

# Spajanje zavarivanjem u mehatronici

---

Štefić, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Technical College in Bjelovar / Visoka tehnička škola u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:479956>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VISOKA TEHNIČKA ŠKOLA U BJELOVARU  
STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKE

## **SPAJANJE ZAVARIVANJEM U MEHATRONICI**

Završni rad br. 11/MEH/2017

Mihael Štefić

Bjelovar, rujan 2017.



Visoka tehnička škola u Bjelovaru  
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

## 1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Štefić Mihael**

Datum: 30.05.2017.

Matični broj: 001148

JMBAG: 0314011209

Kolegij: **ELEMENTI PRECIZNE MEHANIKE**

Naslov rada (tema): **Spajanje zavarivanjem u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Opće strojarstvo (konstrukcije)**

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za završni rad:

1. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. mr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Božidar Hršak, mag.ing.mech., član

## 2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 11/MEH/2017

U radu je potrebno:

- opisati spajanje zavarivanjem (općenito),
- opisati vrste zavarenih spojeva,
- opisati osnove proračuna zavarenih spojeva,
- opisati vrste zavarivanja s osvrtom na materijale koji se zavaruju,
- prikazati primjere primjene u mehatronici.

Zadatak uručen: 30.05.2017.

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić**



### *Zahvala*

Ovim putem se zahvaljujem svim profesorima Visoke tehničke škole u Bjelovaru što su prenijeli svoje znanje i vještine tokom tri godine studiranja, posebno profesoru Stjepanu Golubiću što mi je pristao biti mentor završnog rada.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. SPAJANJE ZAVARIVANJEM.....	2
3. VRSTE ZAVARENIH SPOJEVA.....	6
3.1. Rubni zavar.....	6
3.2. I-zavar.....	7
3.4. V-zavar .....	7
3.5. U-zavar .....	8
3.6. X-zavar .....	8
3.7. K-zavar .....	9
3.8. Dvostruki U-zavar .....	9
3.9. J-zavar.....	10
4. OSNOVE PRORAČUNA ZAVARENIH SPOJEVA.....	11
4.1. Zavareni spojevi u strojogradnji .....	11
4.2. Točkasto zavareni spojevi .....	15
5. VRSTE ZAVARIVANJA.....	17
5.1. Elektrootporno zavarivanje.....	17
5.1.1. Točkasto zavarivanje .....	18
5.1.2. Bradavičasto zavarivanje .....	20
5.1.3. Sučeono zavarivanje pritiskom .....	21
5.2. Zavarivanje trenjem.....	22
5.3. Ultrazvučno zavarivanje .....	23
5.4. Zavarivanje laserom .....	24
5.5. Zavarivanje u atmosferi zaštitnog plina.....	26
5.5.1. WIG postupak zavarivanja.....	26
5.5.2. MIG postupak zavarivanja.....	28

5.5.3. MAG postupak zavarivanja .....	29
5.5.4. Zavarivanje plazmom.....	30
5.6. EPP zavarivanje (Zavarivanje pod zaštitnim prahom) .....	31
5.7. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (REL).....	32
5.7. Zavarivanje pod tlakom .....	32
5.7.1. Kovačko zavarivanje.....	33
6. PRIMJERI PRIMJENE U MEHATRONICI .....	34
7. ZAKLJUČAK .....	39
8. LITERATURA.....	40
9. OZNAKE I KRATICE.....	41
10. SAŽETAK.....	42
11. SUMMARY .....	43

## 1. UVOD

Postupci zavarivanja poznati su već u starom vijeku. Najstariji način zavarivanja je kovačko zavarivanje, zavarivanje lijevanjem i lemljenje. Zavarivanje je najrašireniji postupak spajanja materijala koji daje čvrsti i nerastavljivi spoj. Prednosti koje omogućuje zavarivanje u usporedbi sa ostalim načinima spajanja su manje težine spojenih sklopova, niži troškovi ostvarenja spoja materijala, niža ulaganja u pojedine strojeve koji omogućuju zavareni spoj, omogućuje se spajanje većih debljina materijala, te spojevi zavarivanjem u potpunosti su vodonepropusni. Zavarenim spojem se podrazumijeva dio koji je međusobno spojen pomoću zavara. Više međusobno zavarenih dijelova tvore zavareni dio, a više zavarenih dijelova tvore zavareni sklop. Zavarivanje se prema načinu ostvarivanja zavarenog spoja dijeli na više postupaka od kojih su zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom odnosno pod utjecajem tlaka. Zavarivanje taljenjem dijeli se na: plinsko zavarivanje, elektrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje plazmom, zavarivanje svjetlosnim snopom, aluminotermijsko zavarivanje, postupak WIG zavarivanja (Wolfram-Insert-Gas), MAG postupak zavarivanja (Metal-Active-Gas), MIG postupak zavarivanja (Metal-Inert-Gas), zavarivanje pod zaštitnim prahom (EPP). Zavarivanje pod tlakom dijeli se na: kovačko zavarivanje, elekrootporno zavarivanje od kojih su: točkasto zavarivanje, bradavičasto zavarivanje, sučeono zavarivanje pritiskom, zavarivanje trenjem, ultrazvučno zavarivanje. U nastavku će biti opisane vrste zavarenih spojeva prema obliku zavara (rubni zavar, I-zavar, V-zavar, U-zavar, X-zavar, K-zavar, dvostruki U-zavar i J-zavar), osnove proračuna zavarenih spojeva i vrste zavarivanja. Na kraju su prikazani primjeri primjene zavarivanja u mehatronici.

## 2. SPAJANJE ZAVARIVANJEM

Danas je zavarivanje jedno od najraširenijih načina spajanja materijala koji u konačnici daju određeni sklop. Zavarivanje je vrsta spajanja gdje se dobiva čvrsti i nerazdvojni spoj. Zavarivanje se prema vrsti materijala dijeli na autogeno i heterogeno zavarivanje. Autogeno zavarivanje je ono zavarivanje koje je načinjeno od sličnih ili istih materijala, gdje se spojna mjesta zagrijavaju do gnjecavog stanja ili se rastale. Heterogeno je takvo zavarivanje kojim se spajaju različiti materijali, u tu skupinu pripada i lemljenje od kojih imamo meko ili tvrdo. Ako se uspoređuju zakovični spojevi sa zavarenim ono je mnogo jednostavnije, jeftinije i manje je utrošenog materijala. Da se zakovični spoj međusobno spoji dolazi do preklapanja materijala jedan preko drugoga, što u zavarivanju većinom nije potrebno. Zanimljivo je usporediti zavarivanje u odnosu na zakovične spojeve [1]:

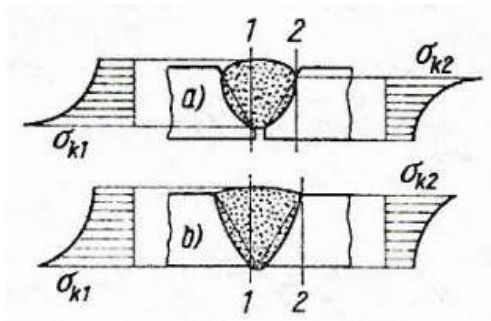
1. Dijelovi nisu oslabljeni provrtima i zato mogu imati manje dimenzije i prema tome 10 do 15% manju težinu.
2. Dijelovi se mogu spajati tupo ili kutno bez preklapanja limova.
3. Manje težine spojenog materijala (težina zakovice je 3,5 do 4%, a zavar 1 do 2%).
4. Niži troškovi proizvodnje u prvom redu dobiveni manjom težinom, osim toga otpada bušenje provrta.
5. Niža ulaganja jer su strojevi za zavarivanje jeftiniji od bušilica i strojeva za zakivanje.
6. Mogu se spajati veće debljine materijala.
7. Nema buke pri izvedbi spoja.
8. Zavarene posude potpuno su vodonepropusne.

Norma DIN 1910 govori da se pod zavarenim spojem podrazumijeva dio koji je međusobno spojen pomoću zavara. Kada se gleda više međusobno zavarenih dijelova tada oni tvore zavareni dio, a više takvih dijelova predstavlja zavareni sklop. Zavarivanje se prema načinu ostvarivanja zavarenog spoja dijeli na više postupaka od kojih su zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom odnosno pod utjecajem tlaka. Zavarivanje taljenjem dijeli se na: plinsko zavarivanje, elektrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje plazmom, zavarivanje svjetlosnim snopom, aluminotermijsko zavarivanje, postupak WIG



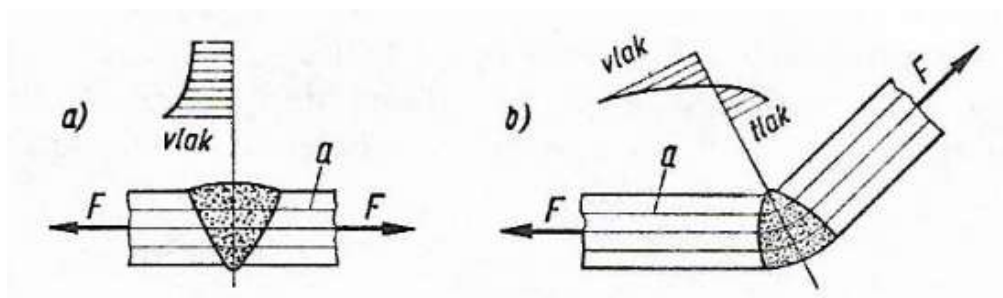
zavarivanja (Wolfram-Insert-Gas), MAG postupak (Metal-Aktiv-Gas), MIG postupak zavarivanja (Metal-Inert-Gas), zavarivanje pod zaštitnim prahom (EPP). Zavarivanje pod tlakom dijeli se na: kovačko zavarivanje, elektrootporno zavarivanje od kojih su: točkasto zavarivanje, bradavičasto zavarivanje, sučeono zavarivanje pritiskom, zavarivanje trenjem, ultrazvučno zavarivanje. U osnovi je sedam važnih pravila kojih se treba pridržavati [2]:

1. **Izbjegavati zarezna djelovanja!** Velika zarezna djelovanja prouzrokuju loš spoj osnovnog i dodatnog materijala u korijenu zavora (sl. 2.1.), što tokom vremena može dovesti do zamora materijala. Kod dinamički opterećenih šavova zavaruje se posebno korijen ili je mogućnost izvedbe u obliku X-zavora. Završni radovi nakon zavarivanja mogu se izvesti glodanjem kako bismo ublažili vršna naprezanja [2].



Slika 2.1. Naprezanja u tupom spoju a) V-zavar s lošim provarom korijena, b) V-zavar s dobrim provarom korijena [2]

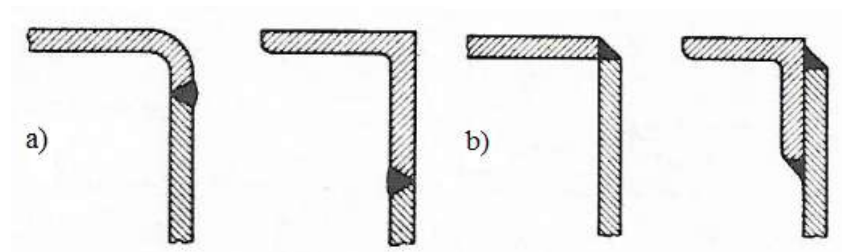
2. **Izbjegavati skretanje toka sile u zoni zavarivanja!** Tok sile vrlo je značajan za čvrstoću zavora. Skretanje toka sile u zoni zavarivanja također izaziva vršna naprezanja prikazano slikom 2.2.



Slika 2.2. Tok sile u zoni zavora (a označuje tok sile) [2]

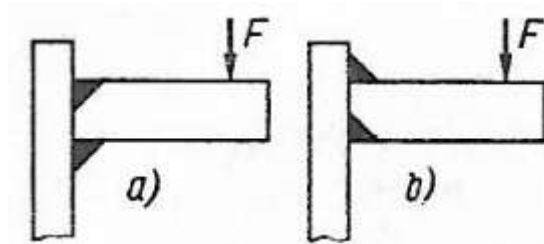
Kod mirnih opterećenja nema opasnosti od umanjenja čvrstoće, ali zbog takvih naprezanja može doći do krhkog loma materijala. Kada na materijal djeluju dinamička opterećenja njegova dinamička izdržljivost se puno brže snižuje. Da bi što je moguće

bolje izbjegli tok sile u zoni zavarivanja koristi se metoda tupog načina spajanja zavarivanja, što je mnogo bolji u odnosu na kutni zavar. Slika 2.3. prikazuje pravilan (a) i nepravilan (b) način zavarenog dijela pri dinamičkom opterećenju [2].



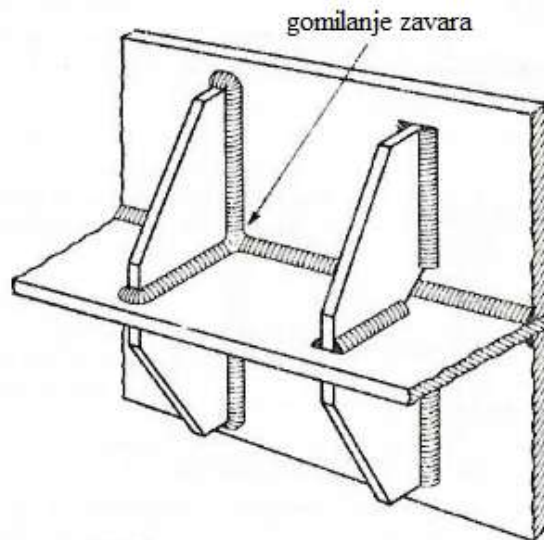
Slika 2.3. Oblik zavarenih dijelova pri dinamičkom opterećenju [2]

3. **Izbjegavati vlačna naprezanja u korijenu zavora!** Korijen zavora prema mogućnosti treba staviti u tlačnu zonu. Slika 2.4. prikazuje nepovoljan (a) i povoljan (b) način zavarenog šava opterećenog na savijanje [2].



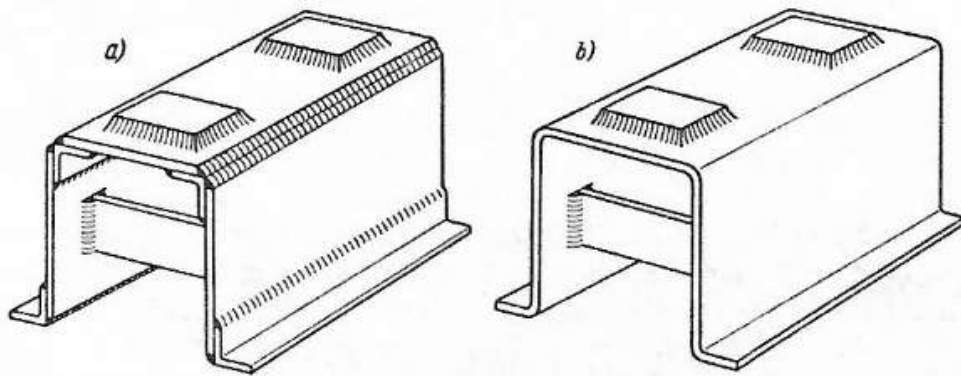
Slika 2.4. Zavareni šav opterećen na savijanje [2]

4. **Izbjegavati gomilanje zavora!** Kada se zavaruje dolazi do zagrijavanja i hlađenja materijala i tada dolazi do naprezanja zbog stezanja. Ako se više zavora sastaje u jednoj točki to je jače izvitoperenje. Najmanje deformacije naprezanja kod stezanja imamo kod elektrootpornog zavarivanja, a najveća kod plinskog zavarivanja. Slika 2.5. prikazuje kako izbjeći gomilavanje zavora [2].



Slika 2.5. Gomilanje zavara [2]

5. **Dati prednost poluproizvodima!** Kada se daje prednost poluproizvodima time ostvarujemo da je završni proizvod u konačnici jeftiniji (sl. 2.6.). Poluproizvodi koji se koriste su: plosnati i profilni čelici, cijevi, skošenim ili savijenim ili autogeno rezanim limovima [2].

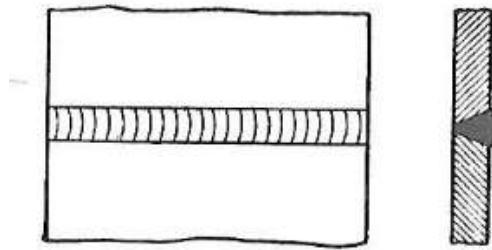


Slika 2.6. Zavareno podnožje a) nepravilno zbog mnogo pojedinačnih dijelova;  
b) pravilno [2]

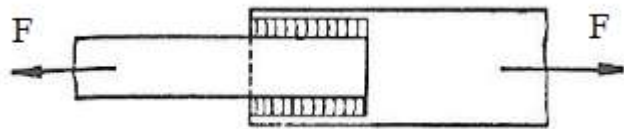
6. **Izbjegavati skupe pripremne radove!** Kada zavarujemo limove tada ne moramo imati dodatne radove oko njihove pripreme prije zavarivanja tj. da uređujemo njihove rubove koji se ionako zavaruju [2].
7. **Paziti na pristupačnost šava!** Mora postojati odgovarajuća pristupačnost zavarivačkih alata do šavova koji se zavaruju [2].

### 3. VRSTE ZAVARENIH SPOJEVA

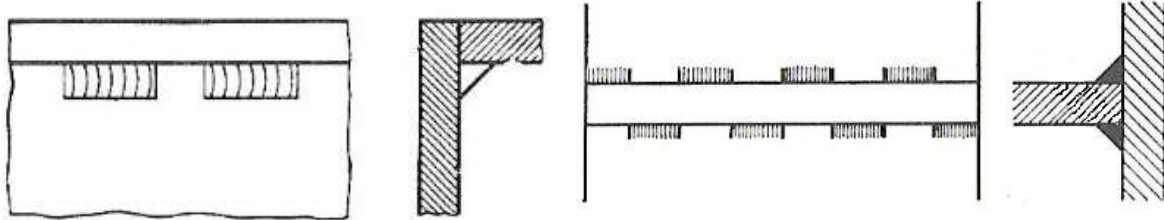
U odnosu na položaj spojenih limova zavarivanjem, zavar može biti tup ili čelni (sl. 3.1.), preklopni (sl. 3.2.), kutni (sl. 3.3.), ili T-spoj zavar (sl. 3.4.).



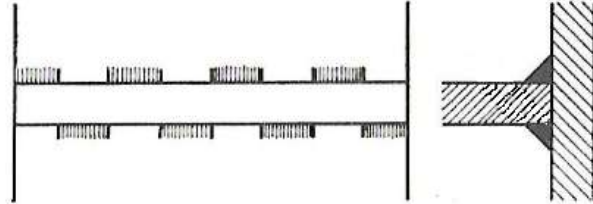
Slika 3.1. Čelni spoj [3]



Slika 3.2. Preklopni spoj [3]



Slika 3.3. Kutni spoj [3]



Slika 3.4. T-spoj [3]

Ostale vrste zavarenih spojeva koje se primjenjuju pri zavarivanju čelika taljenjem su: rubni zavar (sl. 3.5.), I-zavar (sl. 3.6.), V-zavar (sl. 3.7.), U-zavar (sl. 3.8), X-zavar (sl. 3.9.), K-zavar (sl. 3.10), dvostruki U-zavar (sl. 3.11.), J-zavar (sl. 3.12.). Uz svaki zavar naznačene su preporučene dimenzije pripreme prije zavarivanja [3].

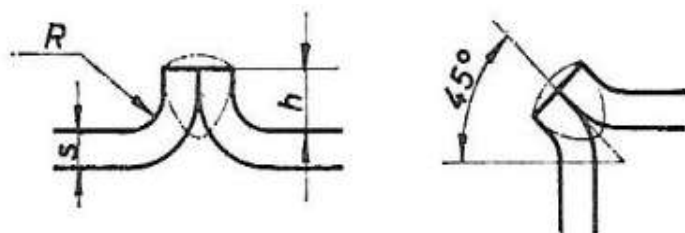
#### 3.1. Rubni zavar

Primjenjuje se kod srednjih nosivosti za spajanje vrlo tankih limova. Rub se pretaljuje, obično bez dodatnog materijala [4].

$$s \leq 2 \text{ mm}$$

$$h = s + 1 \text{ mm}$$

$$R = s \text{ mm}$$



Slika 3.5. Rubni zavar [1]

### 3.2. I-zavar

Primjenjuje se zbog svoje ekonomičnosti. Koristi se za spajanje tankih stijenki od 2 do 5 mm, zavaruje se s jedne ili obje strane [4].

Plinsko zavarivanje:

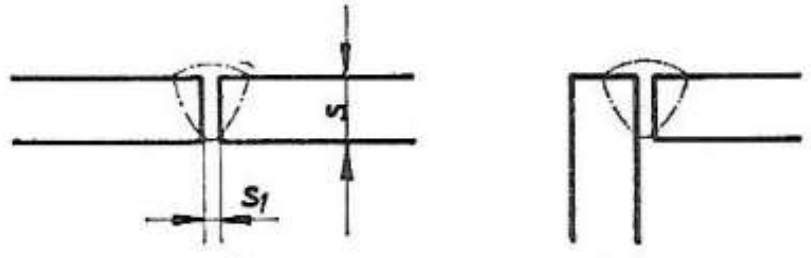
$$s \leq 6 \text{ mm}$$

$$s_1 = 0 - 3 \text{ mm}$$

Elektrolučno zavarivanje:

$$s = 1 - 4 \text{ mm}$$

$$s_1 = 0 - 2 \text{ mm}$$



Slika 3.6. I-zavar [1]

### 3.4. V-zavar

Koristi se za spajanje debljine stijenki od 4 do 18 mm. Zavaruje se samo s jedne strane s provarom [4].

Plinsko zavarivanje:

$$s = 6 - 12 \text{ mm}$$

$$s_1 = 2 - 4 \text{ mm}$$

$$h = 1 - 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 50^\circ - 70^\circ$$

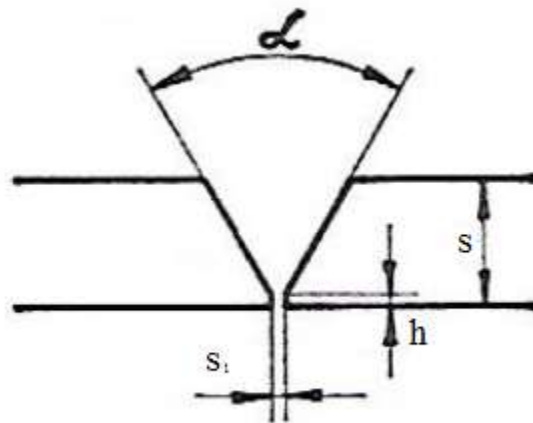
Elektrolučno zavarivanje:

$$s = 6 - 12 \text{ mm}$$

$$s_1 = 0 - 4 \text{ mm}$$

$$h = 0 - 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 50^\circ - 70^\circ$$



Slika 3.7. V-zavar [1]

### 3.5. U-zavar

Primjena je umjesto V-zavara ako je debljina limova veća od 16 mm [4].

Elektrolučno zavarivanje:

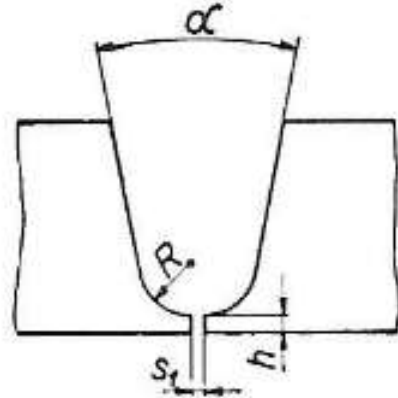
$$s \geq 16 \text{ mm}$$

$s_1$  ovisi o debljini i načinu zavarivanja

$$h \approx 3 \text{ mm}$$

$$R = 3 - 5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 10^\circ - 15^\circ$$



Slika 3.8. U-zavar [1]

### 3.6. X-zavar

Koristi se za spajanje debljine stijenki od 15-40 mm, zavaruje se s obje strane [4].

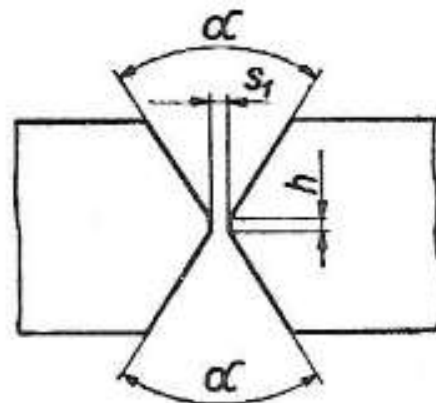
Elektrolučno zavarivanje:

$$s = 14 - 40 \text{ mm}$$

$$s_1 = 2 - 4 \text{ mm}$$

$$h = 0 - 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 50^\circ - 70^\circ$$



Slika 3.9. X-zavar [1]

### 3.7. K-zavar

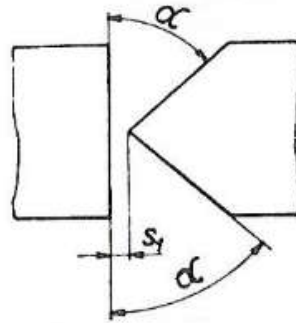
Upotrebljava se kod tupih, kutnih i T-spojeva. Koristi se u slučajevima kada s jedne strane nije moguće iskoristiti rub ili u pripremi za zidni položaj [4].

$$s > 15 \text{ mm}$$

$$s_1 = 2 - 4 \text{ mm}$$

$$h = 0 - 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 50^\circ - 55^\circ$$



Slika 3.10. K-zavar [1]

### 3.8. Dvostruki U-zavar

Koristi se za spajanje neograničenih debljina materijala, gdje je pristup moguć s obje strane [4].

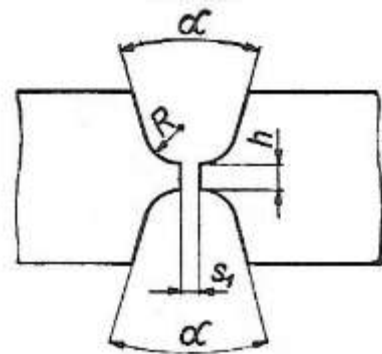
$$s > 40 \text{ mm}$$

$s_1$  ovisi o debljini limova i načinu zavarivanja

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$R = 3 - 5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 10^\circ - 15^\circ$$



Slika 3.11. Dvostruki U-zavar [1]

### 3.9. J-zavar

Primjenjuje se kod tupih, kutnih i T-spojeva kada se ne može zavarivati s obje strane [4].

Elektrolučno zavarivanje:

$$s = 20 - 40 \text{ mm}$$

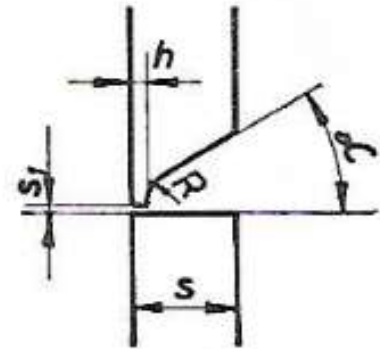
$s_1$  ovisi o debljini limova, položaju zavarivanja

i međusobnom položaju komada

$$h \approx 3 \text{ mm}$$

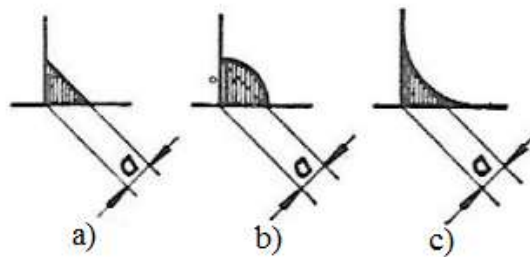
$$R = 6 - 10 \text{ mm}$$

$$\alpha = 15^\circ - 25^\circ$$



Slika 3.12. J-zavar [1]

Preklopni, kutni i T-spoj izvodi se pomoću kutnog zavara koji po obliku može biti ravni, izbočeni i udubljeni. Na slici 3.13. prikazan je izgled zavara nakon zavarivanja, slovom a označena je aktivna računaska debljina. Kada govorimo o potrošnji materijala ona je najveća kod izbočenog zavara, te najekonomičnija kod ravnog zavara. Prednost udubljenog zavara je ta što je najotporniji na dinamička naprezanja [1].



Slika 3.13. Oblik vara a) ravni, b) izbočeni, c) udubljeni [1]



## **4. OSNOVE PRORAČUNA ZAVARENIH SPOJEVA**

Pri proračunu zavarenih spojeva treba obratiti pozornost na njihovu namjenu kao i na njihovo naprezanje. U nosivim čeličnim konstrukcijama naprezanja su statička dok u strojarstvu dinamička. Zavareni kotlovi pod tlakom zahtijevaju veliku čvrstoća i nepropusnost zavara, gdje proračun zadovoljava sve kriterije. Maksimalna naprezanja uvijek moraju biti manja od dopuštenih naprezanja u materijalu ili smiju biti njima najviše jednaka. Veliki napredak u zavarivanju i njihova kontrola omogućila je proizvodnju odnosno konstruiranje kotlova pod tlakom [2].

### **4.1. Zavareni spojevi u strojogradnji**

U strojogradnji moguće je zavarivati sa raznim tehnikama zavarivanja. Neki od dijelova koji se zavaruju u strojogradnji su [2]:

- remenice,
- zupčanici,
- kućišta prijenosnika,
- ležajni stalci,
- nogari i konzole,
- obočja i ormari,
- vlačne i zglobne motke,
- poluge,
- naprave.

Proračun se odnosi na sljedeće slučajeve naprezanja:

- Vlačno ili tlačno naprezanje [2]:

$$\sigma_{v,t} = \frac{F}{\Sigma(a \times l)} \quad (4.1)$$

gdje je:

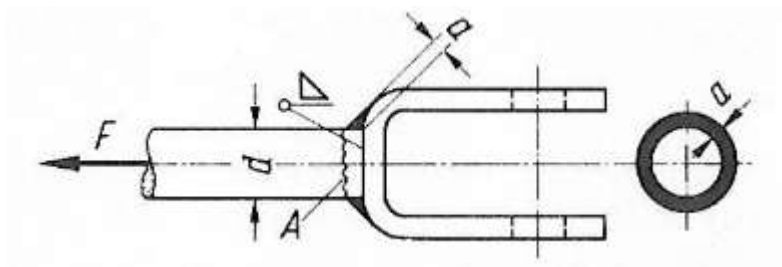
$\sigma_{v,t}$ , N / mm<sup>2</sup> – vlačno  $\sigma_v$  ili tlačno  $\sigma_t$  naprezanje,

$F$ , N – vlačna ili tlačna sila okomita na zavareni šav,

$\Sigma(a \times b)$ , mm<sup>2</sup> – površina zavarena šava,

$a$ , mm – debljina zavarena šava,

$d$ , mm – unutarnji promjer zavarenog šava.



Slika 4.1. Vlačno opterećeni zavar s kutnim zavarom [2]

- Smično naprezanje [2]:

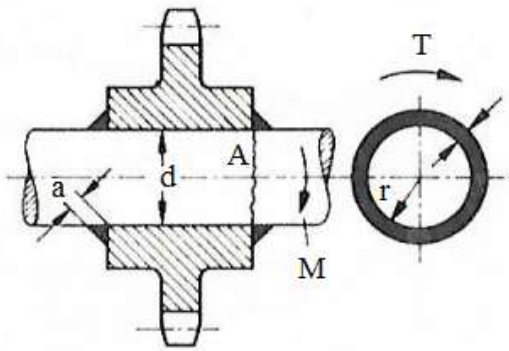
$$\tau = \frac{F}{\Sigma(a \times l)} \quad (4.2)$$

gdje je:

$\tau$ , N / mm<sup>2</sup> – smično naprezanje,

$F$ , N – smična sila u površini zavarena šava,

$\Sigma(a \times l)$ , mm<sup>2</sup> – površina zavarena šava.



Slika 4.2. Smično opterećeni zavareni priključak [2]

➤ Savojno naprezanje [2]:

$$\sigma_f = \frac{M}{I_{zav}} \times y \quad (4.3.)$$

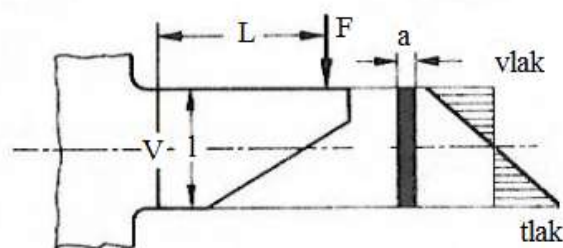
gdje je:

$\sigma_f$ , N / mm<sup>2</sup> – naprezanje od savijanja u zavarenu šavu,

$M$ , N mm – savojni moment,

$I_{zav}$ , mm<sup>4</sup> – moment tromosti zavarena šava,

$y$ , mm – udaljenost savojnog napezanja od težišnice površine zavarena šava.



Slika 4.3. Savojno opterećeni zavareni šav s tupim zavarom [2]

Ako na nekom presjeku djeluje istodobno vlačno ili tlačno naprezanje te uz njega i savojno tada se treba računati tako što se zavisno od njihova smjera, naprezanja sastave u

rezultirajuće normalno naprezanje. U slučaju da uz normalno ili rezultirajuće naprezanje, djeluje još i smično naprezanje tada se računa prema ekvivalentnom naprezanju [2].

➤ Ekvivalentno (reducirano) naprezanje [2]:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 2\tau^2} \quad (4.4.)$$

gdje je:

$\sigma_{red}$ , N / mm<sup>2</sup> – reducirano normalno naprezanje u šavu,

$\sigma$ , N / mm<sup>2</sup> – normalno naprezanje u zavarenu šavu okomito na smjer šava,

$\tau$ , N / mm<sup>2</sup> – smično naprezanje u zavaru okomito ili uzdužno na smjer zavara.

Na slici 4.4. prikazan je priključak zavaren kutnim varom koji je opterećen silom  $F$ . Sila  $F$  želi plosnati štap okrenuti oko težišta površine zavara  $s_0$  tako da uz smično naprezanje  $\tau$  dolaze još i torziona naprezanja  $\tau_t$ , prema tome jednačba za torziona naprezanje glasi:

➤ Torziona naprezanje [2]:

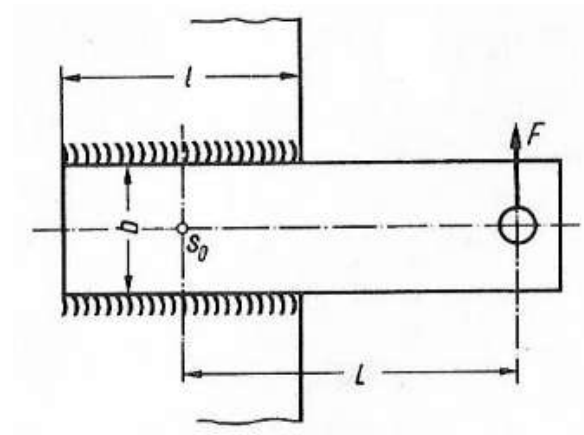
$$\tau_t = \frac{F \times L}{a \times l \left( \frac{1}{3} \cos \alpha + b \sin \alpha \right)} \quad (4.5.)$$

gdje je:

$\tau_t$ , N / mm<sup>2</sup> – torziona naprezanje u zavarenu šavu,

$F$ , N – smična sila na površini zavarena šava,

$L$ , mm – dimenzije priključka zavarena šava.



Slika 4.4. Torziona opterećeni spoj [2]

## 4.2. Točkasto zavareni spojevi

Točkastim zavarivanjem zavaruju se tanki dijelovi odnosno tanki limovi. Vrlo je ekonomičan postupak zavarivanja u tzv. lakoj gradnji. Prema DIN-u nije preručeno da se spajaju dijelovi u više od tri sloja. Pri zavarivanju lakih konstrukcija u smjeru sile ne bi smjelo biti manje od dva niti više od pet točaka zavarivanja (sl. 4.5)

Proračun točkastog zavara baziran je na proračun svornjaka [2].

- Smično naprezanje [2]:

$$\tau_a = \frac{F}{n \times m \times A} \quad (4.6.)$$

gdje je:

$\tau_a$ , N/mm<sup>2</sup> – smično naprezanje u točki zavara,

$F$ , N – smična sila odreza,

$n$  – broj točaka zavara,

$m$  – broj rezova,

$A$ , mm<sup>2</sup> – površina presjeka.

- Naprezanje izazvano specifičnim pritiskom u provrtu [2]:

$$\sigma_1 = \frac{F}{n \times d \times s} \quad (4.7.)$$

gdje je:

$\sigma_1$ , N/mm<sup>2</sup> – specifični pritisak u točki zavara,

$d$ , mm – promjer točke zavara,

$s$ , mm – debljina lima.

U slučaju da je zbroj debljine vanjskih limova manji od debljine srednjeg lima, treba za  $s$  [mm] uvrstiti vrijednost tog zbroja. Točke zavara koje se ne smiju uzeti u obzir za proračun su one kojima je promjer veći od: prema relaciji (4.8.).

$$d = \sqrt{25 \text{ mm} \times s_{\min}} \quad (4.8.)$$

## 5. VRSTE ZAVARIVANJA

Zavarivanje je način spajanja dijelova gdje se dobije čvrsti i nerazdvojni spoj. Zavarivanja se prema načelu spajanja dijeli na zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom. Zavarivanje taljenjem dijeli se na: plinsko zavarivanje, elekrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje plazmom, zavarivanje svjetlosnim snopom, aluminotermijsko zavarivanje, postupak WIG zavarivanja (Wolfram-Insert-Gas), MAG postupak zavarivanja (Metal-Aktiv-Gas), MIG postupak zavarivanja (Metall-Inert-Gas), zavarivanje pod zaštitnim prahom (EPP). Zavarivanje pritiskom dijeli se na: kovačko zavarivanje, elektrootporno zavarivanje od kojih su: točkasto zavarivanje, bradavičasto zavarivanje, sučeono zavarivanje pritiskom, zavarivanje trenjem, ultrazvučno zavarivanje.

### 5.1. Elektrootporno zavarivanje

Elektrootporno zavarivanje je takva vrsta zavarivanja gdje se određena količina električne struje šalje kroz materijal gdje se zagrijava, ali pri tom postupku ne dolazi do električnog luka. U osnovama svaki vodič se zagrijava prolaskom električne struje, a to zagrijavanje ovisi o otporu koji će pružiti vodič. Postignuta temperatura je ovisna o jačini električne struje i o vremenu trajanja njenog prolaska. Količina razvijene topline izračunava se pomoću Jeulove zakonitosti:

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (5.1)$$

gdje je:

$Q$ , J – količina topline,

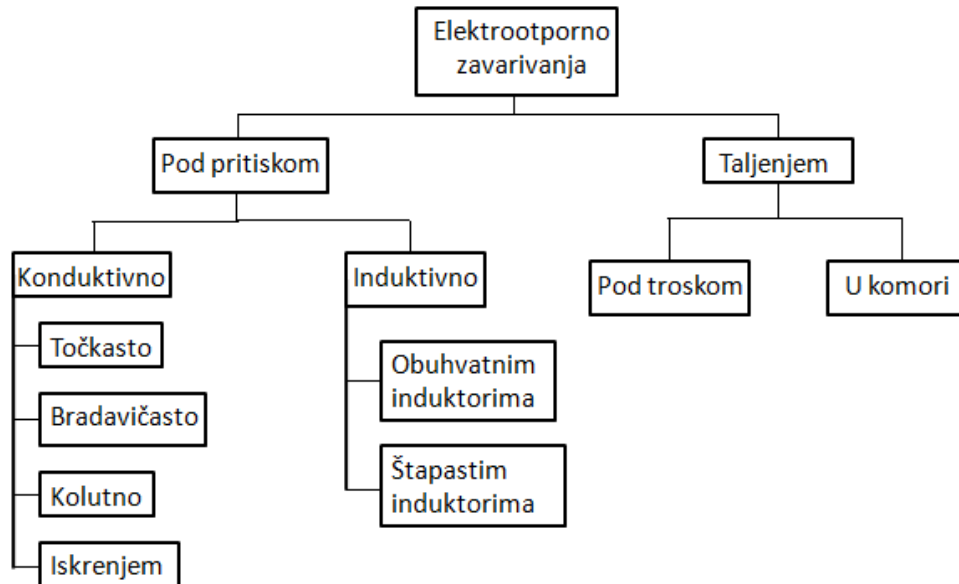
$I$ , A – jakost struje,

$R$ ,  $\Omega$  – otpor,

$t$ , s – vrijeme prolaska struje.

Ustanovljeno je da se korisno utroši samo 24% ukupne energije na zagrijavanje materijala, ostala se energija utroši na zagrijavanje elektrode, rashladne vode, kontakata, čeljusti i držača. Kod elektrootpornog zavarivanja koriste se struje jakoti od 100 – 300000 A, te napona do 0,5 – 10 V. Da bi smo ostvarili što je moguće manji utrošak energije posebna pozornost se posvećuje u konstruiranju dijelova prije zavarivanja. Kontaktni vodiči su što je moguće kraći, da

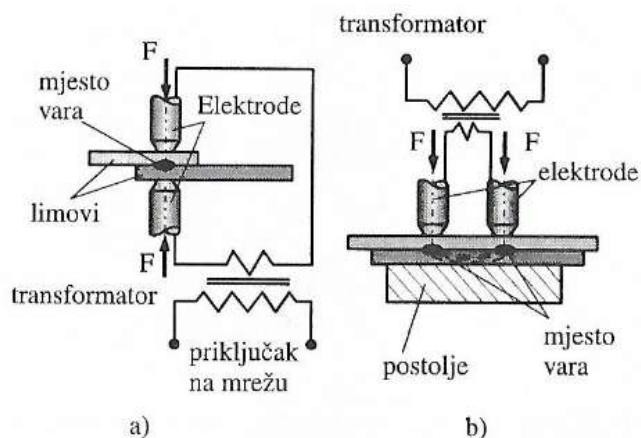
imaju što je moguće veći presjek, te da budu od dobro vodljivog materijala npr. bakar i njegove legure. Elektrootporno zavarivanje se može izvoditi na više načina koji su prikazani slikom 5.1. [3].



Slika 5.1 Podjela elektrootpornog zavarivanja [3]

### 5.1.1. Točkasto zavarivanje

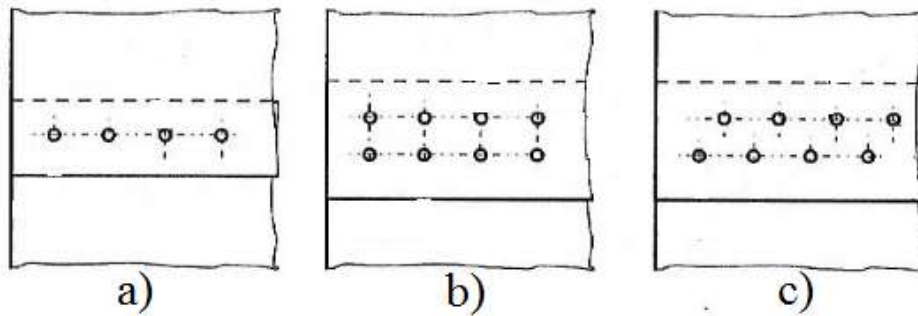
Točkasto zavarivanje spada u elektrootporno zavarivanje koje se primjenjuje za zavarivanje limova. Tom vrstom zavarivanja mogu se spajati međusobno najviše tri sloja limova. Debljina pojedinačnog lima ne smije prelaziti debljinu od 5 mm, odnosno dopuštenih 15 mm u tri sloja. Točkasto zavarivanje može biti podijeljeno u dvije skupine od kojih su obostrano i jednostrano zavarivanje prikazano slikom 5.2.



Slika 5.2. Točkasto zavarivanje a) obostrano, b) jednostrano [3]



Ako struju dovodimo s obadvije strane radnog komada tj. limova tada se govori o obostranom, a ukoliko sa samo jedne strane tada je ono jednostrano. Prema razmještaju točkastih zavara podijela je na redne, lančane i cikcak zavare prikazane slikom 5.3. Proces točkastog zavarivanja je takav da kroz elektrodu koja je u dodiru sa radnim komadom prolazi struja. Kod radnog komada koji ima najveći otpor dolazi do zagrijavanja i taljenja te laganim pritiskom tj. tlačnom silom dolazi do deformiranja materijala, gdje nastaje zavareni spoj.

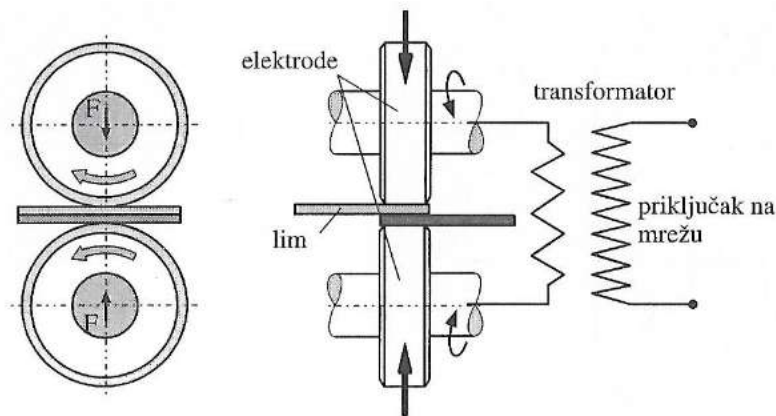


Slika 5.3. Točkasto zavareni spojevi a) jednoredni zavar, b) lančani zavar, c) cikcak zavar [2]

Pet čimbenika utječe na ostvarenje točkastog zavarivanja:

- debljina lima,
- promjer elektrode,
- pritisak elektrode,
- jakost struje zavarivanja,
- vrijeme prolaska struje zavarivanja.

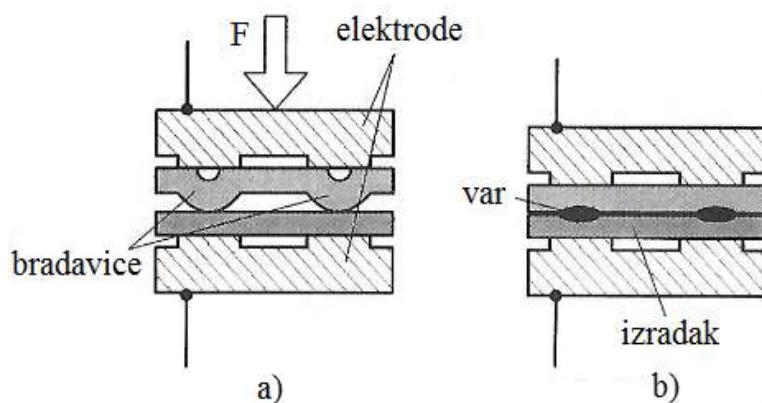
Jedan od procesa točkastog zavarivanja je uzdužno ili linijsko zavarivanje prikazano slikom 5.4., gdje se lim provlači kroz valjke koji su priključeni na vanjski izvor struje te međusobno djeluju silama na spoj limova [3].



Slika 5.4. Uzdužno zavarivanje [3]

### 5.1.2. Bradavičasto zavarivanje

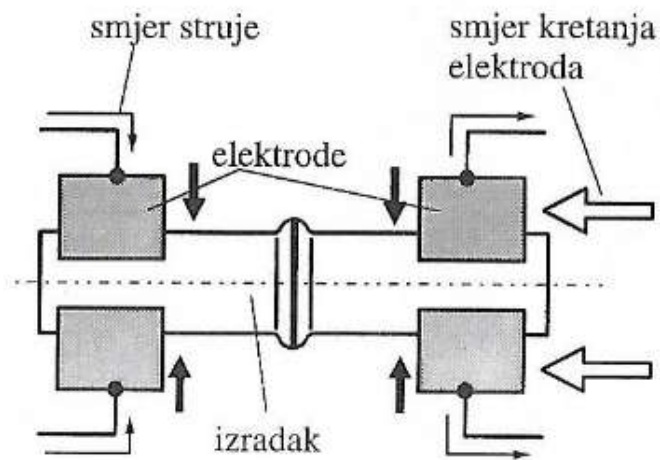
Kod bradavičastog zavarivanja sva energija u početku zavarivanja usmjerena je na bradavice, to je razlog što je čvrstoća zavara veća od one pri točkastom zavarivanju. Bradavičasto zavarivanje je u osnovi slično kao i točkasto zavarivanje. Da bi se ostvarilo bradavičasto zavarivanje potrebno je napraviti ispupčenja tj. bradavice na radnom komadu. Prednost ovog načina zavarivanja nad točkastim je ta što se mogu izvesti  $n$  broj zavara na određenoj površini koja će pritiskati radni komad da se ostvare zavari (sl. 5.5.). Za bradavičasto zavarivanje koriste se elektrode kroz koje teče struja do radnog komada što uzrokuje gnjecavost materijala, daljnim pritiskom ostvaruje se zavareni spoj. Bradavice se oblikuju prije zavarivanja procesom istiskivanja. Postupak istiskivanja može biti štancanjem, kovanjem ili lijevanjem. Materijali koji se zavaruju bradavičastim postupkom su pocinčani limovi, aluminij i bronca. U strojogradnji koriste se za privarivanje vijaka i matica, čepova, kutnika, te u industriji igračaka i bijele tehnike [3].



Slika 5.5. Bradavičasto zavarivanje a) prije zavarivanja, b) poslije zavarivanja [3]

### 5.1.3. Sučeono zavarivanje pritiskom

Dva materijala se stavljaju u stezne čeljusti odnosno grijače ploče koje su ujedno i elektrode od kojih je jedna fiksna. Druga prouzrokuje silu u smjeru fiksne stezne čeljusti. Stezaljke su povezane vodičima na vanjski izvor električne struje, putem kojeg struja dolazi do materijala. Materijal postiže gnjecavo stanje i pritiskom dolazi do zavarivanja. U procesu zavarivanja nije potrebno dodavati dodatni materijal, već se dijelovi međusobno sami spajaju. Materijali koji se međusobno zavaruju su: čelik, mesing, aluminij, bronca, a od cijevi PEHD, PP i PVDF materijala. Sučeono zavarivanje prikazano je slikom 5.6. [3].



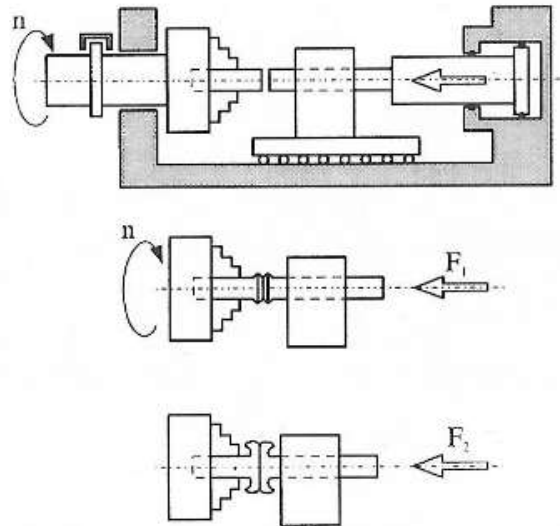
Slika 5.6. Sučeono zavarivanje [3]

Postupak sučeonog zavarivanja [5]:

1. Puštanje struje preko elektroda na već pripremljene cijevi koje se zavaruju.
2. Izvršiti pritiskanje krajeva cijevi sve dok se ne postigne sila spajanja  $F_{sp}$ . Cijevi se drže pritisnute sa silom spajanja sve dok se ne dobije odgovarajuća visina prstena taline koji formira oko. Odgovarajuća visina prstena ovisna je o vrsti materijala, dimenziji cijevi i tlaku za koji je cijev namijenjena.
3. Nakon što se postigne odgovarajuća visina prstena taline sila spajanja se smanji na iznos sile zagrijavanja.
4. Kontinuirano povećavati tlak dok se ne postigne potrebni tlak zavarivanja od 0,15 (MPa).
5. Tlak zavarivanja treba održavati za vrijeme cijelog procesa hlađenja zavara.
6. Nakon isteka vremena hlađenja, cijev osloboditi iz stega.

## 5.2. Zavarivanje trenjem

Zavarivanje trenjem (sl. 5.7) nastaje kada se dvije plohe kreću u odnosu jedna na drugu, koje su pod djelovanjem sila. Dodirom dviju površina trenje će razviti određenu temperaturu, oba tijela se moraju dovesti do temperature taljenja da bi se ostvario zavar.

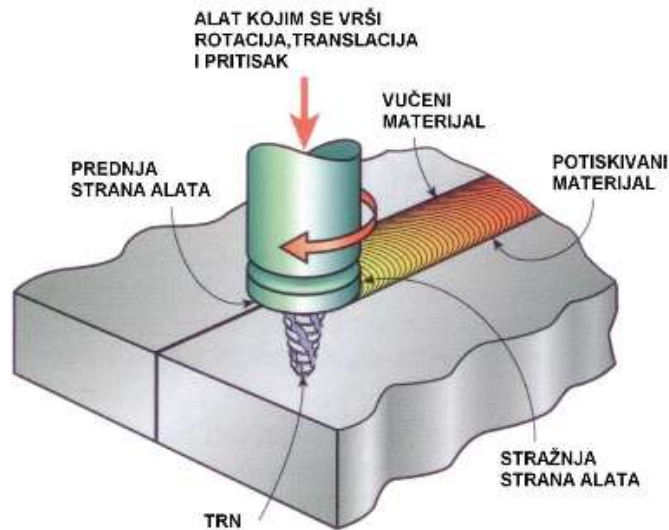


Slika 5.7. Zavarivanje trenjem [3]

Ovim postupkom se spajaju slijedeći materijali [3]:

- aluminij i njegove legure,
- bakar i njegove legure,
- olovo,
- titan i njegove legure,
- legure magnezija,
- cink,
- plastika,
- niskouglični čelici,
- austenitni, martenzitni, dupleks čelici,
- legure nikla.

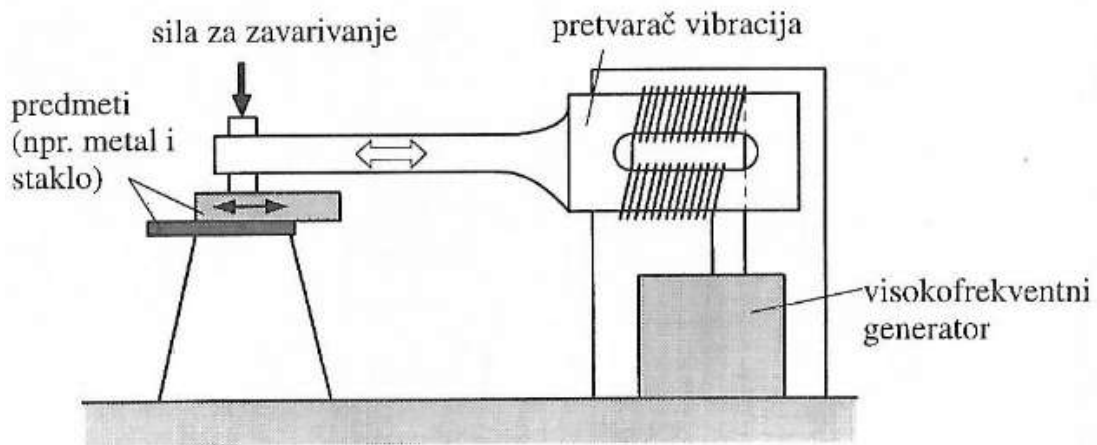
Zavarivanje trenjem koristi se u automobilske industriji za zavarivanje ventila, čepova, svrdala, tlačnih posuda, pogonskih vratila, alata i drugo. Jedna od prednosti ovog postupka zavarivanja je ta da je zona utjecaja topline vrlo uska. U osnovama je jednostavan, čist i inovativan postupak zavarivanja. Tim postupkom su se željeli izbjeći problemi koji se javljaju kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, a to je lokalno zagrijavanje materijala preko točke taljenja. Postupak koristi rotirajući cilindrični alat koji ima trn promjera 5 do 6 mm (sl. 5.8.) [6].



Slika 5.8. Zavarivanje trenjem uz pomoć trna [6]

### 5.3. Ultrazvučno zavarivanje

Ultrazvučno zavarivanje ostvaruje se uz pomoć uređaja koji proizvodi vibracije čiji se titraji prenose na alat (sl. 5.9). Poluga uređaja pritišće radni komad te uz pomoć vibracija zagrijava se zbog trenja koje nastaju unutar radnog komada. Zona zavarivanja je u dubini od oko 0,0001 mm. Metali koji se zavaruju ultrazvučnim zavarivanjem su debljine 0,005 do 2 mm za aluminij, 0,1 do 1 mm za čelik i 1 mm za bakar [3].



Slika 5.9. Ultrazvučno zavarivanje [3]

Primjena ultrazvučnog zavarivanja [3]:

- zavarivanje metala,
- zavarivanje metala sa staklom ili keramikom,
- zavarivanje plastičnih materijala.

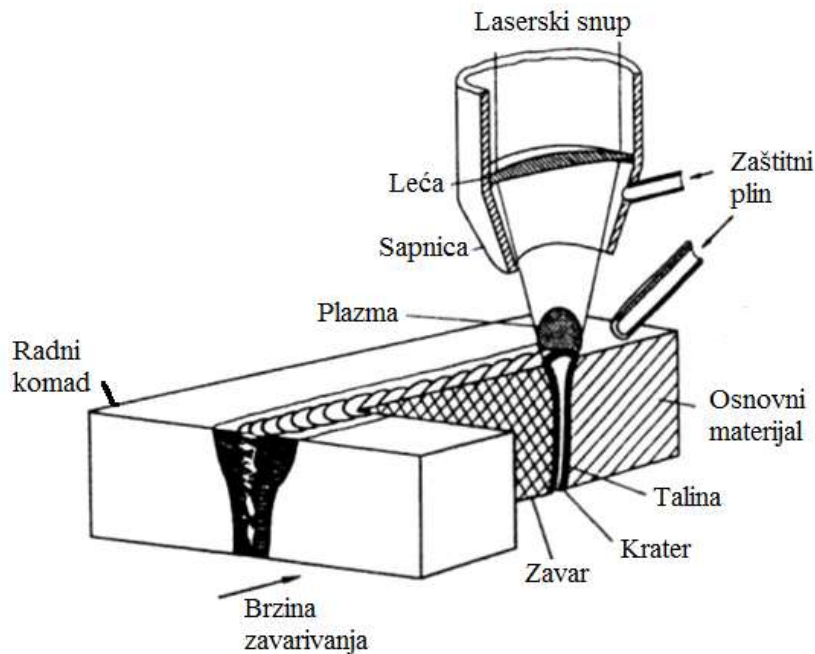
Ultrazvučnim postupkom zavarivanja mogu se zavarivati kombinacije metala [3]:

- aluminij s: aluminijem, aluminijskim legurama, čelikom, bakrom, mesingom, magnezijem, molibdenom, niklom, srebrom, zlatom, tantalom, volframom, cinkom, staklom, keramikom,
- bakar s: bakrom, aluminijem, zlatom, mesingom, niklom, platinom, srebrom, čelikom, titanom, staklom,
- čelik sa: čelikom, zlatom, bakrom, mesingom, niklom, platinom, srebrom, titanom.

#### 5.4. Zavarivanje laserom

U današnje vrijeme mnogo elemenata se zavaruje laserom (sl. 5.10), tj. preciznije zavarivanje laserom se koristi u mikrotehnici. Ovaj način zavarivanja koristi svjetlosne zrake koje su vrlo velikih snaga ( $10^5 - 10^9 \text{ W/cm}^2$ ), najčešće korišteni CO<sub>2</sub> laser koji je promjera 0,2 do 0,5 mm. Svjetlost lasera se sastoji od fotona koji se šire kao valovi. Druge vrste lasera koji se koriste su: YAL laser, fiber laseri, diodni laseri te disk laseri. Zavarivanje laserom primjenjuje se kod završnih zavara. Ova vrsta zavarivanja se provodi u atmosferi zaštitnog plina. Snage lasera

su toliko velike da osim taljenja materijala dio i isparava. O izabranoj snazi laserskog snupa ovise različiti parametri od kojih su brzina zavarivanja te penetracija. Zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju su helij (He) i argon (Ar) koji pružaju zaštitu mjesta zavarivanja od oksidacije. Helij ima veću toplinsku vodljivost od argona, zbog toga zavar je kvalitetniji [3].



Slika 5.10. Zavarivanje laserom [3]

Uloga zaštitnog plina [7]:

1. Poboljšanje estetskog izgleda i mehaničkih svojstva zavara.
2. Štiti talinu i zonu utjecaja topline od utjecaja atmosfere (dolazi do izražaja kod zavarivanja titana i cinka kako bi se spriječila njihova reakcija s kisikom). U tu svrhu mogu se koristiti većina dostupnih komercijalnih inertnih plinova za zavarivanje.
3. Služi za otklanjanje plazme i oblaka plazme. Nastali oblak plazme pri zavarivanju metodom ključanice apsorbira i rasipa lasersku zraku. Zbog toga dolazi do nestabilnog procesa zavarivanja što utječe na oblik i dubinu zavara u negativnom smislu. Ta pojava javlja se kod CO<sub>2</sub> lasera zbog njegove veće valne duljine u odnosu na Nd:YAG laser, kod kojih to nije problem. Kod CO<sub>2</sub> lasera potrebno je koristiti plinove koji imaju veći stupanj ionizacije od željeza, kao što je helij.
4. Štiti optiku za fokusiranje od metalnih para i štrcanja.

Prednosti laserskog zavarivanja [7]:

- velika brzina zavarivanja,
- mali unos energije – manje deformacije,
- visoka i ujednačena kvaliteta zavara,
- veliki omjer penetracije i širine zavara,
- pojednostavljeno zavarivanje visoko čvrstih i specijalnih čelika,
- vrlo mala ili nikakva naknadna obrada radnog komada,
- visoka produktivnost i mogućnost automatizacije,
- fleksibilnost,
- bezkontaktni alat,
- mogućnost inovativnog oblikovanja,

Nedostaci laserskog zavarivanja [7]:

- visoki investicijski troškovi,
- veći troškovi pripreme spoja, visoki zahtjevi točnosti pozicioniranja ( kod prevelike zračnosti između limova koristi se dodatni materijal ),
- točno vođenje snopa, senzori za praćenje spoja i kontrolu udaljenosti od radnog komada,
- složena tehnika stezanja radnih komada,
- posebni sigurnosni zahtjevi,
- mali stupanj iskorištenja.

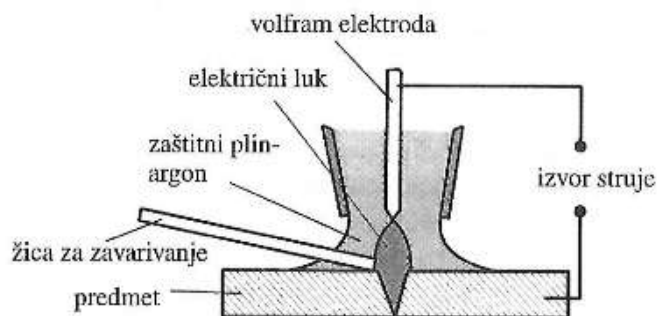
## **5.5. Zavarivanje u atmosferi zaštitnog plina**

Za zaštitu rastaljenog mjesta od utjecaja atmosfere pri zavarivanju rabe se različiti plinovi koji omoućuju stabilniji električni luk. Tim se zavarivanjima postižu kvalitetniji zavari nego u slobodnoj atmosferi.

### **5.5.1. WIG postupak zavarivanja**

WIG postupak zavarivanja odnosno argonark-postupak (sl. 5.11) koristi inertni plin argon u svrhu zaštitne atmosfere.





Slika 5.11. WIG postupak zavarivanja [3]

Inertni plin argon koristi se u svrhu da bi spriječio dotok kisika na mjesto zavarivanja. Zavisno o vrsti materijala koji se zavaruje koristi se izmjenična (AC) ili istosmjerna (DC) struja gdje se između volframove elektrode i predmeta uspostavlja električni luk. Tim postupkom dolazi do taljenja materijala i nastanka zavara. Izmjenična struja koristi se kada se zavaruju laki metali [3].

Prednosti WIG zavarivanja [3]:

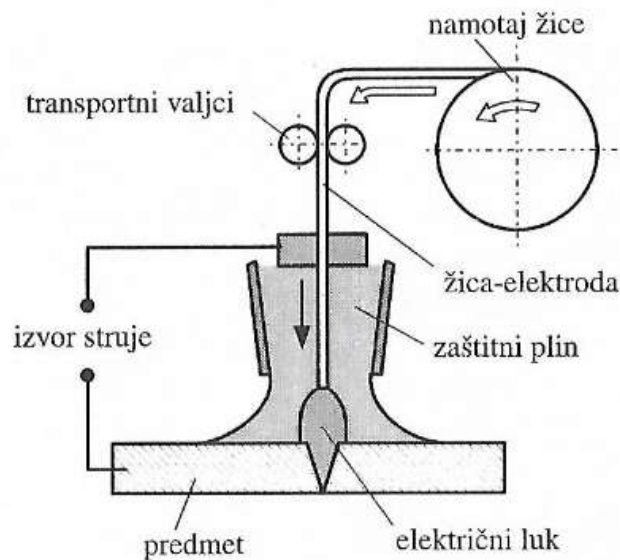
- vrhunska kvaliteta spoja,
- nema prskanja, dodatni materijal se tali u metalnoj kupki i ne prenosi kroz luk,
- moguće je zavarivati bez dodatnog materijala,
- odlična kontrola oblika korijena zavara,
- precizno održavanje parametara zavarivanja,
- gotovo da nema metala koji se ovim postupkom ne može zavarivati,
- dobra kontrola izvora topline i načina uvođenja dodatnog materijala,
- ovaj postupak može se zavarivati u svim položajima.

Nedostaci WIG zavarivanja [3]:

- relativno mala toplinska snaga i produktivnost postupka,
- zahtijeva se poseban nivo kompetencije za zavarivača ovim postupkom,
- problematično zavarivanje ovim postupkom na otvorenom prostoru.

### 5.5.2. MIG postupak zavarivanja

U ovom slučaju zavarivanja koristi se žica za zavarivanje koja je namotana na kolut. Kolut svojom brzinom regulira dotok žice, ono može biti automatsko ili poluautomatsko. Na slici 5.12. prikazana je shema MIG zavarivanja. Žica nam u ovom slučaju koristi kao elektroda uz to što je i dodatni materijal. Plin koji se koristi je argon koji štiti atmosferu, tj. sprječava zagađenje oko rastaljenog metala i njegovu oksidaciju. MIG postupkom postizemo velike brzine zavarivanja. Materijali koji se zavaruje tim postupkom su debljine do svega nekoliko milimetara. Koristi se za zavarivanje tračnih vozila, posuda za prehrambenu industriju, cijevi (NiCr, Al) itd. Prednost nad ostalim postupcima je ta što je veliki spektar dodatnog materijala koji se koriste za zavarivanje i manja cijena opreme [3].



Slika 5.12. MIG postupak zavarivanja [3]

Prednosti MIG zavarivanja [3]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,

- široki raspon debljina,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju,
- moguća primjena i za lemljenje.

Nedostaci MIG zavarivanja [3]:

- kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite - vjetar!
- problemi kod dovođenja žice (posebno aluminijski),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom!),
- složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija).
- zavar ovisi o zavarivaču.

### 5.5.3. MAG postupak zavarivanja

MAG postupak zavarivanja je identičan postupku MIG uz razliku što se ne koristi argon kao zaštitni plin već ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) ili mješavina plinova argona (80%), ugljičnog dioksida (15%) te kisika (5%). Žica koja služi kao dodatni materijal obložena je dodatno s bakrom kako bi se ostvarila bolja vodljivost struje. Parametri kod MAG zavarivanja su jakost struje, napon električnog luka, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice, protok plina, induktivitet, promjer žice i nagib pištolja [3].

Prednosti MAG zavarivanja [3]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjenje žice,

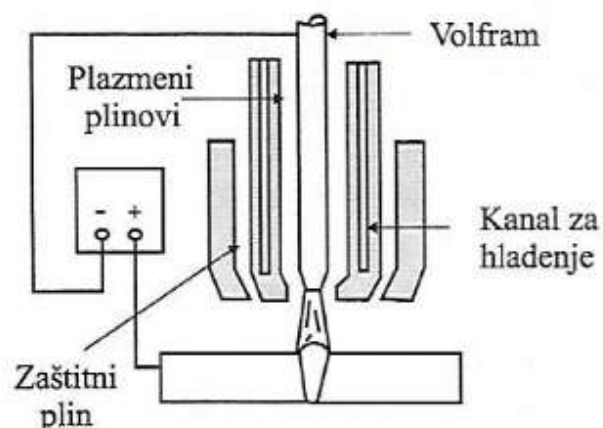
- široki raspon debljine osnovnog materijala,
- visoka učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju.

Nedostaci MAG zavarivanja [3]:

- kod rada na terenu moguće greške (vjetar može otpuhivati zaštitni plin),
- problemi kod dovođenja žice (pogotovo ako je duljina polikabela veća od 3 m),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potrebna naknadna obrada zavarenog spoja),
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

#### 5.5.4. Zavarivanje plazmom

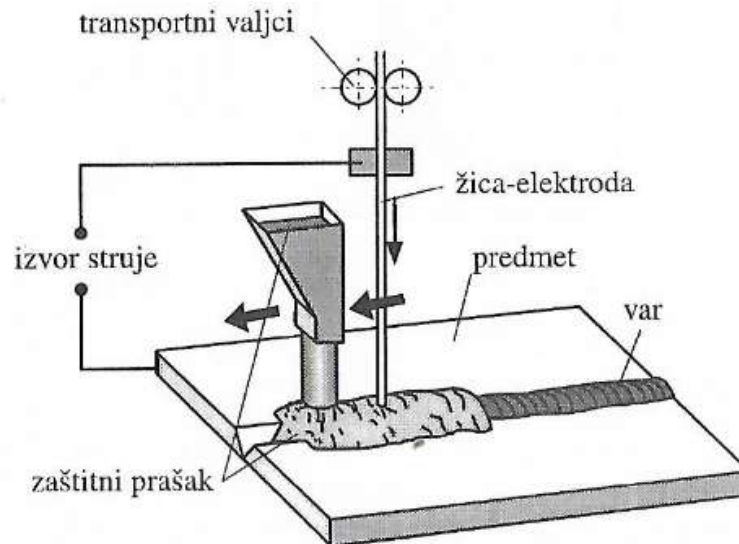
Suvremeni postupak zavarivanja gdje se koristi volframova elektroda (sl. 5.13.). Tokom zavarivanja koristi se inertni plin argon koji stvara zaštitnu atmosferu pod djelovanjem plazme. U ovom postupku zavarivanja dolazi do vrlo visokih temperatura između 5000 i 30000°C, time se postiže vrlo visoka koncentracija energije na samome mjestu zavarivanja. Za hlađenje volframove elektrode koristi se voda. Prednosti ovog zavarivanja su: precizno i kvalitetno zavarivanje uz veliku brzinu zavarivanja. Ovom tehnikom suvremenog postupka zavarivanja mogu se zavarivati i limovi debljine svega 0,01mm [3].



Slika 5.13. Shematski prikaz plazma zavarivanja

## 5.6. EPP zavarivanje (Zavarivanje pod zaštitnim prahom)

EPP zavarivanje (slika 5.14.) odvija se ispod sloja zaštitnog praha. Zavar se ostvaruje taljenjem žice ispod praha, ujedno služi kao dodatni materijal.

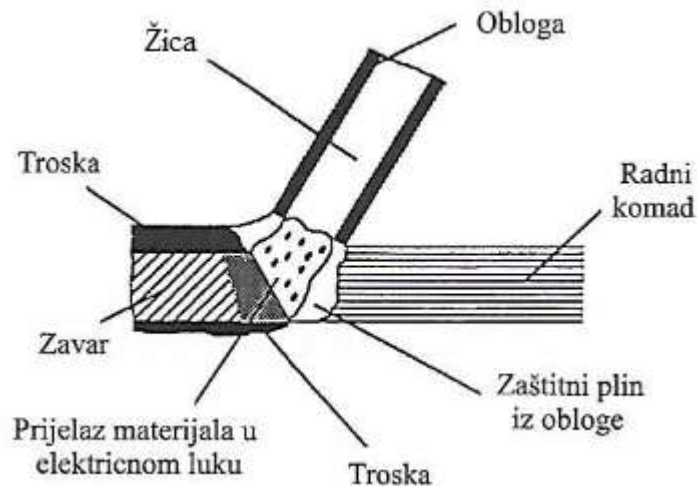


Slika 5.14. Zavarivanje pod zaštitnim prahom [3]

Svrha zaštitnog praha pri zavarivanju je ta da štiti rastaljeni dio zavara od utjecaja oksidacije i prebrzog hlađenja, te doprinosi legiranju materijala šava. Ispod praha se zadržava toplina neko vrijeme što pomaže da se materijal rastali, taj proces zadržavanja topline naziva se Jeulova toplina prema relaciji (5.1.). EPP postupak zavarivanja sastoji se od glave za zavarivanje s elektromotorom koji pokreće mehanizam za dovod žice, rezervoara koji služi za dovodnju praha, te od uređaja koji služi za automatsku kontrolu napona, izvora struje (u ovom postupku koristi se istosmjerna struja), mjernih instrumenata, te uređaja za usisavanje preostalog praha. Struja ovog postupka zavarivanja je do 3000 A i time se omogućuje velika brzina zavarivanja i velike dubine zavara. Jedan od nedostataka ovog postupka zavarivanja je taj što se može zavarivati samo u vodoravnom položaju zbog nasipavanja praha. Nije dobro koristiti prevelike struje zavarivanja jer dolazi do rastaljivanja materijala te može doći do prskanja. U većini slučajeva koriste se struje od 1000 do 2000 A. Moguće je zavarivati veće debljine materijala s velikom brzinom. Materijali koji se mogu zavarivati su ugljični, niskolegirani, legirani čelici [3].

## 5.7. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (REL)

Ručno elektrolučno zavarivanje spada u postupak zavarivanja taljenjem. Obložena elektroda služi za zaštitu taline, dobru kvalitetu zavarenog spoja, uporabu izmjenične i istosmjerne struje, te zavarivanje u svim položajima. Toplinska energija stvorena u električnom luku tali dodatni materijal (elektroda) i osnovni komad (sl. 5.15.)



Slika 5.15. REL postupak zavarivanja [4]

Da bi se dobio što bolji električni luk trebaju se ispuniti slijedeći uvjeti:

- električni napon mora biti što bolje prilagođen promjenama u električnom luku,
- struja kratkog spoja treba biti što niža,
- napon praznog hoda izvora struje mora biti dovoljno visok da se lako uspostavlja,
- nužno je da se jakost struje i napon zavarivanja mogu regulirati u širokom području i u dovoljno uskim intervalima.

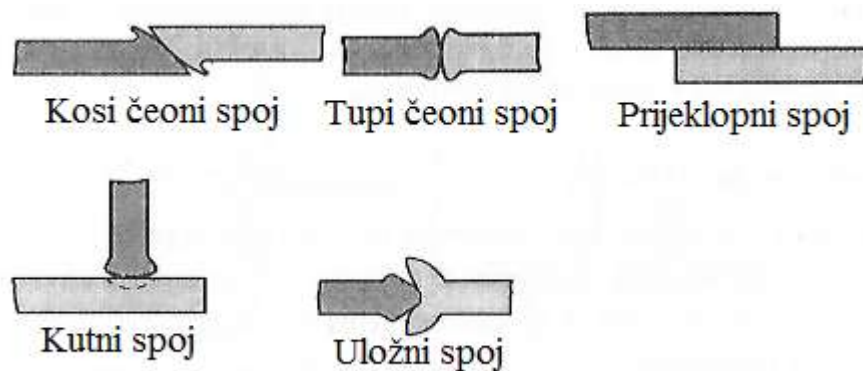
Primjena REL postupka je gotovo univerzalna jer se dobro zavaruju materijali debljine od 1 mm do 25 mm. Za deblje materijale ekonomičnije je koristiti automatizirane postupke zavarivanja [4].

## 5.7. Zavarivanje pod tlakom

Zavarivanje pod tlakom je najstarija vrsta zavarivanja metala gdje se metal prije zavarivanja zagrijava. Da bi se ostvario zavareni spoj na radni komad se nanosi tlačna sila određenog iznosa koja spaja materijal.

### 5.7.1. Kovačko zavarivanje

Zavarivanje pod tlakom nazivamo još i kovačko zavarivanje, taj način se više ne primjenjuje u industriji. Kovačko zavarivanje je umijeće izrade raznih spojeva. Zavarivanje pod tlakom je takvo zavarivanje da se predmeti koji se spajaju zagrijevaju do 1300°C tj. do bijelog usijanja. Time dolazi do gnjecavosti čeličnih materijala. Međusobno se spajaju pritiskom odnosno tlačnom silom. Tlačna sila prouzrokuje se udarcem kovačkog čekića, pneumatskog bata ili valjanjem. Da bi došlo do dobrog spoja materijala, površine moraju biti čiste. Za čišćenje materijala koristi se smjesa koja je sačinjena od boraksa i kremenog pijeska. Da bi se što bolje zavarilo materijal na kovački način on mora sadržavati što je mogući manji postotak ugljika, odnosno između 0,15 do 0,20%. Legirani dodatak u materijalu negativno utječe na spajanje materijala odnosno radnih komada. Na slici 5.16. prikazani su načini spojeva tlačnim zavarivanjem [3].



Slika 5.16. Spojevi kod kovačkog zavarivanja [3]

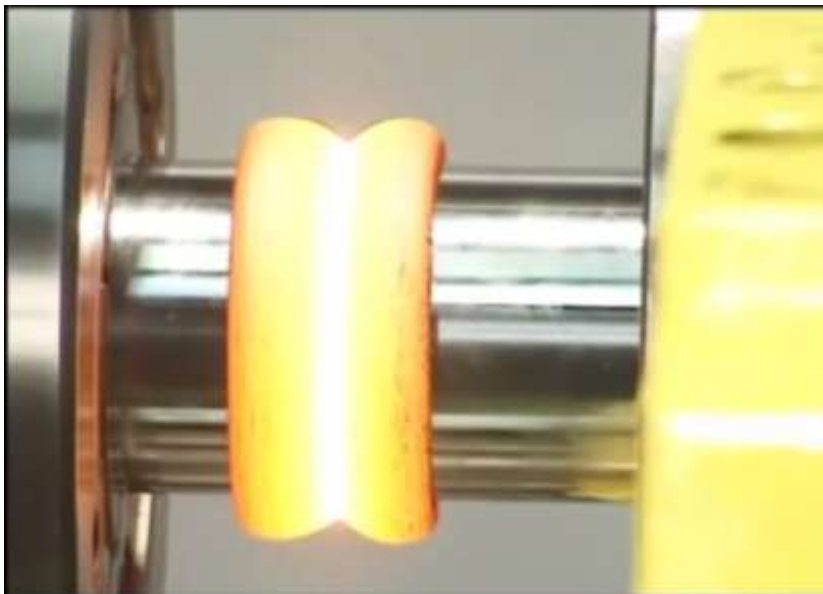
## 6. PRIMJERI PRIMJENE U MEHATRONICI

Točksto zavarivanje limova prikazano slikom 6.1.



Slika 6.1. Točkasto zavareni spoj [8]

Zavarivanje osovine postupkom zavarivanja trenjem prikazano slikom 6.2.



Slika 6.2. Zavarivanje trenjem [9]

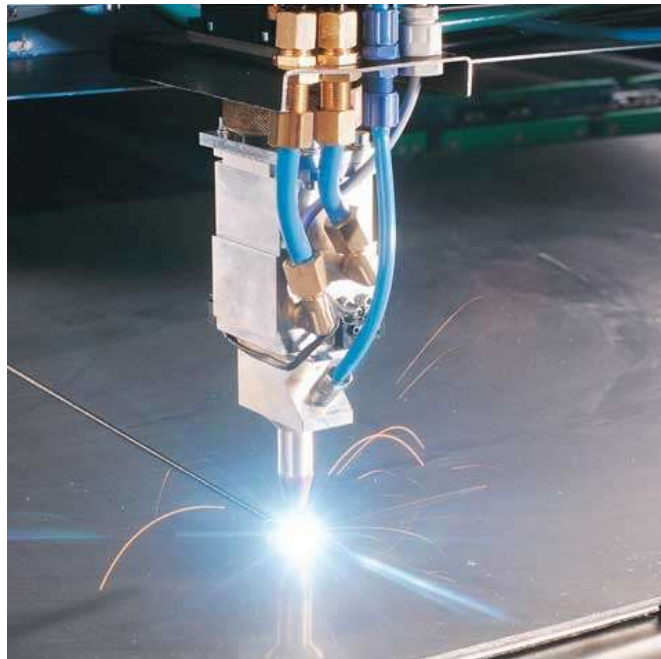


Ultrazvučno zavarivanje plastičnih materijala prikazano slikom 6.3.



6.3. Ultrazvučno zavarivanje [10]

Zavarivanje tankih limova postupkom zavarivanja laserom prikazano slikom 6.4.



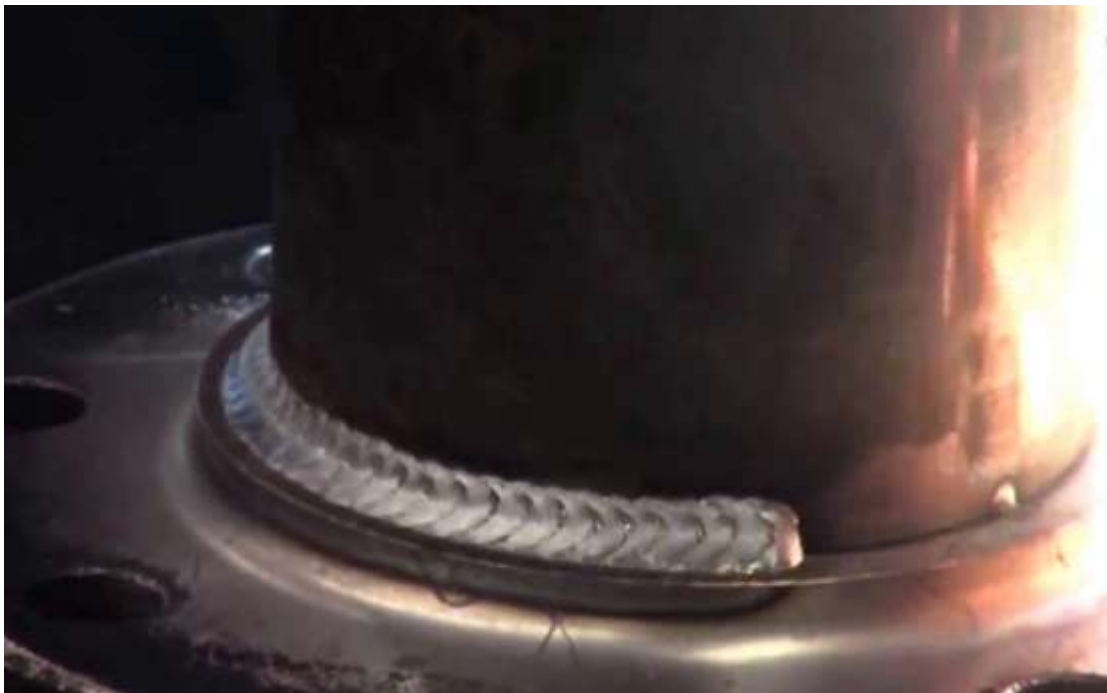
Slika 6.4. Zavarivanje laserom [11]

Zavarivanje nehrđajućeg čelika postupkom WIG zavarivanja prikazano slikom 6.5.



Slika 6.5. Zavarivanje WIG postupkom [12]

Zavarivanje konstrukcijskog čelika postupkom MIG zavarivanja prikazano slikom 6.6.



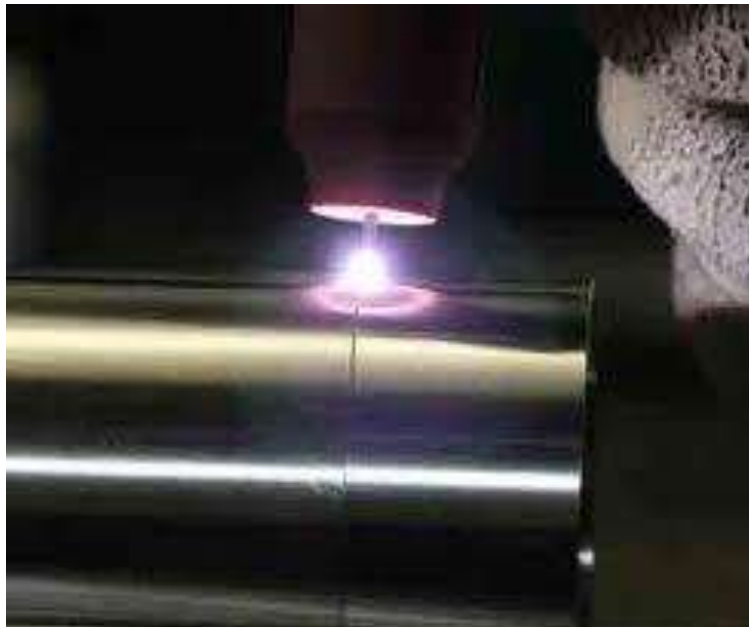
Slika 6.6. Zavarivanje MIG postupkom [13]

Spajanje čeličnih ploča MAG postupkom zavarivanja prikazano slikom 6.7.



Slika 6.7. Zavarivanje MAG postupkom [14]

Zavarivanje cijevi postupkom plazma zavarivanjem prikazano slikom 6.8.



Slika 6.8. Zavarivanje plazmom [15]

Međusobno spajanje cijevi postupkom EPP zavarivanja prikazano slikom 6.9.



Slika 6.9. Epp zavarivanje [16]

## 7. ZAKLJUČAK

Spajanje zavarivanjem koristi se u svim industrijskim područjima kojemu je cilj da se dobije određeni sklop. Zavarenim spojem se podrazumijeva dio koji je međusobno spojen pomoću zavara, kada se gleda više međusobno zavarenih dijelova oni čine zavareni dio, a više dijelova čine zavareni sklop. Zavarivanje se međusobno dijeli na više postupaka od kojih su grupe zavarivanja taljenjem, što su: plinsko zavarivanje, elektrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim snupom, zavarivanje plazmom, zavarivanje svjetlosnim snupom, aluminoternijsko zavarivanje, postupak WIG zavarivanja, MAG postupak zavarivanja, MIG postupak zavarivanja, EPP (zavarivanje pod zaštitnim prahom), zavarivanje pod tlakom što je kovačko zavarivanje. Vrste elektrootpornog zavarivanja su: točkasto zavarivanje, bradavičasto zavarivanje, sučeono zavarivanje pritiskom, zavarivanje trenjem i ultrazvučno zavarivanje. U osnovi je sedam pravila koje se trebaju pridržavati pri zavarivanju, od kojih su: izbjegavati zarezno djelovanje, izbjegavati skretanje toka sile u zoni zavarivanja, izbjegavati vlačna naprezanja u korijenu zavara, izbjegavati gomilanje zavar, dati prednost poluproizvodima, izbjegavati skupe pripremne radove te paziti na pristupačnost šava. Spajanje dijelova međusobno prikazano je uz primjere. Vrste zavarenih spojeva u odnosu na spajanje limova su tupi ili čelni spoj, preklopni spoj, kutni spoj i T-spoj. Najčešće korišteni oblici zavara su: rubni zavar, I-zavar, V-zavar, U-zavar, X-zavar, K-zavar, dvostruki U-zavar i J-zavar uz preporučene dimenzije koji su poželjne pri zavarivanju. Pri proračunu zavarenih dijelova obraća se veća pozornost na samu funkciju i namjenu dijela koji se međusobno zavaruje, gdje je opisan dio o proračunu spojeva u strojogradnji i točkastog zavarivanja. Maksimalna naprezanja dobivenih rezultata uvijek moraju biti manja od dopuštenih naprezanja ili njima jednaka.

## 8. LITERATURA

- [1] Hercigonja E., Strojni elementi 1. 13. izd., Školska knjiga, Zagreb 1995. str. 93-107.
- [2] Deker K.-H., Elementi strojeva. 7. izd. u Berlinu 1975. str. 13-50.
- [3] Nikolić G., Hiti I. Tehnike spajanja, Tipex-Zagreb, 1998. str. 129-172.
- [4] Ređep A., Finomehanika 3. izd., Školska knjiga, Zagreb 2008. str. 50-62.
- [5] Sučeono zavarivanje [Online]. Dostupno na: <http://www.ptmg.hr/media/radovi/zavarivanje-suceono.pdf> (24.08.2017.)
- [6] Gorički A., Pomično zavarivanje trenjem. Završni rad. Varaždin: Sveučilište Sjever; srpanj 2016.
- [7] Lasersko zavarivanje [Online]. Dostupno na: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1418027557-0-prez-zav-laser.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1418027557-0-prez-zav-laser.ppt) (31.08.2017.)
- [8] <http://photobucket.com/gallery/user/rmccartney/media/cGF0aDoxOTY1IEZhaXJsYW5lIHN1cGVyIHN0cmVldC1zdXBldiBnYXMvUGljdHVyZTA3Mi5qcGc=/ref> (31.08.2017.)
- [9] [http://skienginevalve.com/images/manufacture\\_images/-286951930-02-Friction%20Welding.png](http://skienginevalve.com/images/manufacture_images/-286951930-02-Friction%20Welding.png) (31.08.2017.)
- [10] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/wp-content/uploads/2014/01/01-ultrasonic-welding-of-consumer-appliance-ultrasonic-welding-plastic.jpg> (31.08.2017.)
- [11] <http://www.wausaubusinessdirectory.com/images/wausaubusinessdirectorycom/bizcategories/3627/image/Picture-011.jpg> (31.08.2017.)
- [12] <https://i.ytimg.com/vi/WSnj8AASuFs/maxresdefault.jpg> (31.08.2017.)
- [13] <https://i.ytimg.com/vi/GPx7dyBazjk/maxresdefault.jpg> (31.08.2017.)
- [14] <http://www.getweld.net/wp-content/uploads/2014/05/MAG-Welding-01.png> (31.08.2017.)
- [15] <https://metfusion.files.wordpress.com/2013/11/tigsteel.jpg?w=640> (31.08.2017.)
- [16] [http://www.osnove-strojarstva.com/slike/Foto2012/Velika/EPP\\_Zavarivanje\\_cijevi\\_3.JPG](http://www.osnove-strojarstva.com/slike/Foto2012/Velika/EPP_Zavarivanje_cijevi_3.JPG) (31.08.2017.)

## 9. OZNAKE I KRATICE

$a$ , mm – debljina zavarena šava

$d$ , mm – unutarnji promjer zavarenog šava

$F$ , N – vlačna ili tlačna sila okomita na zavareni šav

$I$ , A – jakost struje

$I_{zav}$ , mm<sup>4</sup> – moment tromosti zavarena šava

$L$ , mm – dimenzije priključka zavarena šava

$M$ , N mm – savojni moment

$Q$ , J – količina topline

$R$ ,  $\Omega$  – otpor

$t$ , s – vrijeme prolaska struje

$y$ , mm – udaljenost savojnog napezanja od težišnice površine zavarena šava

$\Sigma (a \times b)$ , mm<sup>2</sup> – površina zavarena šava

$\sigma_f$ , N / mm<sup>2</sup> – naprezanje od savijanja u zavarenu šavu

$\sigma_{red}$ , N / mm<sup>2</sup> – reducirano normalno naprezanje u šavu

$\sigma_{v,t}$ , N / mm<sup>2</sup> – vlačno  $\sigma_v$  ili tlačno  $\sigma_t$  naprezanje

$\tau$ , N / mm<sup>2</sup> – smično naprezanje

$\tau_t$ , N / mm<sup>2</sup> – torziono naprezanje u zavarenu šavu

EPP – Zavarivanje pod zaštitnim prahom

MAG – Metall-Aktiv-Gas

MIG – Metall-Inert-Gas

REL – Ručno elektrolučno

WIG – Wolfram-Inert-Gas



## 10. SAŽETAK

Spajanje zavarivanjem jedan je od najraširenijih načina spajanja istovrsnih i raznovrsnih materijala koji će dati određeni sklop. Ono je bitno u oblikovanju i izvedbi metalnih konstrukcija. Cilj je da se ostvari kompaktnost spojenih komada. Najčešći oblici zavara su: rubni zavar, I-zavar, V-zavar, U-zavar, X-zavar, K-zavar, dvostruki U-zavar i J-zavar. Prije zavarivanja konstrukcija i pojedinih dijelova potrebno je napraviti proračun koji služi kao osnova za dimenzioniranje zavarenog spoja. Ako se gledaju naprezanja u ovisnosti o vrsti sklopa tada imamo statička naprezanja kod nosivih čeličnih konstrukcija, te dinamička kod strojarskih dijelova. Prilikom zavarivanja također bitno je da se obrati pozornost na uvjete u kojima se zavaruje. Zavarivanja se prema načelu spajanja dijeli na zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom. Zavarivanje taljenjem dijeli se na: plinsko zavarivanje, elektrolučno zavarivanje, otporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje plazmom, zavarivanje svjetlosnim snopom, aluminotermijsko zavarivanje, postupak WIG zavarivanja (Wolfram-Insert-Gas), MAG postupak zavarivanja (Metal-Aktiv-Gas), MIG postupak zavarivanja (Metall-Inert-Gas), zavarivanje pod zaštitnim prahom (EPP). Zavarivanje pritiskom dijeli se na: kovačko zavarivanje, elektrootporno zavarivanje od kojih su: točkasto zavarivanje, bradavičasto zavarivanje, sučeono zavarivanje pritiskom, zavarivanje trenjem, ultrazvučno zavarivanje.

Ključne riječi: zavarivanje, vrste zavarivanja, proračun zavarenih spojeva, vrste zavarenih spojeva.



## 11. SUMMARY

Welding is one of the most diverse ways of connecting the same and varied materials that will give a particular circuit. It is essential to the design and construction of metal structures, the aim being to realize the compactness of the assembled pieces. Types of welded joints used to cause the disorder are: edema, I-weld, V-weld, U-weld, X-weld, K-weld, double U-weld and J-weld. Before welding the construction and individual parts it is necessary to make a calculation to see if the welding will satisfy all conditions. If we look at voltages depending on the type of circuit then we have static tensions in the supporting steel structures, and dynamic in the mechanical parts. When welding, it is also important to pay attention to the conditions in which it was banned. Welding according to the principle of jointing is divided into welding by melting and welding by pressing. Welding by melting is divided into: gas welding, electro-welding, sealing, electron welding, welding placement, light beam welding, aluminotherm welding, WIG welding, MIG welding (Metall-Inert-Gas), welding under protective powder (EPP). Welding by pressing is divided into: hard welding, electro-welding welding of which: point welding, welding welding, welding welding, friction welding, ultrasonic welding.

Keywords: welding, welding types, calculation of welded joints, types of welded joints.

## IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, 21.09.2017.	MIHAEL ŠTEFIĆ	Michael Štefić

Prema Odluci Visoke tehničke škole u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Visoke tehničke škole u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

MIHAEL ŠTEFIĆ

*ime i prezime studenta/ice*

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 21.09.2017.

*Mihael Štefić*  
*potpis studenta/ice*