa zavarivanja optički senzor vrši triangulacijsko skeniranje u ravnini okomitoj na liniji zavarivanja i na taj način dobiva 2D sliku geometrije žlijeba u obliku mreže 2D koordinata.

Optički senzor za praćenje žlijeba obično u potpunosti kompenzira izmjerene greške u položaju. Ispravljanje se uglavnom odvija pri zavarivanju po zadanoj, nominalnoj putanji pri čemu robot samo korigira greške u položaju, točnije robotski kontroler prima podatke o novim položajima od senzora i modificira putanju mijenjajući koordinate TCP-a uz zadržavanje iste orijentacije. U ovom slučaju problemi vezani uz ograničenja zglobova, singularnosti i eventualne kolizije, ali nedostatak leži u činjenici da korisnik mora programirati putanju. Nasuprot tome, ako se robotu ispostave samo početna i završna točka, prisiljen je stvarati putanju samo na osnovi informacija iz senzora, što zahtijeva modifikacije položaja, ali i orijentacije, pa su prisutne opasnosti od dinamički singularnih područja, ograničenja zglobova i mogućih kolizija s predmetima iz okoline.

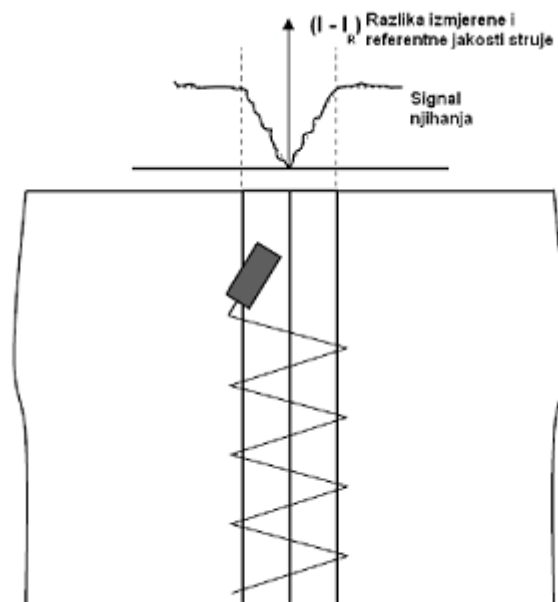
Ipak, primjenom odgovarajućeg filtriranja te generiranjem polinomnog i vektorskog opisa putanja zavarivanja praćenje nenominalne, kompleksne trajektorije je izvedivo.

#### Električni luk kao senzor

Na ideju električnog luka kao senzora došlo se još 1980. godine. Bit je da se njihanjem odnosno variranjem udaljenosti između vrha žice i predmeta praktično iskoriste izmjerene promjene jakosti struje koje posljedično nastaju.

Praktična korist pronašla se upravo u praćenju linije zavarivanja. Pojednostavljeno rečeno, ako nema devijacije praćenog žlijeba od pretpostavljene putanje u okviru procesa zavarivanja, tada izmjerena jakost struje u središnjoj točki njihanja mora biti jednaka nominalnoj (referentnoj), odnosno jakosti struje kod savršeno centriranog pištolja u odnosu na žlijeb, dakle razlika tih dviju jakosti mora biti jednaka nuli, slika 19. U slučaju pojave devijacije, središnja linija ili os njihanja se više ne poklapa sa središnjom osi spoja, što znači da se u točki na osi njihanja smanjila udaljenost vrha žice od izratka i ujedno povećala jakost struje koja je sada veća od referentne. I ostalim točkama na krivulji njihanja se pri tome promijenila vrijednost jakosti struje i ne odgovara onima u slučaju centriranog položaja. Na osnovi ovih informacija generira se novi položaj i šalje robotskom kontroleru koji korigira gibanje i kompenzira devijaciju.

Za usporedbu električni luk ima znatno manju točnost kod praćenja, a razlog tome leži i u signalnoj buci koju proizvode uvjeti koji su prisutni u samome luku. Isto tako, „vidno polje“ mu je ograničeno njihovim i ne može izvršavati funkcije traženja žlijeba na razini na kojoj to obavlja optički senzor, no s druge strane je svojstva poput praktičnosti, jednostavnije opreme, neopterećivanja pištolja, niske cijene u kombinaciji s širokom primjenom, stavljaju veliki naglasak na postojeću vrijednost, ali i potencijal ovog jednostavnog senzora [28].



**Slika 19. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [28]**



## 6. Kontrola i osiguranje kvalitete kod zavarivanja

Kontrola i osiguranje kvalitete zavarenog spoja su nedjeljivi poslovi u svim fazama nastajanja i eksploatacije zavarenog spoja. Osnovna zadaća im je da stvore uvijete za nesmetano izvođenje zavarenog spoja, a ne otkrivanje niti otklanjanje pogrešaka nastalih u zavarenom spoju. U svim fazama gdje se vodi računa o kakvoći zavarivanja, kao njegov sastavni dio treba biti ugrađen postupak kontrole zavarenog spoja u procesu njegovog nastajanja, jer zavareni spojevi kao elementi moraju osigurati dovoljnu razinu pouzdanosti.

Postupci kontrole se dijele u 3 karakteristične faze, to su : prije početka zavarivanja, tokom izvođenja postupka zavarivanja i nakon završenog zavarivanja.

Kontrola prije zavarivanja iziskuje naročitu pozornost, jer su u većem dijelu bili znatno zanemareni. Tu su kontrole: osnovnog i dodatnog materijala, tehnološkog redoslijeda zavarivanja, postupka zavarivanja, zavarivača, strojeva i uređaja, izvođenja i temperature predgrijavanja i dr.

U tijeku zavarivanja pozornost treba obratiti na savjesno izvršavanje postupka jer će njima u najvećem dijelu ovisiti kvaliteta izvršenog zavarivanja. Zbog takvog rada među fazne kontrole, razorna kontrola mora biti samo nužna potvrda da je zavarivanje izvršeno besprijevano.

Treba samo napomenuti da se preskakanje i izostavljanje operacija kontrole može vratiti na najneugodniji način, u obliku pogreške u zavarenom spoju. Kontrole koje se tu izvršavaju su: pripajanja, postupka zavarivanja, redoslijeda parametara i ostalih uvjeta zavarivanja te kontrola zavarivanja posebnih detalja.

Ako su savjesno i dosljedno provedeni radovi iz prethodnih faza postupci kontrole nakon zavarivanja trebali bi biti samo propisani za dokazivanje kvalitete izvedenog posla. Tu se vrše kontrole: vizualne, površinske obrade zavarenog spoja, nerazorna kontrola, mjerenje ukupne deformacije, uzoraka razaranjem itd.

Dalje gledajući kontrola kvalitete nakon zavarivanja može se podijeliti na kontrolu kvalitete metodama bez razaranja i kontrolu kvalitete metodama s razaranjem.

Nerazorna kontrola zavarenog spoja je kontrola koja svojim djelovanjem ne utječe na svojstva zavarenog spoja. Pošto služe samo za otkrivanje i određivanje podpovršinskih pogrešaka u zavarenom spoju obrađenih euro normama EN 26520 imaju naziv i defektoskopija. To je samo jedan mali dio od velikog broja korištenih metoda koje se koriste u nerazornom ispitivanju materijala. Nedostatak ove metode je da se njome otkriva i određuje pogreška koja

je nastala prije njenog provođenja. Ne može poslužiti u izravnom sprečavanju nastajanja pogrešaka.

Metode kontrole bez razaranja su: vizualna kontrola, dimenzijska kontrola, penetrantska kontrola, magnetska kontrola, ultrazvučna kontrola, radiografska kontrola, akustična kontrola i ostale [29].

### 6.1. Vizualna kontrola

Vizualnom kontrolom se mogu otkriti razne površinske pogreške: veće pukotine, neprovaren korijen, površinske poroznosti, te nepravilnosti oblika lica i korijena zavora. Ako se izuzme sami čin zavarivanja vizualna kontrola je najvažniji i najbitniji čimbenik u nastajanju zavarenog spoja. To je jedina od svih metoda nerazorne kontrole koja može uočiti, predvidjeti uzrok i mjesto nastajanja pogreške. Zbog toga vizualnoj kontroli treba pridati prvenstveno značenje među svim nerazornim kontrolama. Za vizualnu kontrolu površina treba biti čista, a svijetlost dovoljno jaka. Ta metoda kontrole relativno je jeftina, ne oduzima puno vremena, a može dati vrlo korisne informacije kako o kvaliteti zavarenih spojeva, tako i o potrebi kontrole nekom drugom metodom.



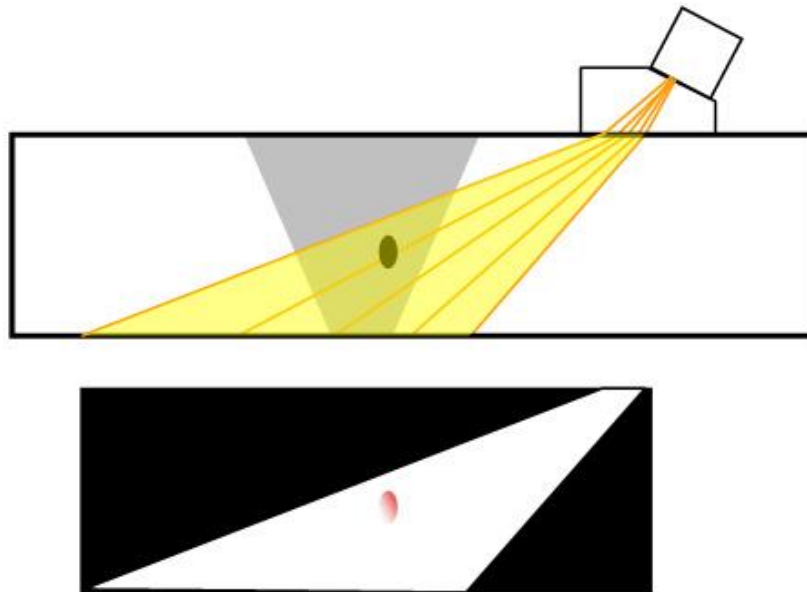
Slika 20. Mikroskop leica MZ6 [29]

## 6.2. Ultrazvučna kontrola

Kroz materijal se šalju zvučni valovi određenog spektra frekvencije.

Od izvora ultrazvuka šire se ultrazvučni valovi kroz materijal koji se kontrolira. Ako u materijalu postoji greška, iza nje će, ovisno o vrsti greške, ultrazvučni valovi oslabiti ili se neće pojaviti jer se odbiju od greške. Prednosti ove metode su da nije bitna debljina predmeta, pristup je samo s jedne strane, okolina nema utjecaja na metodu i uređaj je prenosiv.

Nedostaci su da složeni oblici mogu biti nepogodni za provođenje i uvježbavanje operatora je dugotrajno.



Slika 21. Ultrazvučna kontrola [30]

## 6.3. Magnetska metoda

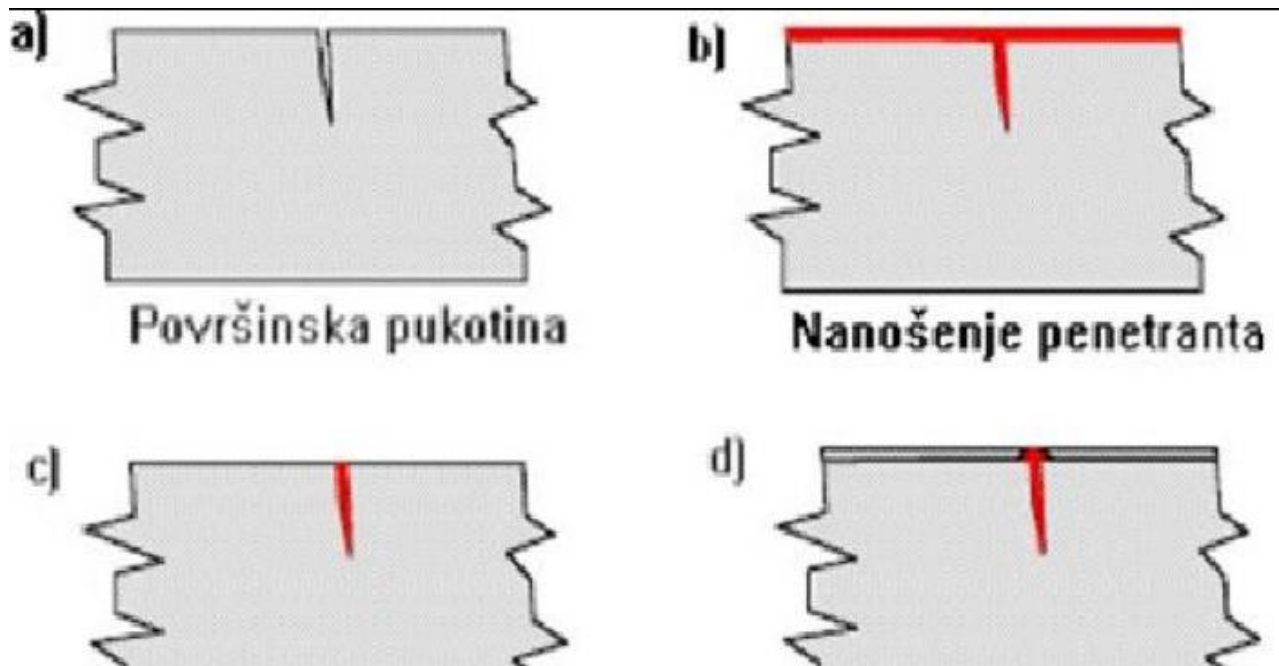
Površinske pukotine na materijalima koji se mogu magnetizirati dobro se otkrivaju nanošenjem magnetnih čestica. Otkrivanje pukotina se temelji na povećanom magnetskom otporu za magnetske silnice na mjestu pukotine. Najraširenije su u praktičnoj uporabi jer imaju relativno nisku cijenu i jednostavan postupak. Pomoću njih se najlakše otkriju pogreške tipa pukotine, zareza i većih uključaka naročito onih uz ili blizu površine pregleda. Nedostatak im je što ne određuju sve dimenzije pogreške niti mogu djelovati duboko.



**Slika 22. Izvođenje magnetske kontrole u radionici na zavaru [30]**

#### **6.4. Penetratska metoda**

Osnova korištenja je u svojstvu tekućina koje su pretežno osnovane na lakim uljima i nazivaju se penetratima. Njihov zadatak je da prodiru u šupljine i ispune ih. Nakon toga se izvlače iz šupljine na pogodan način i ako ga uspijemo učiniti vidljivim, stvaraju se uvjeti za penetrantsku metodu kontrole. Ova kontrola se često koristi kod kontrole zavarenih spojeva na konstrukcijama. Postupak ispitivanja kod penetrantske metode prikazan je na slici 23.



**Slika 23. Postupak ispitivanja penetratskom metodom [28]**

Prednost ovakve metode je da je to jako jednostavna metoda, dobra je vidljivost šupljina na površini, primjenjiva je metoda na svim materijalima, nema potrebe za velikom stručnošću i cijena je relativno niska. Nedostaci su joj: kvaliteta ovisi o stanju površine, moguća je uporaba samo na odgovarajućim temperaturama, mora imati zaštitu od atmosfere i ne primjenjuje se za proizvode u prehrambenoj industriji.

#### Metode kontrole s razaranjem

- Metoda razaranja se koristi kod ispitivanja tvrdoće, kemijskog sastava, i strukture zavarenih spojeva. Provjera mehaničkih i antikoroziivnih svojstava ima za cilj osiguranje pouzdanog rada zavarenog spoja. Metode kontrole razaranjem su: vlačno kidanje epruvete, mjerenje tvrdoće, ispitivanje udarne žilavosti, korozivna i dinamička ispitivanja, radioničke probe zavarljivosti i tlačne probe s razaranjem.

## **7. Eksperimentalni dio**

### **7.1. Uvod**

U eksperimentalnom dijelu prevedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom čelika zavarenog TIG postupkom zavarivanja, na limu debljine 0,8 mm u zaštitnoj atmosferi čistog argona.

TIG zavarivanje kućišta koristi se na nehrđajućim materijalima – inox limovima, debljine 0,8 mm. Koristi se netaljiva tirkizna volframova elektroda sa zašiljenim vrhom, Ø1,6 mm x 175 mm ili Ø2,4 mm x 175 mm, a aparat za zavarivanje je KEMPPI MasterTig 2000 MLS DC.

Za oba primjera opisać će se priprema uzorka za zavarivanje te postupak i uvjeti zavarivanja propisani normama (osnovni, dodatni materijal, položaj zavarivanja, parametri itd.). Oba, zavarena i gotova, ispitna uzorka su podvrgnuta normom zahtijevanim ispitivanjima, a po konačnim rezultatima ispitivanja bit će prikazano da li atesti zadovoljavaju.

### **7.2. Svojstva materijala**

Inox, W.Nr. 1.4301, je otporan na vodu, vodenu paru, vlažnost zraka, konzumne kiseline, kao i na slabe organske i anorganske kiseline i ima mnogostrane mogućnosti primjene, npr. u prehrambenoj industriji, proizvodnji pića, u mljekarstvu, pivovarama i podrumarstvu, farmakološkoj i kozmetičkoj industriji, brodogadnji, u izradi kemijskih aparata, arhitekturi, automobilskoj industriji, za kućanske predmete i aparate, sanitarne uređaje itd. Pokriva 70% uporabe i proizvodnje od svih austenitnih čelika.

W. Nr. 1.4301 je otporan na kiseline, koji je zbog niskog % ugljika interkristalinično otporan nakon zavarivanja kod debljine limova do 6mm i bez naknadne toplinske obrade. Dopusćen je za temperature do 300°C. Zavarivanje je dobro svim električnim postupcima. Plinsko zavarivanje se nesmiije primjenjivati. Inox ima vrlo dobru podobnost poliranja i dobru sposobnost preoblikovanja dubokim vučenjem, valjanjem itd. Prilikom rezanja INOX-a, W. Nr. 1.4301, potrebno je zbog tendencije ka hladnom učvršćivanju primijeniti oštro brušene alate iz brzoreznog čelika ili iz tvrdog metala. Osim relativno dobre otpornosti na koroziju, dobre plastične obradivosti i otpornosti na temperature do -200 C, imaju nešto stabilnije vrijednosti čvrstoće i tvrdoće uz povećanu istezljivost i malu toplinsku vodljivost. S obzirom da se ne može kaliti ta slabija svojstva nastoje se kompenzirati povećanjem udjela nekih legiranih dodataka.

W.Nr. 1.4571 je austenitni čelik (inox), otporan na kiseline, stabiliziran titanom. Dopušten je za temperature do 400°C. Uslijed dodatka (Mo), pokazuje veću otpornost na kiseline. Zbog stabiliziranja s (Ti) nije potrebna toplinska obrada nakon zavarivanja većih debljina. Zavarivanje je dobro svim električnim postupcima. Plinsko zavarivanje se ne smije primjenjivati. Kod ovog čelika poliranjem se ne može postići visoki sjaj zbog dodatka (Ti). Oblikovanje dubokim vučenjem, valjanjem itd. je dobro. Kod rezanja je zbog tendencije ka hladnom učvršćivanju potrebno primjenjivati oštro brušene alate iz brzoreznog čelika ili iz tvrdog metala.

Inox W.Nr. 1.4571 (nehrđajući čelik) je prikladan za izradu dijelova konstrukcija, uređaja i aparata za kemijsku industriju, posebno pri uporabi medija sa sadržajem halogena i neoksidirajućih kiselina, gdje kvaliteta bez molibdena više nije dovoljna. Viša granica razvlačenja je prednost kod konstrukcija i elemenata s višim mehaničkim zahtjevima.

### **7.3. Priprema materijala i spoja**

Tesni uzorci su limovi WNR 1.4301 i WNR 1.4571 koji se nalazi u kolutu širine 138.9 mm . Nakon što je odabran osnovni materijal, izrezana su dva uzorka dužine 150 mm. Na hidrauličkoj preši oštancana je platina kućišta, slika 24.



**Slika 24. Hidraulična preša**

Nakon štancanja limovi se ravnaju na ravnalici Weber. Ravni limovi se stavljaju u alat za oblikovanje da bi dobili geometriju kućišta. Površine oba komada su morale biti bez korozije, masnoća i ostalih nečistoća da bi se zavar mogao što kvalitetnije zavariti, da zavareni spoj ne

bi imao uključke i naljepljivanje, zbog toga se prije zavarivanja limovi stavljaju u kadu za ultrazvučno pranje i sušenje, slika 25.



**Slika 25. Ultrazvučna kada**

Nakon oblikovanja dobije se kućište otvoreno sa jedne strane. Ono se stavlja u steznu napravu za zavarivanje, naprava pritiskom na dvije stranice kućišta približava lim da dobili zonu spoja koja je opisana u četvrtom poglavlju, slika 26.



**Slika 26. Stezna naprava za zavarivanje**



#### 7.4. Zavarivanje

Pošto imamo dva različita materijala, imamo i različite parametre.

Materijal WNR 1.4301

Zaštitni plin – Argon 5,0 (čistoće 99,999%);

Jačina struje 39-45 A.

Materijal WNR 1.4571

Zaštitni plin - Argon 5,0 (čistoće 99,999%);

Jačina struje 48-60 A.

Dimenzije zavara određuju se prema vrsti kućišta. Grubo podešavanje vrši se na napravi za zavarivanje, a fino na samom aparatu za zavarivanje. Kvaliteta zavara podešava se povećavanjem ili smanjivanjem jakosti struje (A), što direktno utječe i na širinu zone taljenja (zavar – ZT) ali najviše  $\pm 0,05\text{mm}$  a što utječe i na širinu tijela kućišta.



Slika 27. TIG zavarivanje

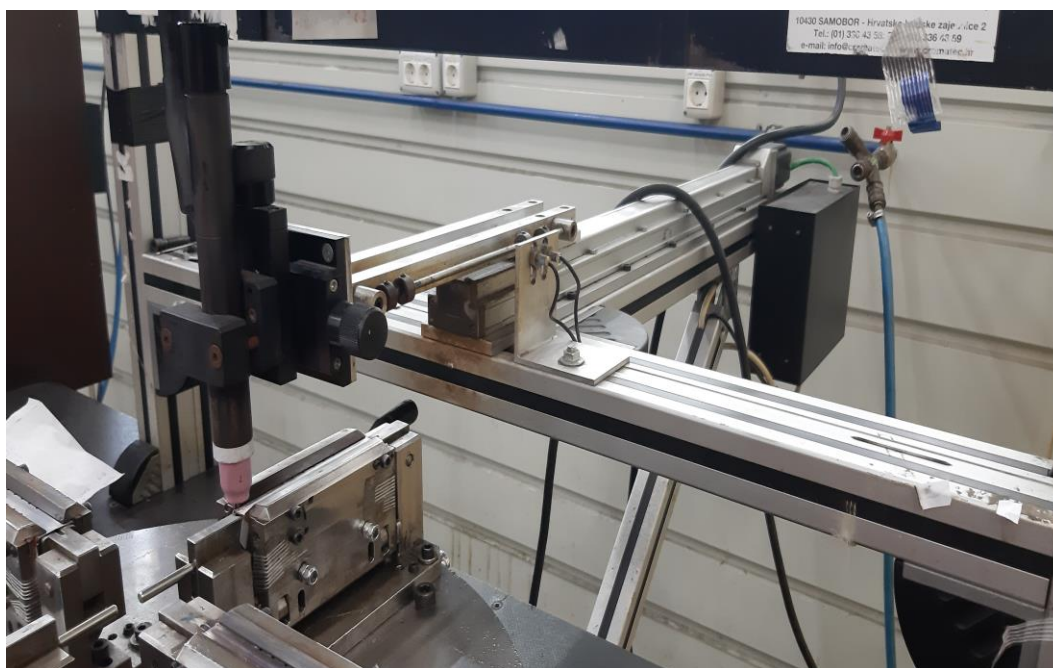
Zavarivanje počinje uspostavom električnog luka pomoću iskre između vrha elektrode i radnog komada. Zavarivanje teče ravnomjerno počevši od usta kućišta prema krilcima ili od krilaca prema ustima (na kućištima gdje su velike sile naprezanja nastale deformiranjem). Kućište je postavljeno na napravu u vodoravnom položaju. Zavarivanje se obavlja polu-automatski, tj zavarivač samo poslužuje napravu sa pripremljenim kućištima i po završetku zavara, kućište odlaže, te postavlja novo. Prije početka zavarivanja, zavarivač je dužan očistiti područje zavarivanja (platnenom rukavicom). Električni luk se prekida 0,5-2 mm prije krajnjeg ruba kućišta što se može podesiti instaliranim software-om točnosti podešavanja od 0,1 mm. Brzina zavarivanja je 0,4 m/min.



**Slika 28. Programiranje robota**



**Slika 29. TIG aparat Kempfi**



**Slika 30. TIG robot za zavarivanje**

Proces je stabilan, sa preciznim održavanjem parametara zavarivanja, odvija se u zatvorenom prostoru, a radnik ne treba imati posebnu zaštitnu opremu (osim rukavica). Sama naprava i postupak izvođenja je pod zaštitnom navlakom. Ovo je jedan od najsigurnijih načina zavarivanja, bez štetnih djelovanja po radnika, bez troske i prskanja. Postupak je sa niskom razinom potrošnje energije i sa minimalnim nastankom plinova.

## **7.5 Kontrola i ispitivanje**

Istraživanje je provedeno u kontroliranim uvjetima, prema predviđenom slijedu eksperimenta, nakon strojne obrade uzoraka, na sljedeći način :

1. Vizualna kontrola
2. Dimenzionalna kontrola
3. Vlačno ispitivanje
4. Magnetsko ispitivanje

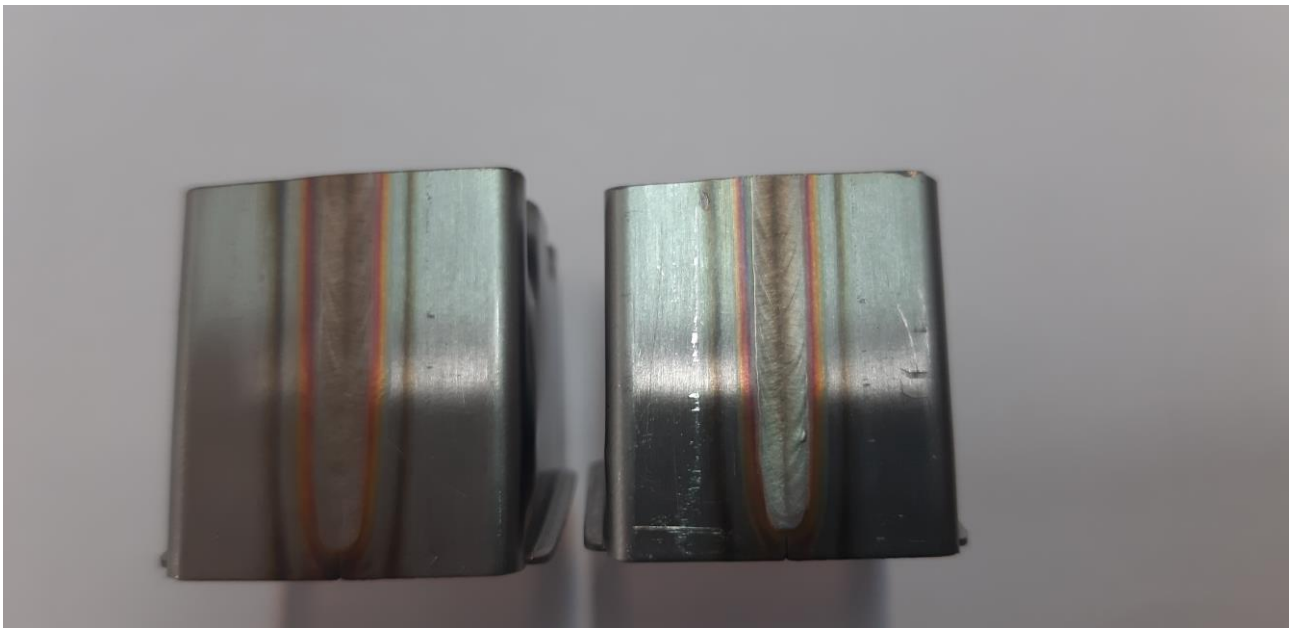
### **Vizualna kontrola**

Prvi vid kontrole koji se izvodi bi trebala uvijek biti vizualna kontrola. To je najjeftiniji oblik kontrole, potrebna je minimalna obuka za korištenje ove metode, minimalna priprema objekta, daje trenutno rezultate, a može dati korisne rezultate kako o stanju promatrane površine, tako i o potrebi ispitivanja nekom drugom metodom. Tehnike kontrole vizualnom metodom se dijele na direktne i indirektne. Oku nedostupnim mjestima se pristupa indirektno pomoću posebne opreme i vrši se vizualna kontrola. Nedostatak ove metode jest što je nju u principu moguće primjenjivati samo na velike površinske diskontinuitete. Također postoji veliki rizik od pogrešne interpretacije ogrebotina.

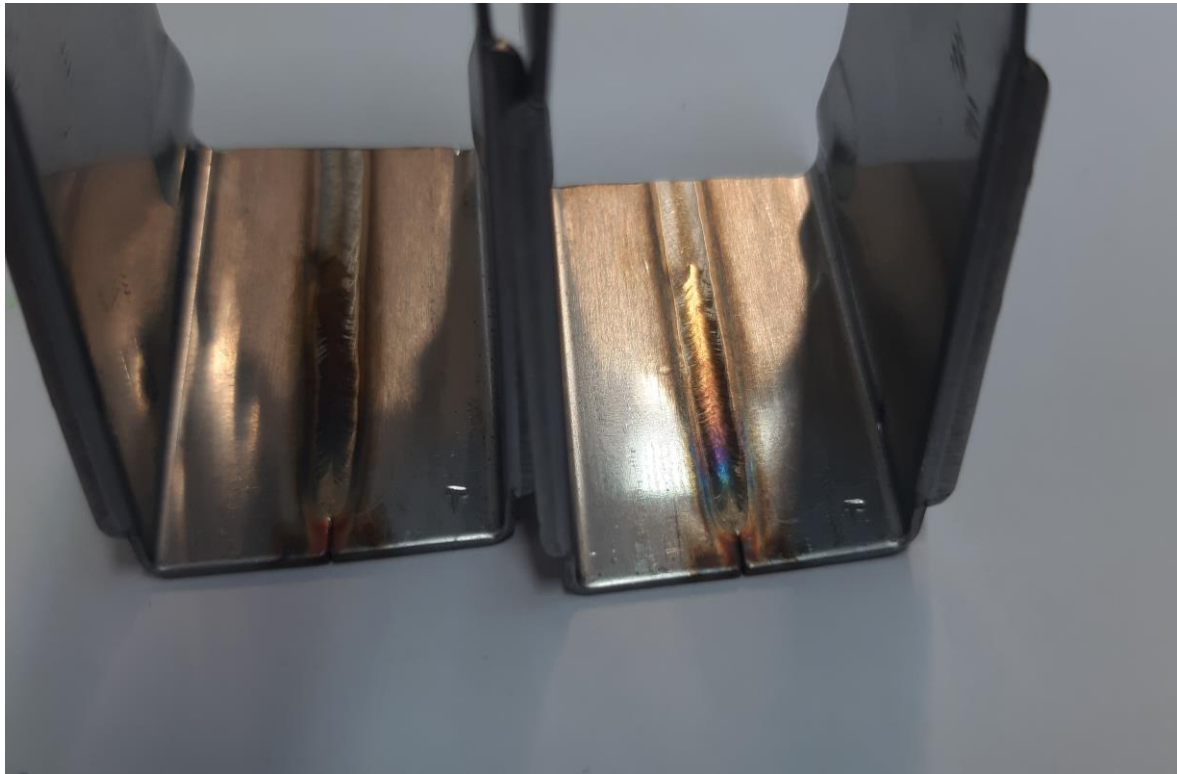
Oblik korijena zavara mora biti uredan, kućište mora biti zavareno i sa druge strane (unutarnje strane kućišta) tijekom cijele dužine. Zavar mora biti homogen, simetričan, bez prekida i bez pukotina. Širina zavara nije propisana, no širina mora biti ravnomjerna tijekom cijele dužine zavara i ne smije se prelijevati po kontrolnim rupama.

Zavarivač ima dužnost sam izdvojiti neadekvatna kućišta, bez obzira na operacije dimenzionalne i vizualne kontrole koja se izvodi naknadno. Prilikom početka novog kartona radnog naloga, radnik je dužan donijeti prva 4 (četiri) komada na provjeru kod pogonskog

kontrolora te, ukoliko su adekvatni nacrtu, pogonski kontrolor kontrolira operaciju PRVI KOMADI U PROIZVODNJI te radnik nastavlja raditi prema uspostavljenim (instaliranim) parametrima. Dodatnu kontrolu obavlja predradnik kada, tokom radnog vremena, nasumce izuzme 4 komada zavarenih tijela spremnika te, ukoliko su sukladni nacrtu, ovjerava operaciju ZAVARIVANJE KUĆIŠTA u rubriku OVJERA KONTROLE s vlastitim faksimilom. Vizualna kontrola primjenjuje se na svim komadima.



**Slika 31. Izgled zavara sa vanjske strane kućišta**



**Slika 32. Izgled vara sa unutarnje strane kućišta**

### **Dimenzionalna kontrola**

Dimenzionalna provjera je usko povezana uz vizualnu kontrolu. Ona se vrši pomoću različitih uređaja za mjerenje geometrije i dimenzija (pomično mjerilo). Dimenzionalna kontrola vrši se na svim uzorcima u nalogu.



**Slika 33. Dimenzionalno mjerenje pomičnim mjerilom**

## Vlačno ispitivanje

Nakon vizualnog pregleda komada, komadi se testiraju na UMO Umaralici. "Umo"-Umaralica je stroj za dinamičko mjerenje sile. Izveden je u svrhu testiranja i ispitivanja vlačne/tlačne karakteristike te detekcija promjene karakteristike odnosno puknuća pri testu. Pretvaranjem rotacijskog u pravocrtno gibanje uređaj razvlači i sabija, te prikuplja i prikazuje podatke o sili  $F$  (N) i hoda opruge  $S$  (mm).

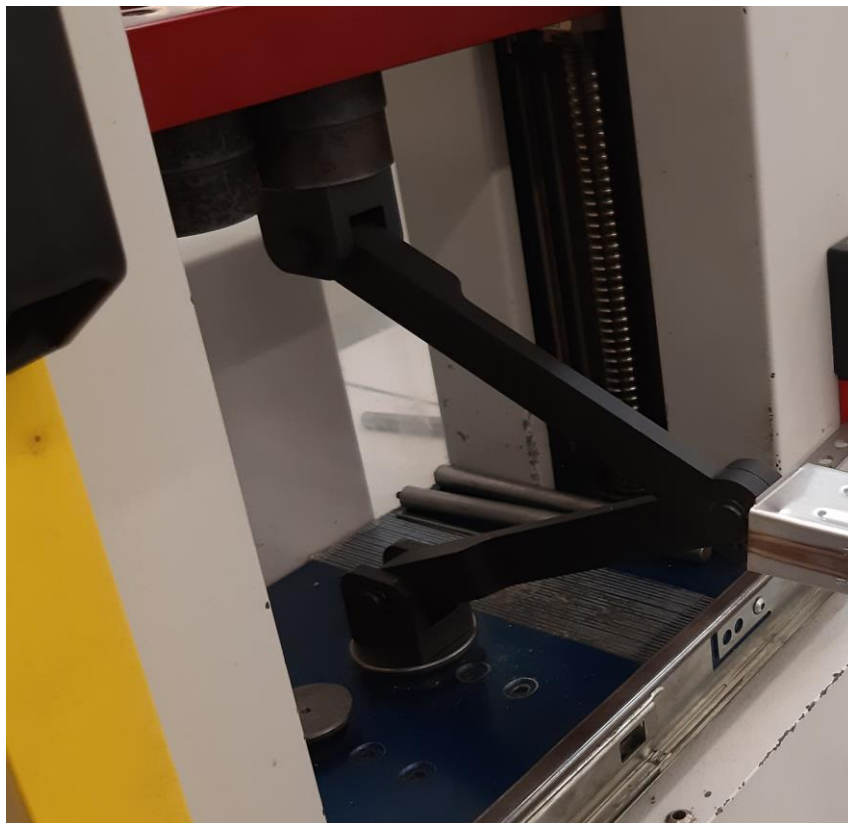


**Slika 34. Stroj za dinamičko mjerenje sile**

Na Umaralicu se montira priprema za stezanje kućišta. Kućište se umetne u stezne pakne pripreme. Umaralica se „nulira“ i odredni maksimalna sila, što je u našem slučaju 260 N. Priprema na unutrašnju stranu kućišta djeluje vlačnom silom da se ispituju mehanička svojstva zavara. Rezultati ispitivanja su prikazni grafovi.

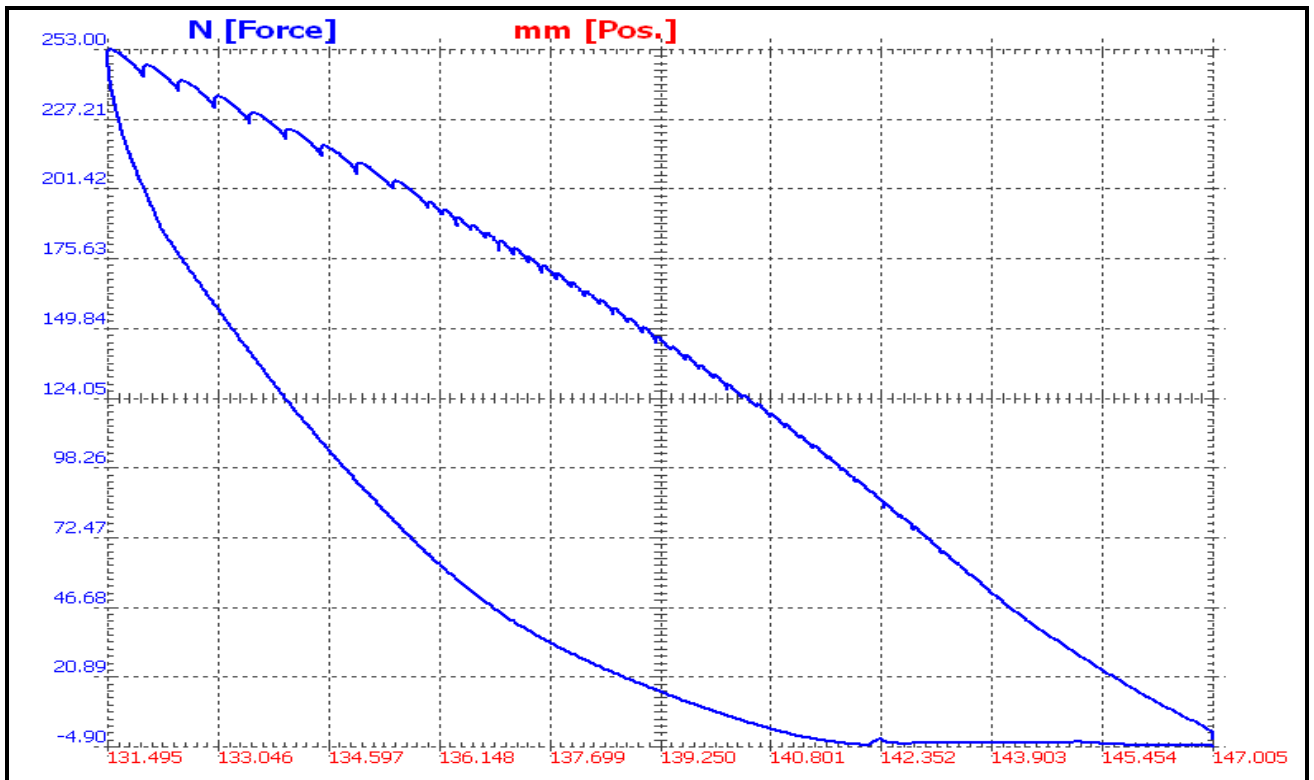


**Slika 35. Priprema za stezanje kućišta**

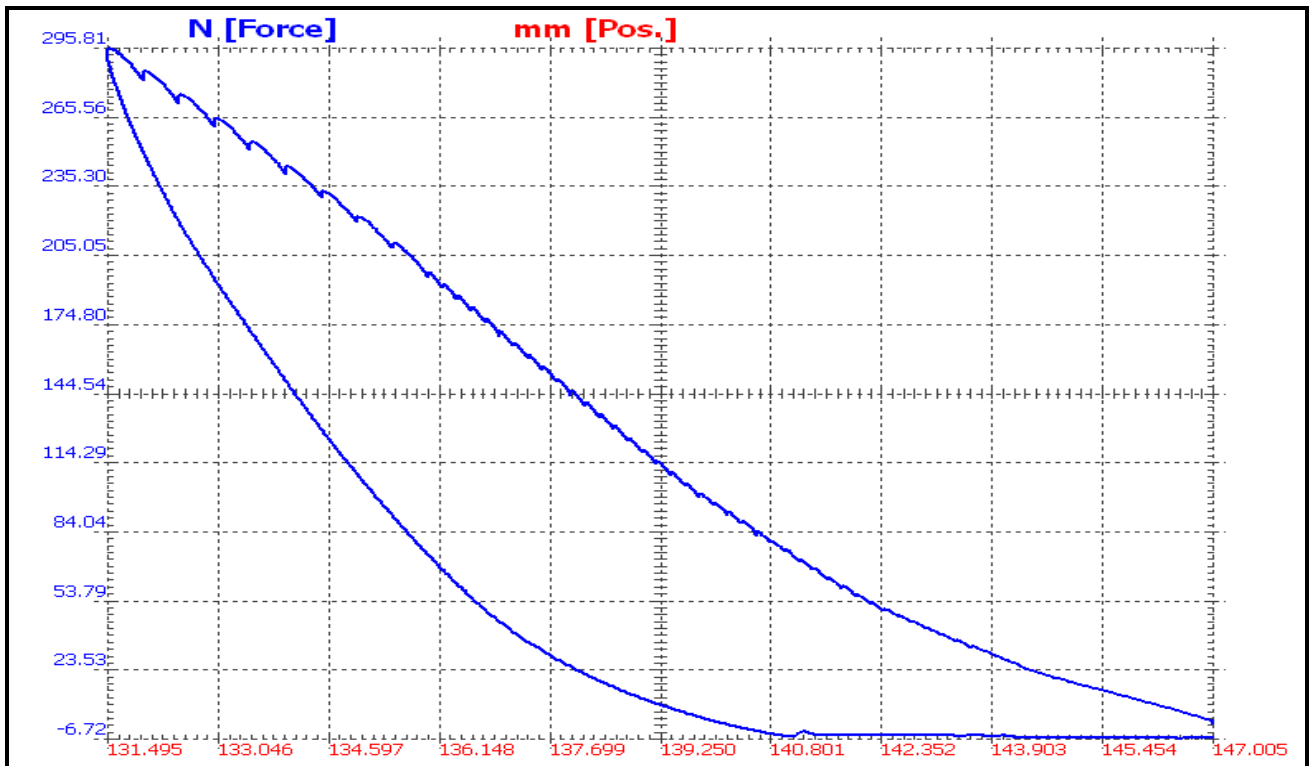


**Slika 36. Priprema sa kućištem**





Slika 37. Krivulja sile za materijal WRN 1.4301



Slika 38. Krivulja sile za materijal WRN 1.4571

Na grafovima vidimo ispitivanje zavora, sila je bila maksimalana, na zavaru nema nikakvih vidljivih puknuća niti promjena. Usporedbom vlačne čvrstoće dobivenih rezultata s vrijednostima na osnovnom materijalu, te time što je deformacija nastala u osnovnom materijalu, može se zaključiti da je vlačna čvrstoća metala zavora veća od osnovnog materijala, stoga se zavar može ocijeniti kao dobar.



**Slika 39. Deformacija materijala**

### **Magnetska metoda**

Magnetska metoda kontrole kvalitete koristi se za otkrivanje površinskih i podpovršinskih grešaka (približno do dubine 6 mm) kod feromagnetičnih materijala. Zasniva se na principu magnetske indukcije.



**Slika 40. Magnetoflux Tiede**

Oko vodiča kroz koji prolazi električna struja (magnetski jaram, magnetske elektrode) formira se magnetsko polje (istosmjerne ili izmjenične struje), čije silnice, po pravilu desne ruke, prolaze između ostaloga i kroz feromagnetični materijal koji se ispituje, odnosno koji je u kontaktu sa magnetskim jarmom ili magnetskim elektrodama. Da bi se otkrila pukotina potrebno je da smjer silnica magnetskog polja bude što više okomito na pukotinu.



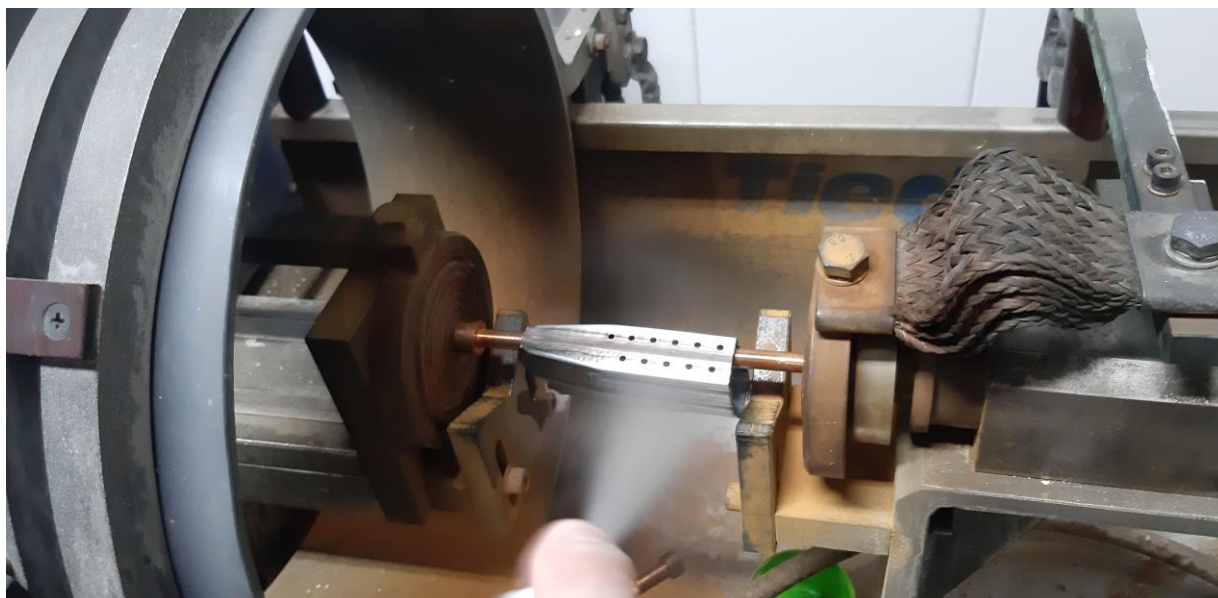
**Slika 41. Magnetski jaram**

Pospu li se magnetske čestice (suhe sitne čestice ili čestice pomješane sa vodom) po površini ispitivanog materijala, ako postoji pukotina okomito na smjer prolaska silnica magnetskog polja, sitne čestice će se okupiti oko pukotine.

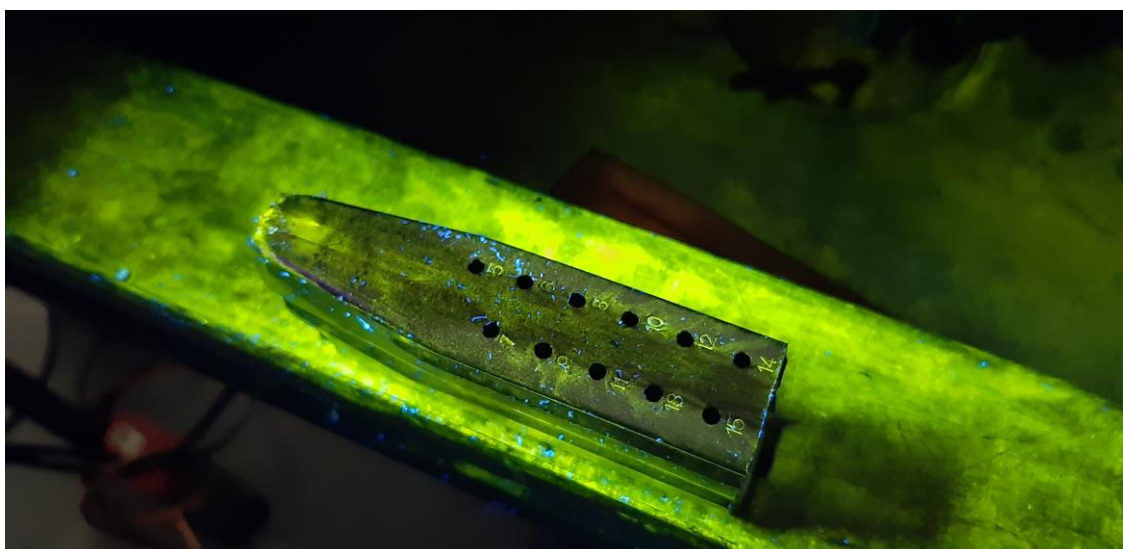


Slika 42. Magnetske čestice u spreju

Nakon nanošenja magnetskih čestica kućište se stavlja ispod UV lampe, da bi se detaljno pregledalo dali postoje pukotine. U nalogu od 1000 komada kućište kontroliraju se dva uzorka. Na oba uzorka nema tragova pukotina.



**Slika 43. Nanošenje magnetskih čestica**



**Slika 44. Pregled uz pomoć UV lampe**

Ova je metoda kontrole kvalitete jeftina i brza, ali ima ograničenje s obzirom na neferomagnetične materijale, greške duboko ispod površine, te nemogućnost određivanja dubine pukotine koja je otkrivena kod feromagnetičnih materijala.

## 8. Zaključak

Zavarivanje kao jedan od najraširenijih i najčešće primjenjivanih postupaka spajanja materijala svuda je oko nas. Još kroz povijest ljudi su tražili najlakši i najjednostavniji način spajanja metala, a to se sve prenosi i do danas. Porastom tehnologije i modernizacijom, ljudi traže brza i učinkovita rješenja i na području zavarivanja. Napretkom tehnoloških rješenja napredovalo je i područje zavarivanja materijala, a sve iz razloga da se u što kraćem roku uradi što više proizvoda. Tu se javlja pitanje kvalitete istih jer nerijetko je slučaj da povećanje kvantitete automatski znači i nedostatak kvalitete. Zato se u području zavarivanja javljaju visokoučinski postupci zavarivanja koji zavaruju veliki broj konstrukcija u najkraćem mogućem periodu.

Međutim uvođenjem automatiziranog sustava, odnosno robota u sam proces ( industrijski robot ) smanjuje se potražnja za ljudskom radnom snagom s obzirom da robot bez obzira na položaj, koji mogu biti prisilni i neprikladni, može izvesti kvalitetniji i jednoličniji spoj. Uzimajući u obzir i činjenicu da robot u proizvodnim uvjetima može obavljati svoju zadaću učinkovitije, postaje nesumnjivo da roboti i te kako mogu zamijeniti čovjeka zavarivača, što u suvremenim industrijskim prilikama vrlo često i jest slučaj.

Svake godine se u svijetu broj robota za zavarivanje značajno povećava. Razlog tomu su prednosti koje pruža robotizirana proizvodnja te kontinuirani napredak na području robotike. Također, unaprjeđuju se i postupci zavarivanja pogodni za robotizaciju.

U eksperimentalnom dijelu primjenjivali smo tri metode ispitivanja bez razaranja i jednu metodu s razaranjem. Kontrola s razaranjem manje je isplativa zbog većih troškova i ne može se primijeniti za vrijeme eksploatacije proizvoda.

Vizualna i dimenzionalna kontrola primjenjuju se na svim komadima, dok vlačna i magnetska kontrola na dva uzoraka od tisuću komada. Uzorci su zadovoljili sve četiri kontrole, nisu pronađene greške, stoga zaključujemo da zavar odgovara svim ispitivanjima.

Provođenjem kontinuiranog nadzora kvalitete zavarenih spojeva tijekom svih faza proizvodnog procesa kao i ostalih parametara koji utječu na zavarivanje, jamči sigurnost finalnog proizvoda, a i time osiguranje kvalitete zavarenih spojeva.

## 9. Popis slika

Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod Tig zavarivanja [4] .....	5
Slika 2. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [7] .....	6
Slika 3. Shematski prikaz TIG zavarivanja [6] .....	7
Slika 4. Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [7].....	9
Slika 5. Pištolj za TIG zavarivanje [9] .....	11
Slika 6. Najčešće korištene izvedbe sapnica [10] .....	11
Slika 7. Turbolentno i laminarno strujanje zaštitnog plina [11].....	12
Slika 8. Utjecaj vrste plina i mješavine plinova na oblik i dubinu zavara [21].....	14
Slika 9. Primjer TIG točkastog zavarivanja [14].....	16
Slika 10. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [18].....	17
Slika 11. Shematski prikaz orbitalnog sustava za zavarivanje [18] .....	18
Slika 12. Priprema spojeva za TIG postupak bez i sa dodanim materijalom (hladna žica) [19] .....	19
Slika 13. Shematski prikaz segmenata i zglobova robotskim manipulatorom [22] .....	21
Slika 14. 3D shematski prikaz industrijskog robota sa 6 stupnjeva slobode gibanja [23] .....	22
Slika 15. Pojednostavljeni primjer upravljanja industrijskim robotom [25] .....	23
Slika 16. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim procesom zavarivanja [26] .....	25
Slika 17. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [28] ....	29
Slika 18. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [22] .....	29
Slika 19. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [28] .....	31
Slika 20. Mikroskop leica MZ6 [29] .....	33
Slika 21. Ultrazvučna kontrola [30] .....	34
Slika 22. Izvođenje magnetske kontrole u radionici na zavaru [30] .....	35
Slika 23. Postupak ispitivanja penetratskom metodom [28] .....	36
Slika 24. Hidraulična preša .....	38
Slika 25. Ultrazvučna kada.....	39
Slika 26. Stezna naprava za zavarivanje .....	39
Slika 27. TIG zavarivanje.....	40
Slika 28. Programiranje robota.....	41
Slika 29. TIG aparat Kemppi .....	42



Slika 30. TIG robot za zavarivanje.....	42
Slika 31. Izgled zavara sa vanjske strane kućišta.....	44
Slika 32. Izgled vara sa unutarnje strane kućišta .....	45
Slika 33. Dimenzionalno mjerenje pomičnim mjerilom .....	45
Slika 34. Stroj za dinamičko mjerenje sile .....	46
Slika 35. Priprema za stezanje kućišta .....	47
Slika 36. Priprema sa kućištem .....	47
Slika 37. Krivulja sile za materijal WRN 1.4301.....	48
Slika 38. Krivulja sile za materijal WRN 1.4571.....	48
Slika 39. Deformacija materijala.....	49
Slika 40. Magnetoflux Tiede.....	50
Slika 41. Magnetski jaram.....	50
Slika 42. Magnetske čestice u spreju .....	51
Slika 43. Nanošenje magnetskih čestica .....	52
Slika 44. Pregled uz pomoć UV lampe .....	52

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
TIG		elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom sa ili bez dodatnog materijala
d	[mm]	promjer elektrode
ZUT		zona utjecaja topline
Ar		Argon
He		Helij
AC	[A]	izmjenična struja
DC	[A]	istosmjerna struja
Cr		Krom
Ni		Nikal
Mg		Magnezij
I	[A]	jakost električne struje
A-TIG		visokoučinsko TIG zavarivanje aktivirajućim praškom
K-TIG		visoko penetracijski postupak – „keyhole“
TIP TIG		TIG zavarivanje s vodenim dodavanjem vrućeg ili hladnog dodatnog materijala
U	[V]	električna razlika potencijala
Al		Aluminij
Mg		Magnezij
s		sekunda
%		postotak
F	[N]	sila

## Literatura

- [1] ISO 10218; Manipulating industrial robots – Safety, 1992.
- [2] <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tocka6/tehn.vjes.pdf>
- [3] <http://bs.scribd.com/doc/143853387/Zavarivanje-TIG-Postupkom#scribd>
- [4] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 1.
- [5] G. Vručinić; Časopis zavarivanje 4/ 84g. - Impulsni TIG postupak zavarivanja; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1984. (357-362 str.)
- [6] TIG handbook Miller
- [7] <http://www.welding.com.hr/recenzije/rec35-horvat-tig.html>
- [8] I. Garašić; Službena predavanja iz predmeta Postupci zavarivanja; FSB, Zagreb, 2010.
- [9] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.
- [10] Milotić M.: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, 2008
- [11] TIG welding – method and application, AWS, 1992.
- [12] Panjković V.: Zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika TIG postupkom s vrućom žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [13] <https://www.slideserve.com/nevina/tig-elektrolu-no-zavarivanje-netaljivom-elektrodom-u-za-titnoj-atmosferi-inertnog-plina>
- [14] M. Živčić; Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1985.
- [15] [www.k-tig.com](http://www.k-tig.com)
- [16] Mike Wilson: TIP TIG: new technology for welding, 462-6, Industrial Robot, 6/2007.
- [17] I., Kožuh Z., Bauer B.: Predavanja iz kolegija "Strojevi i oprema za zavarivanje", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [18] Čordaš D.: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, vlastita naklada, Pula, 2007.
- [19] Čordaš D.: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, vlastita naklada, Pula, 2007.
- [20] <http://metacomm-bih.com/orbitalno-zavarivanje/>
- [21] Linde, Zaštitni plinovi za zavarivanje
- [22] [http://repositorij.fsb.hr/928/1/18\\_03\\_2010\\_Vedran\\_Petrovic\\_Diplomski\\_rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/928/1/18_03_2010_Vedran_Petrovic_Diplomski_rad.pdf)
- [23] J. N. Pires; Industrial robot programming: building application for the factories of the future; Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2007

- [24]Šurina, T. Robotizacija u tehnici zavarivanja. Zavarivanje 34. 1991, str. 171-5
- [25]Introduction to robotics: trajectory generation and robot programming; lectures, FH Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2000.
- [26][http://repozitorij.fsb.hr/1300/1/30\\_03\\_2011\\_Livio\\_Bilic%2C\\_Primjena\\_elektricnog\\_luka\\_kao\\_senzora\\_u\\_robotiziranom\\_MAG\\_zavarivanju.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1300/1/30_03_2011_Livio_Bilic%2C_Primjena_elektricnog_luka_kao_senzora_u_robotiziranom_MAG_zavarivanju.pdf)
- [27][https://vub.hr/images/uploads/3314/programiranje\\_industrijskih\\_robota\\_za\\_potrebe\\_robotiziranog\\_zavarivanja\\_zavarivanje,\\_2016.,\\_god.\\_\(vol.\)\\_59.pdf](https://vub.hr/images/uploads/3314/programiranje_industrijskih_robota_za_potrebe_robotiziranog_zavarivanja_zavarivanje,_2016.,_god._(vol.)_59.pdf)
- [28] J. N. Pires, A. Loureiro, G. Holmsjo; Welding robots: technology, system issues and applications; Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2006
- [29] Dunder, M.; Samardžić, I.; Klarić, Š. Monitoring of main welding parameters at STT welding process // Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" (TMT 2005) September, 2005 / Calvet, Joan Vovancos (ur.). Barcelona : Tecnica Superior D'Enginyeria Industrial, 2005. 219-222