

# Tehnologije zavarenih spojeva u strojarskim konstrukcijama

---

**Siljan, Alex**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:966399>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-10**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



ALEX SILJAN

**TEHNOLOGIJE ZAVARENIH SPOJEVA U STROJARSKIM  
KONSTRUKCIJAMA**

Završni rad

Pula, rujan 2024. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli

ALEX SILJAN

**TEHNOLOGIJE ZAVARENIH SPOJEVA U STROJARSKIM  
KONSTRUKCIJAMA**

Završni rad

**JMB: 0303105415, redovni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

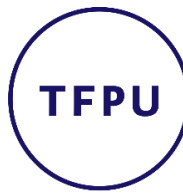
**Predmet: Tehnologija III**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: 2.11 Strojarstvo**

**Znanstvena grana: 2.11.03 Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: Dario Bognolo, viši predavač**



Tehnički fakultet u Puli

Dario Bognolo, viši predavač

*(Ime i prezime nastavnika)*

Tehnologija III

*(Predmet)*

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**

**ZADATAK TEME ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupniku** Alexu Siljan

**MBS:** 0303105415

**Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:**

**Tehnologije zavarenih spojeva u strojarskim konstrukcijama**

**Sadržaj zadatka:** Napisati osnovnu hipotezu, predmet i problem istraživanja te sukladno odabranoj hipotezi postaviti ciljeve istraživanja. Tema koja se obrađuje u ovom radu odnosi se na tehnološki proces zavarivanja u strojarskim konstrukcijama. Obraditi postupke zavarivanja i donijeti zaključak o najpovoljnijem postupku zavarivanja strojarskih konstrukcija uz kritički osvrt.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

**Redovni, Strojarsтво**

**Datum:** rujan, 2024.

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Alex Siljan, kandidat za prvostupnika Proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

---

Pula, rujan 2024. godine

## **IZJAVA**

o korištenju autorskog dijela

Ja, Alex Siljan, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom “Tehnologije zavarenih spojeva u strojarskim konstrukcijama“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama. Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

Alex Siljan

---

Pula, rujan 2024. godine

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u izradi završnog rada, uključujući i mentora Dario Bongola za njegovu stručnu i učestalu pomoć i izrazito brze odgovore na sva moja pitanja i muke.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na učestaloj potpori tokom godina studiranja, svojim kolegama i prijateljima.

## **SAŽETAK**

U ovom radu razmatraju se tehnologije zavarivanja i njihovo korištenje prilikom zavarivanja materijala koji se koriste za izradu konstrukcija poput čelika, aluminijskog, bakra. Glavni cilj ovog završnog rada je dobiti široki spektar vrsta i primjena tehnologija zavarivanja koje se svakodnevno koriste u svijetu. Detaljno objašnjenje tehnologije zavarivanja poput MIG/MAG, TIG, REL, ESW, ERW, obrađivanje podataka poput njihovih implementacija te za koje materijale se koriste i po čemu se razlikuju. Obradivanje materijala vrste nelegiranog čelika, niskolegiranog čelika, visokolegiranog čelika, aluminijskog i bakra, gdje prikupljeni podaci odgovaraju metodama zavarivanja, također dobivanje uvida u njihovo ponašanje tokom zavarivanja, njihovim mehaničkim svojstvima i uvjetima eksploatacije u industrijama, zgradama, cijevnim sustavima i mostovima. Rad će pružiti uvid tehnologija zavarivanja sa konstrukcijskim materijalima te pokazati sklop zavarivanja i materijala jedno s drugim.

**Ključne riječi:** zavarivanje, zavareni spoj, materijali, konstrukcije

## **ABSTRACT**

This paper discusses welding technologies and their use in welding materials commonly employed in the construction of structures such as steel, aluminum, and copper. The main goal of this thesis is to provide a comprehensive overview of the types and applications of welding technologies that are used daily around the world. A detailed explanation of welding technologies such as MIG/MAG, TIG, SMAW, ESW, and ERW is provided, including data on their implementations, the materials they are used for, and how they differ from one another. The paper also covers materials such as unalloyed steel, low-alloy steel, high-alloy steel, aluminum, and copper, where the collected data corresponds to welding methods, offering insights into their behavior during welding, their mechanical properties, and their exploitation conditions in industries, buildings, piping systems, and bridges. The paper will offer an overview of welding technologies with construction materials and demonstrate the combination of welding processes and materials.

**Keywords:** welding, welded joint, materials, structures.



# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Hipoteza.....	1
1.2 Predmet istraživanja.....	1
1.3 Problem istraživanja.....	1
1.4 Ciljevi istraživanja.....	1
1.5 Metodologija rada.....	2
1.5 Struktura rada.....	2
2. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA.....	3
2.1 SAW postupak zavarivanja.....	3
2.1.1 Primjena SAW postupka u zavarivanju konstrukcijama.....	4
2.2 MIG/MAG/TIG postupak zavarivanja.....	7
2.3 REL postupak zavarivanja.....	12
2.4 ESW postupak zavarivanja.....	15
2.5 ERW postupak zavarivanja.....	18
2.5.1 Indukcijska ERW tehnologija zavarivanja.....	19
3. ZAVARLJIVOST KONSTRUKCIJA.....	22
4. ZAVARLJIVOST MATERIJALA KORIŠTENIH U IZRADI KONSTRUKCIJA.....	22
4.1 Zavarljivost čelika.....	22
4.1.1 Zavarljivost nelegiranih čelika.....	23
4.1.2 Zavarljivost niskolegiranih čelika.....	24
4.1.3 Zavarljivost visokolegiranih čelika.....	27
4.1 Zavarljivost aluminijske.....	28
4.2 Zavarljivost bakra.....	29
5. PRIMJER ZAVARIVANJA PUTEM MIG TEHNOLOGIJE.....	29

POPIS LITERATURE.....	36
POPIS SLIKA.....	36
POPIS TABLICE.....	37
POPIS GRAFA.....	37

# 1.Uvod

## 1.1 Hipoteza

Uvođenjem naprednih tehnologija zavarivanja u strojarstvo moguće je poboljšati kvalitetu zavarenih spojeva te povećati pouzdanost i dugovječnost strojarskih konstrukcija. Proučavanje raznih tehnologija zavarivanja omogućava odabir optimalnih metoda za različite materijale, što dovodi do poboljšanja mehaničkih svojstava spojeva i smanjenja troškova proizvodnje.

## 1.2 Predmet istraživanja

Predmet istraživanja ovog rada su tehnologije zavarivanja koje se koriste u strojarskim konstrukcijama, s posebnim fokusom na metode poput MIG/MAG, TIG, REL, ESW i ERW. Također, istražit će se materijali koji se najčešće koriste u ovim konstrukcijama, kao što su različite vrste čelika, aluminij i bakar.

## 1.3 Problem istraživanja

Problem istraživanja odnosi se na pronalaženje optimalnih metoda zavarivanja za specifične materijale koji se koriste u strojarskim konstrukcijama. Potrebno je istražiti kako različite tehnologije zavarivanja utječu na kvalitetu zavarenih spojeva, te kako se ti spojevi ponašaju pod različitim uvjetima eksploatacije, što uključuje mehanička opterećenja, koroziju i temperaturne promjene.

## 1.4 Ciljevi istraživanja

Glavni ciljevi ovog istraživanja su:

1. Analizirati i usporediti različite tehnologije zavarivanja koje se koriste u strojarskim konstrukcijama.
2. Istražiti koje se vrste materijala najčešće koriste za izradu zavarenih spojeva u strojarstvu.

3. Utvrditi kako različite tehnologije zavarivanja utječu na mehanička svojstva i dugovječnost zavarenih spojeva.
4. Predložiti optimalne tehnologije zavarivanja za specifične aplikacije u strojarstvu, uzimajući u obzir tehničke i ekonomske aspekte.

### **1.5 Metodologija rada**

U radu se koristiti kombinacija teorijske i praktične analize. Teorijski dio uključivat će proučavanje stručne literature o tehnologijama zavarivanja, materijalima i njihovim svojstvima. Praktični dio obuhvatit će proučavanje stvarnih primjera zavarenih spojeva u industrijskim konstrukcijama, kao i analizu rezultata laboratorijskih ispitivanja zavarenih uzoraka. Usporedba različitih metoda zavarivanja provodit će se prema kriterijima poput čvrstoće zavarenih spojeva, otpornosti na koroziju i troškova implementacije.

### **1.6 Struktura rada**

Rad započinje uvodom koji uključuje hipotezu, predmet istraživanja, metodologiju rada i strukturu rada. Sljedi pregled o tehnologijama zavarivanja korištenih u izgradnji strojarskih konstrukcija. Treće poglavlje fokusira se na općenite svrhe zavarenih strojarskih konstrukcija te njihovih eksploatacija i mehaničkih svojstava. Četvrto poglavlje analizira material poput čelika od čega se izgrađuje većina strojarskih konstrukcija i sljedi detaljna obrada čelika i njegovih vrsta te njihova implementacija. Peto poglavlje analizira zavarljivost aluminija, njegova mehanička svojstva i eksploataciju u strojarskim konstrukcijama. Šesto poglavlje analizira zavarljivost bakra, njegova mehanička svojstva i eksploataciju u strojarskim konstrukcijama. Na kraju, rad se bavi MIG tehnologijom zavarivanja iznad glave ugljičnog čelika kutnim spojem.

## 2. Tehnologije zavarivanja

Postoji mnogo raznih tehnologija zavarivanja materijala, no fokusirat ćemo se na tehnologije zavarivanja koje se najviše koriste kada se priča zavarivanju konstrukcija, te tehnologije jesu:

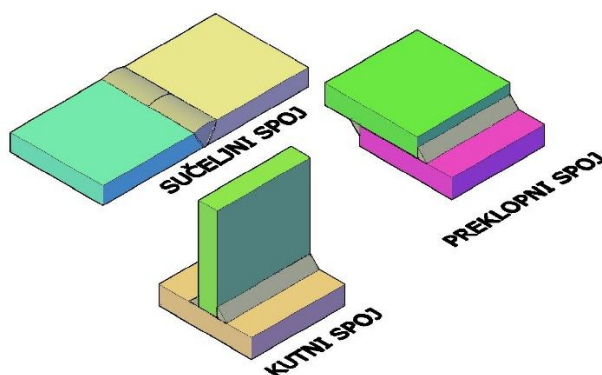
### 2.1 SAW (engl. Submerged arc welding), Zavarivanje pod praškom:

Zavarivanje pod praškom je poluautomatski ili automatski postupak elektrolučnog zavarivanja u kojem se koristi taljiva elektroda, taljiva elektroda je u obliku žice ili u obliku trake. Mehaniziranim uređajem elektroda se dovodi do mjesta gdje je električni luk skriven ispod sloja mineralnog praška. Mineralni prašak je mješavina različitih oksida i soli poput silicijevog dioksida, magnezija, aluminijevog oksida, kalcijevog fluorida, natrijevog oksida. Sastav mineralnog praška ovisi i o vrsti materijala koji se zavarivaju i željenim svojstvima zavara. Postoje dvije vrste praška poput Aktivnog i Neutralnog praška. Aktivni prašak sudjeluje u kemijskim reakcijama tijekom zavarivanja dok neutralni pruža zaštitu i stabilizaciju električnog luka. (Kraut, 1988). Funkcije mineralnog praška jesu:

- Zaštita od oksidacije (štiti zavar od kisika i dušika)
- Stvaranje troske (troska prekriva zavareni spoj i štiti od utjecaja zraka - čvrstoća i kvaliteta spoja)
- Stabilizacija električnog luka (luk je prekriven – zaštita od svjetlosnih i toplinskih zračenja)
- Legiranje zavara (legiranje – poboljšanje mehaničkih svojstava spoja)
- Smanjenje rasprskavanja (poboljšanje čistoće i smanjenje potreba za dodatnim temeljnim čišćenjem)

Rastopljena troska, koja nastaje od praška, štiti i električni luk i rastaljeni spoj, dok nakon hlađenja, čvrsta troska osigurava zaštitu zavara od zraka. Tijekom postupka, električni luk je potpuno prekriven, što značajno smanjuje izloženost svjetlosnom zračenju i prskanju rastaljenih čestica metala i troske, uz minimalno stvaranje dima. Nakon hlađenja, stvrdnuta troska se uklanja. Postoje različite vrste elektrolučnog zavarivanja pod praškom, poput zavarivanja s žičanom ili trakastom elektrodom, te s jednom, dvostrukom ili višestrukim elektrodom. Zavarivanje se obično izvodi na vodoravnim površinama, a ovisno o materijalu koji se obrađuje odabire se vrsta žice i praška. Ova tehnika ima široku primjenu u industrijama gdje se izrađuju velike cijevi, posude, građevinske čelične konstrukcije,

kotlovi, te u brodogradnji za zavarivanje ojačanja, paluba i drugih dijelova. Ovim postupkom se zavarivanju limovi čija je debljina između 4 i 30 mm, a u jednom prolazu mogu se zavariti sučeljni spojevi debljine do 75 mm ili kutni zavari debljine do 10 mm. (Kraut, 1988)



Sl.1 vrsta zavarenih spojeva, sučeljni, preklopni, kutni spoj, izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavareni\\_spoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavareni_spoj)(8.9.2024)

### 2.1.1 Primjena zavarivanja pod praškom u zavarivanju konstrukcija:

Čelične konstrukcije: SAW se koristi za zavarivanje velikih čeličnih profila, poput greda, stupova i nosača u industrijskim zgradama, mostovima, i velikim komercijalnim objektima.

Visokogradnja: metoda je pogodna za izradu velikih čeličnih konstrukcija koje se koriste u visokim zgradama i industrijskim postrojenjima.

Građevina brodova: SAW je široko korišten u brodogradnji za zavarivanje velikih čeličnih panela i struktura, uključujući trupove brodova i druge velike komponente.

Plovila: Ova metoda omogućuje učinkovito spajanje velikih ploča i cijevi koje se koriste u izgradnji plovila.

Cjevovodi: SAW se koristi za zavarivanje velikih cijevi koje se koriste u industrijskim cjevovodima, npr. naftne i plinske cijevi.

Posude pod pritiskom: proizvodnja posuda pod pritiskom npr. kotlovi i reaktori, čvrsti i pouzdani spojevi

Nosivi stupovi i okviri: izrada i montaža nosivih stupova, okvira i drugih strukturnih elemenata u građevinskim projektima.

Ojačanja i dodatni elementi: zavarivanje dodatnih elemenata koji se koriste za ojačanje metalnih konstrukcija. (Kraut, 1988)

Tokom rasprave o tehnologijama zavarivanja također se trebaju spomenuti prednosti i nedostaci, pošto svaka metoda je drukčija i zahtjeva drukčije uvjete i resurse. Prednosti i nedostaci tehnologije zavarivanja pod praškom jesu:

Prednosti:

Visoka produktivnost:

Omogućuje brzo zavarivanje velikih debljina materijala, u jednom prolazu mogućnost zavarivanja debljine od 4 do 75 mm, ovisno o vrsti spoja i materijalu.

Kvaliteta zavara:

Visokokvalitetni zavari s minimalnim količinama pora i drugih nedostataka, troska koja se formira štiti zavar od oksidacije i kontaminacije.

Manje izloženosti štetnim zračenjima:

Električni luk je prekriven slojem praška, što smanjuje izloženost svjetlosnom zračenju i prskanju rastaljenog metala.

Manje dima i mirisa:

Smanjena emisija dima, poboljšanje radnih uvjeta

Pogodnost za rad u nepovoljnim uvjetima:

Korištenje u otvorenim i vanjskim uvjetima zbog zaštite koju pruža troska.

Nedostaci:

Dodatna oprema:

Postupak zahtijeva specijaliziranu opremu za primjenu praška kao npr. dozator praška koji dovodi mineralni prašak iz spremnika na mjesto zavarivanja, vakumski sustav za odvođenje praška, spremnik za prašak, sustav za dovod taljive žice.

Čišćenje troske:

Troska se uklanja, što može zahtijevati dodatne korake i radnu snagu.

Ograničenja u položaju zavarivanja:

Većinom se koristi za vodoravne i nagnute površine, zavarivanje u okomitom ili vertikalnom položaju može biti teže izvedivo.

Teža metoda zavarivanja za početnike:

Može biti teža za upravljanje u usporedbi s nekim jednostavnijim metodama zavarivanja, što može zahtijevati dodatnu obuku i iskustvo.

Kvaliteta praška:

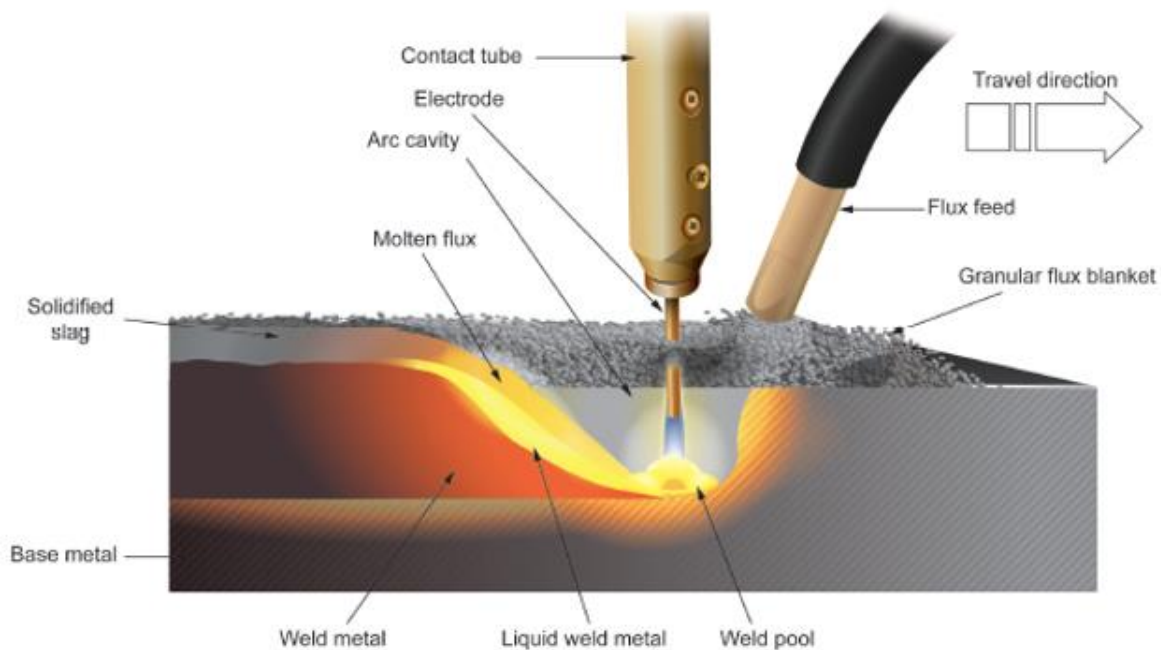
Kvaliteta i sastav praška utječu na rezultat zavarivanja, važno je koristiti odgovarajući prašak.



S1.2 SAW uređaj sa svim svojim komponentama, izvor:

<https://www.indiamart.com/proddetail/automatic-submerged-arc-welding-machine-21597199162.html>(8.9.2024)





Sl.3 objašnjen izgled elektrolučnog zavarivanja pod zaštitinim praškom, izvor:

<https://www.cwbgroup.org/association/how-it-works/what-submerged-arc-welding-saw>

(8.9.2024)

## 2.2) MIG (engl. Metal inert gas), elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina (engl. gas metal arc welding) – GMAW:

To je poluautomatski ili automatski postupak zavarivanja koji koristi kontinuirano napajanje gole žice kao elektrode. Zaštita zavarivanja osigurava se inertnim ili poluinertnim plinovima, najčešće argonom ali se također može koristiti mješavina argona i helija, kako bi se spriječila kontaminacija zavarenog spoja. Elektroda također služi kao dodatni materijal, koji je obično istovrstan osnovnom materijalu koji se zavaruje. Zavarivanje se može izvoditi ručnim vođenjem plamenika (djelomično automatiziranim), mehaniziranim putem (vođenje plamenika pomoću kolica) ili potpuno automatskim postupkom, s prilagodljivim zavarivačkim uređajem. Pogodan je za zavarivanje metala debljine do nekoliko milimetara, ovisno o vrsti materijala, slično kao kod TIG postupka.

Najčešće se koristi za zavarivanje tračnih vozila (aluminijских legura), plovila, prehrambenih posuda (NiCr, Al), cijevi (NiCr, Al), nehrđajućeg čelika, te zavarivanje

sjedišta ventila i slične primjene. U primjenu elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina u zavarivanju konstrukcija spadaju također čelične konstrukcije, visokogradnja, plovila, građevina brodova, cijevovodi, posude pod pritiskom, nosivi stupovi i okviri, ojačanja i dodatni elementi ali se također koristi u proizvodnji teških strojeva i opreme za rudarstvo. (Samardžić, 2012)

U proizvodnji teških strojeva MIG postupak se koristi za spajanje velikih metalnih dijelova i komponenti kao što su strukture i okviri te se koristi u rudarstvu zato što je pogodan za popravak i proizvodnju opreme za rudarstvo, a u tu opremu spadaju: bageri, drobljivači, sito, vlakovi, vagoni, bušački uređaji, pokretne trake itd. (Kraut, 2009)

Prednosti:

Visoka kvaliteta zavara:

Neutralni plin, poput argona, pruža zaštitu električnog luka i zavarenog spoja od oksidacije i kontaminacije, što daje veliku kvalitetu zavara s minimalnim porama i slaganjem (pore su mjehurići plina ili male šupljine koje se nalaze unutar zavarenog spoja, dešavaju se zbog nečistoća ili jer se nije koristila odgovarajuća zaštita zavara), (slaganje je nepotpuno povezivanje zavara sa materijalom – zavareni spoj ne prodire dovoljno duboko u materijal).

Manje prskanja i dima:

Postupak ima manje prskanja i dima u usporedbi s nekim drugim metodama.

Velika brzina zavarivanja:

Kontinuirano napajanje žice omogućuje brzu primjenu materijala, smanjeno vrijeme zavarivanja

Svestranost:

Ovaj postupak je pogodan za zavarivanje različitih vrsta čelika, aluminija i drugih materijala, te se može koristiti za širok spektar deblina materijala.

Udobnost i lakše upravljanje:

Ručno ili automatsko vođenje plamenika omogućava lakše upravljanje i preciznost, što je korisno za složene ili teže pristupne zavarivačke zadatke.

Minimalna priprema materijala:

Zaštita plinom smanjuje potrebu za pripremom površine materijala prije zavarivanja, što može ubrzati proces i smanjiti troškove. (Pavletić, 2012)

Nedostaci:

Troškovi plina:

Korištenje neutralnih plinova poput argona može biti skupo, što povećava troškove operacije, pogotvo kod velikih projekata.

Ograničenje radnih uvjeta:

Zavarivanje pod plinom je otežano na otvorenom prostoru ili na nepovoljnim vremenskim uvjetima, pogotovo ako ima puno vjetra ili kiše, koji ometaju zaštitu plina.

Specijalizirana oprema:

Zahtijeva specijaliziranu opremu za napajanje žice i plinova, što povećava troškove i otežava održavanje opreme.

Potreba za čestim nadzorom:

Potrebno je redovito nadziranje kvalitete plinove zaštite i potrošnju žice

Ograničenja u debljinama materijala:

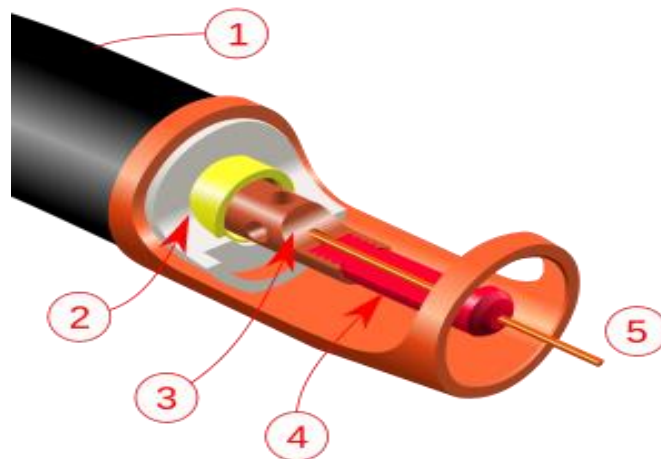
Manje učinkovit za vrlo tanke materijale ili za specifične primjene gdje su druge metode prikladnije.

Završni radovi:

Ponekad će biti potrebni dodatni radovi kao što su brušenje ili čišćenje zbog ostataka ili nesavršenosti na spoju. (Pavletić, 2012)

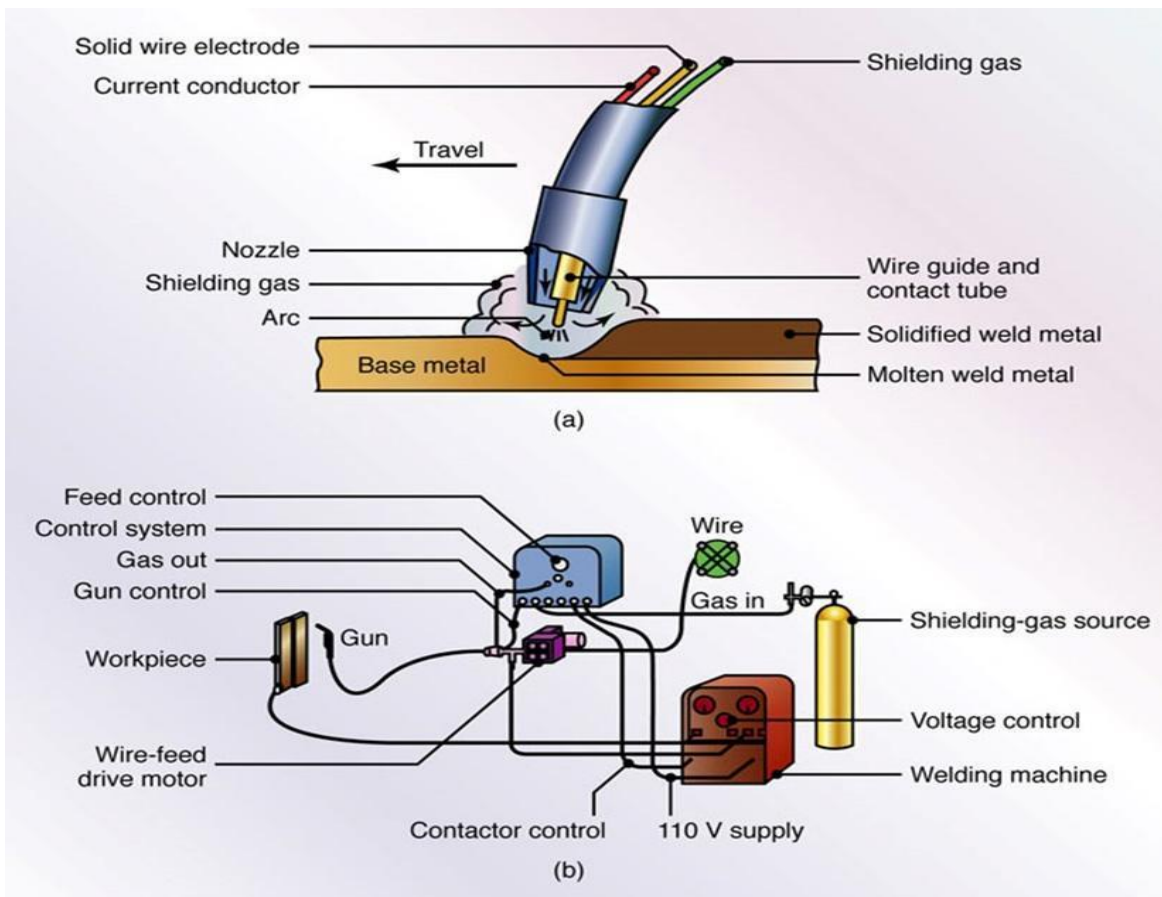
Također je vrijedno spomenuti MAG zavarivanje (engl. metal active gas).MAG tehnologija je slična MIG tehnologiji no razlikuju se u nekim aspektima poput vrstama plinova koje se koriste prilikom zavarivanja i njihove utjecaje na primjene i svojstva zavarenih spojeva. Odabir MAG ili MIG zavarivanja ovise o vrsti zahtjeva i o vrsti materijala koji se spaja. MAG zavarivanje se koristi za zavarivanje građevinskih konstrukcija, koristi se dioksid ili mješavina dioksida i argona što su aktivni plinovi koji reagiraju s materijalom tokom

zavarivanja koji u konačnici utječu na karakteristike zavarenog spoja. Tokom reagiranja sa materijalom dolazi do poboljšanja prodora zavarivanja i njegove brzine, no stvara više troske i nečistoće su učestalije. Dok MIG zavarivanje se više fokusira na zavarivanje materijala koji traže veliku kvalitetu i preciznost, MAG je više idealniji kad se priča o učinkovitosti i brzini. Nakon šta smo usporedili MIG i MAG, ostaje nam vrijedna usporedba MIG i TIG tehnologije zavarivanja. MIG i TIG tehnologije se razlikuju po elektrodama, MIG koristi potrošnu žičanu elektrodu koja se topi i stvara zavareni spoj, TIG tehnologija koristi Tungstenovu ili drugi naziv za Volframovu elektrodu. Volframova elektroda se ne troši niti se lijepi prilikom zavarivanja. Volframova elektorda sama stvara električni luk ali ne doprinosi materijalu zavara dok se žičana elektroda topi kako bi stvorila zavareni spoj. U TIG zavarivanju koriste se inertni plinovi poput argona i helija koji ne reagiraju sa materijalom već stvaraju čistu i stabilnu atmosferu oko električnog luka što u konačnici rezultira na preciznije zavarivanje, idealno za tanke materijale poput nehrđajućeg čelika i aluminija. TIG tehnologija zavarivanja se koristi pretežito u zrakoplovnoj, automobilskoj i prehrambenoj industriji, no također za tanke ploče i cijevi. Područje korištenja TIG tehnologije zavarivanja je tamo gdje je ključna visoka kvaliteta zavara. (Pavletić, 2011)



Sl.4 slika pištolja za zavarivanje MIG postupkom i njegove komponente:

- (1) ručica pištolja, (2) plastična izolacija (bijele boje) i navojni metalni umetak (žute boje),  
(3) raspršivač zaštitnog plina, (4) vodilica za žicu, (5) izlaz pištolja, izvor:  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje\\_MIG\\_postupkom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_MIG_postupkom) (12.9.2024)



- Sl.5 slika ostalih uređaja potrebnih za izvršenje zavarivanja MIG metodom, izvor:  
<https://www.kovinc.com/wiki/mig-welding> (12.9.2024)

### **2.3) REL (primjene u konstrukciji) zavarivanje, elektrolučno zavarivanje obloženo elektrodom (engl. shielded metal arc welding – SMAW):**

Najčešće korišten postupak, operira se tako da električna struja pokreće električni luk između osnovnog materijala i potrošne elektrode, čija obloga osigurava zaštitu zavara od oksidacije i kontaminacije stvaranjem ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>).

Elektroda istodobno služi kao dodatni materijal za formiranje zavara.

Postupak je vrlo svestran i može se provoditi s relativno jeftinom opremom, što ga čini pogodnim za rad u radionicama i na otvorenim gradilištima.

Zavarivanje je relativno sporo jer se elektrode često moraju mijenjati, a troska čistiti nakon svakog zavara. Ovaj postupak uglavnom se koristi za zavarivanje čeličnih proizvoda, iako postoje specijalne elektrode za lijevano željezo, nikal, aluminij, bakar i druge metale. Ručno elektrolučno zavarivanje se obično obavlja na otvorenom. Zaštitu luka i taline zavara od zraka pružaju plinovi i troska, koji nastaju taljenjem i kemijskim reakcijama obloge elektrode. Obloge elektroda imaju i druge funkcije, poput stabilizacije luka, legiranja, dezoksidacije i smanjenja sadržaja sumpora i fosfora u talini. Prema namjeni, postoje elektrode za zavarivanje, navarivanje, žlijebljenje i rezanje. Također se razlikuju elektrode za specifične radne zahtjeve, poput onih za zavarivanje u okomitom položaju, iznad glave ili zavarivanje korijena spojeva. Ručno elektrolučno zavarivanje ima široku primjenu u proizvodnji, navarivanju i popravcima većine metalnih materijala. Međutim, zbog niže brzine zavarivanja (1,5 do 2 kg položenog materijala na sat), primjenjuje se uglavnom za kraće zavare, sučeone spojeve debljine do 20 mm, te za kraće kutne spojeve manje debljine zavara. (Samardžić, 2012)

Prednosti:

Jednostavnost opreme:

Zahtijeva jednostavnu i jeftinu opremu u usporedbi s drugim metodama, čini ga dostupnim za puno gradilišta.

Svestranost:

Obložene elektrode se koriste za zavarivanje različitih materijala poput čelika, lijevanog željeza, aluminijske, i drugih metala.

Pogodnost za rad u nepovoljnim uvjetima:

Pogodan za rad na otvorenom ili u nepovoljnim uvjetima jer obloga elektroda stvara zaštitu koja sprječava prodiranje atmosferskih nečistoća.

Široka primjena:

Koristi se u različitim industrijama, poput građevinske, brodogradnje.

Dobra kvaliteta zavara:

Postizanje dobrih mehaničkih svojstava zavara poput čvrstoće i duktilnosti (rastezanje, oblikovanje, otpornost na pucanje).

Nedostaci:

Sporo zavarivanje:

Sporiji u usporedbi s drugim metodama, jer se elektrode moraju često mijenjati, a troska se mora uklanjati nakon svakog zavarivanja.

Visoki troškovi potrošnog materijala:

Troškovi potrošnih elektroda mogu biti visoki, pogotovo za velike projekte.

Veća količina dima i prskanja:

Postupak proizvodi više dima i prskanja u odnosu na druge metode, što otežava radne uvjete i zahtijeva dodatnu ventilaciju ili zaštitu.

Pažnja kod čišćenja:

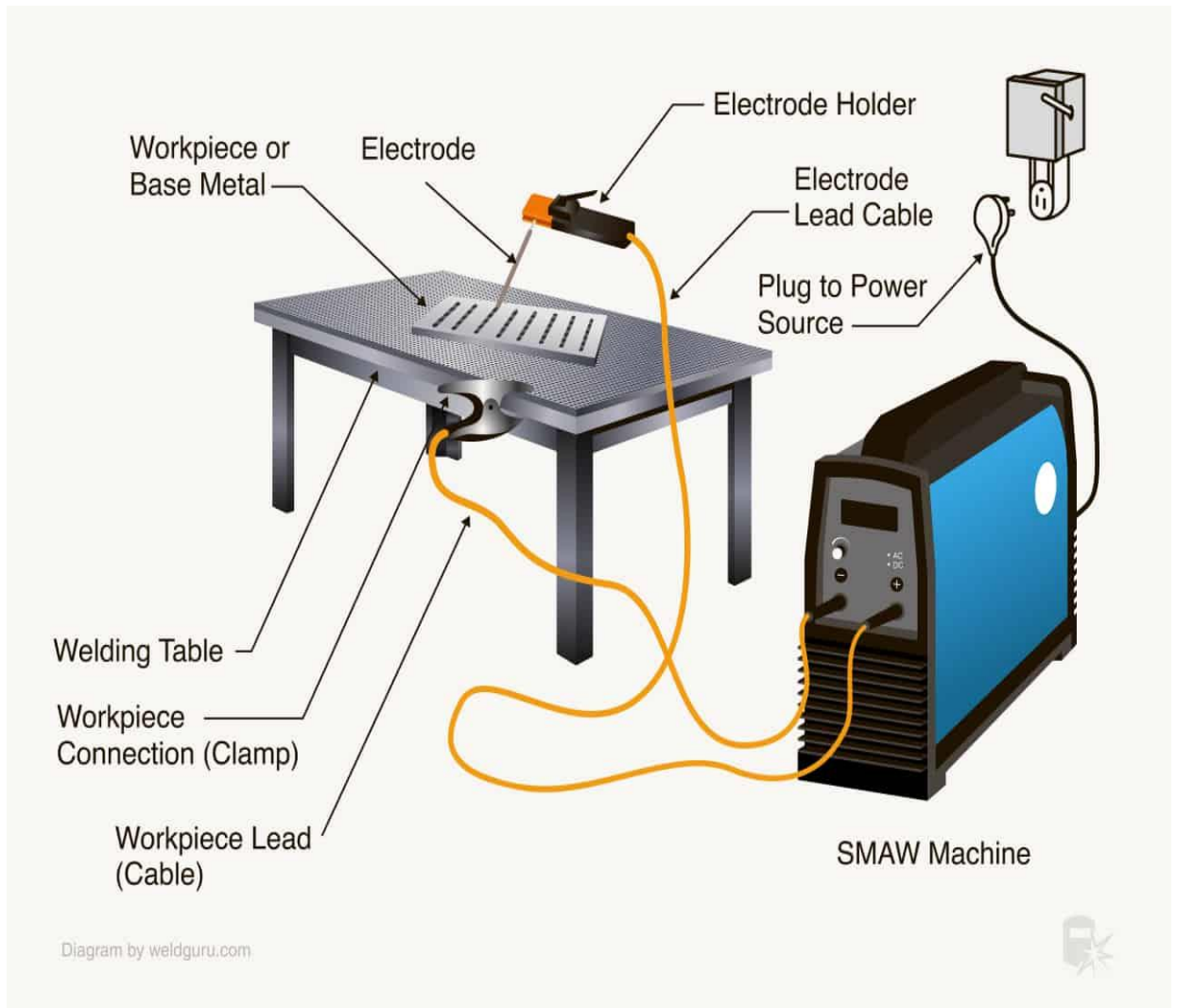
Troska koja nastaje tijekom zavarivanja mora se redovito uklanjati.

Ograničenja u veličini i debljini materijala:

Postupak može biti manje prikladan za vrlo tanke materijale ili za deblje materijale.

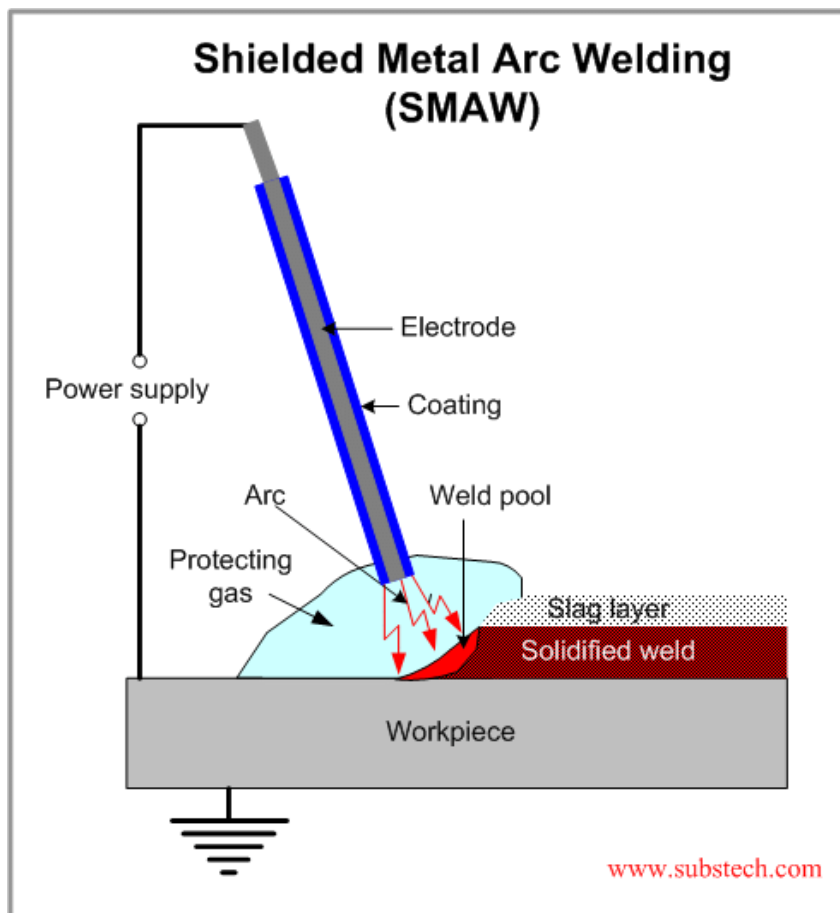
Utjecaj na kvalitetu zavarivanja:

Kvaliteta zavarivanja može biti neujednačena ako se ne prate pravilni uvjeti, poput brzine zavarivanja i kuta držanja elektroda. (Pavletić, 2012)



S1.6 svih potrebnih uređaja za uspješno zavarivanje uz pomoć SMAW metode, izvor: <https://weldguru.com/smaw-welding/> (12.9.2024)





Sl.7 pištolj za zavarivanje pomoću SMAW metode i njegovog utjecaja uz korištenje zaštitnog plina, izvor: [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shielded\\_metal\\_arc\\_welding\\_smaw](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shielded_metal_arc_welding_smaw) (12.9.2024)

#### 2.4) Zavarivanje električnom troskom (engl. electroslag welding) - ESW:

je specifičan postupak elektrolučnog zavarivanja koji koristi toplinu generiranu kroz električnu struju koja prolazi kroz trosku. Troska se stvara taljenjem posebnih flukseva (prašaka) i koristi se za topljenje rubova materijala koji se zavaruje. Električni luk se inicijalno stvara između potrošne elektrode i materijala, ali nakon formiranja troske, on prestaje postojati, a toplina potrebna za zavarivanje dolazi isključivo iz prolaska struje kroz rastaljenu trosku.

Osnovni koraci postupka: Započinje se s formiranjem električnog luka između potrošne elektrode i osnovnog materijala. Troska se taljenjem fluksa stvara i postaje vodljiva za

električnu struju. Kada troska dosegne dovoljno visoku temperaturu, ona topi rubove materijala i elektrodu, stvarajući zavar.

Nakon hlađenja, stvara se čvrsti zavareni spoj, a troska se uklanja. (Pakrac, 2008)

Primjena: Ovaj postupak se najčešće koristi za zavarivanje debljih komada metala, posebno u industrijama koje proizvode tešku opremu i komponente, poput:

- Proizvodnje velikih čeličnih odljevaka i odkovaka,
- Zavarivanja debelih čeličnih ploča (čak do nekoliko stotina milimetara debljine),
- Proizvodnje velikih konstrukcijskih elemenata, poput mostova, pritisnih posuda, kotlova i okvira za tešku industrijsku opremu.

Prednosti:

Visoka produktivnost:

Zavarivanje električnom troskom omogućuje brzo zavarivanje velikih debljina materijala, korisno za industrijske aplikacije gdje je ključna brzina i učinkovitost.

Visoka kvaliteta zavara:

Troska stvara odličnu zaštitu od oksidacije i kontaminacije, što zavarima daje manje pore i dobra mehanička svojstva.

Manje izloženosti štetnim zračenjima:

Električni luk je prekriven slojem troske pa smanjuje izloženost svjetlosnom zračenju, prskanju metalnih čestica i količinu dima.

Moguće zavarivanje velikih debljina:

Idealan za zavarivanje debelih materijalamože efikasno spojiti debljine od nekoliko milimetara do nekoliko stotina milimetara u jednom prolazu.

Smanjena potreba za dodatnim radom:

Zbog njegove dobre kvalitete smanjuje potrebu brušenja i popravljivanja.

Svestranost u primjeni:

Pogodan je za industrijske aplikacije poput brodogradnje, izradu velikih čeličnih konstrukcija i proizvodnju posuda pod pritiskom.

Nedostaci:

Visoki troškovi opreme i potrošnog materijala:

Zahtijeva specijaliziranu opremu i trosku koje mogu biti skupe, što rezultira u povećanju troškova i održavanja.

Ograničenja u radnim uvjetima:

Zavarivanje električnom troskom odvija se kontroliranim okruženjima, pošto rad na otvorenom i vremenski uvjeti utječu na zaštitu troske.

Potrebno dodatno čišćenje:

Nakon svakog završenog zavarivanja mora se ukloniti troska.

Kompleksnost postupka:

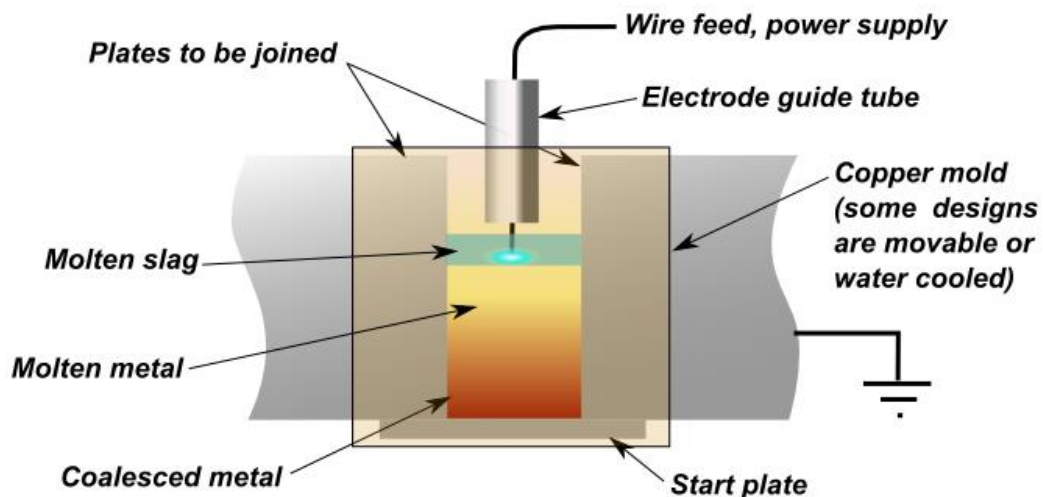
Iako je automatski postupak vrlo precizan, ručno zavarivanje može biti složenije i zahtijevati dodatnu obuku za postizanje optimalnih rezultata.

Ograničenja u položaju zavarivanja:

Najbolje rezultate postiže se kod vodoravnih i nagnutih spojeva, zavarivanje u vertikalnim ili okomitim položajima je teže.

Ovisnost o kvaliteti troske:

Loša kvaliteta troske može negativno utjecati na rezultate zavarivanja. (Pakrac, 2008)



Sl.8 način zavarivanja ESW metodom, izvor:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electroslag\\_welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Electroslag_welding) (14.9.2024)



Sl.9 slika zavarenog spoja dvaju debljih čeličnih ploča putem ESW tehnologije, izvor: <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/electro-slag-welding-esw-of-steels-1/> (14.9.2024)

### **2.5) Elektrootporno zavarivanje (engl. electric resistance welding) – ERW:**

je način zavarivanja električnom energijom gdje se uvijek koristi pritisak i toplina, koja nastaje zbog velikog električnog otpora na mjestu dodira zavarivanih dijelova. To je tzv. Jouleova toplina.

Koristi se uglavnom izmjenična struja niskog napona, vrlo velike jakosti i kratkog trajanja. Postoje mnoge vrste elektrootpornog zavarivanja poput: točkastog, bradavičastog, šavno, sučeljno vodootporno, elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem i indukcijsko zavarivanje. (Kraut, 2009)

Usredotočit ćemo se na indukcijsko zavarivanje pošto mu je primjena za izradu konstrukcijskih profila.

- Indukcijsko zavarivanje konstrukcijskih profila:  
je specifična primjena indukcijskog zavarivanja koja se koristi za spajanje velikih metalnih profila, kao što su čelične grede, stupovi, i drugi građevinski elementi. Ovaj postupak koristi elektromagnetsku indukciju za stvaranje topline potrebne za

zavarivanje profila, omogućujući precizno i učinkovito spajanje velikih metalnih komponenti. (RamRijeka, 2012)

### **2.5.1 Princip rada:**

Elektromagnetska indukcija koristi izmjeničnu struju koja prolazi kroz namotaje (zavojnice) postavljene oko profila. Ova struja stvara magnetsko polje koje inducira toplinu unutar metalnog profila i omogućuje da se materijal zagrije do temperature koja omogućava taljenje i spajanje.

- Postavke procesa:
- Indukcijski namotaji: Namotaji su postavljeni tako da obuhvate područje spoja između dva konstrukcijska profila.
- Kada kroz njih prođe izmjenična struja, stvara se potrebna količina topline za zavarivanje.
- Materijali: Profil je unaprijed pripremljen i postavljen u pravilan položaj za zavarivanje., toplina se primjenjuje direktno na područje spoja, što omogućava stvaranje čvrstog i kvalitetnog zavara.

Prednosti:

Visoka preciznost:

Precizno kontroliranje topline i položaja, što je ključno za osiguranje točnih i kvalitetnih spojeva na velikim konstrukcijskim profilima.

Brzina procesa:

Proces je brz jer se toplina generira direktno u materijalu i odmah koristi za zavarivanje, pomoću čega se smanjuje vrijeme proizvodnje.

Minimalna deformacija:

Precizno kontroliranje topline dovodi do manje deformacije materijala.

Energetska učinkovitost:

Toplina se generira izravno u materijalu, što smanjuje gubitak energije.

Nedostaci:

Visoki troškovi opreme:

Oprema za indukcijsko zavarivanje je skupa, manja poduzeća ili manji projekti si je ne mogu priuštiti.

Ograničenja u materijalima:

Prikladniji za materijale koji dobro reagiraju na elektromagnetsku indukciju, poput čelika i nekih legura i manje je učinkovit za materijale koji imaju nizak električni otpor.

Složenost postavki:

Proces zahtijeva preciznu kontrolu i postavke, zahtijeva više znanja i obuke.

Ograničenja veličine:

U slučaju velikih konstrukcija potrebno je korištenje drugih metoda zavarivanja.

(RamRijeka, 2012)

Primjene u Industriji:

Građevinski sektor:

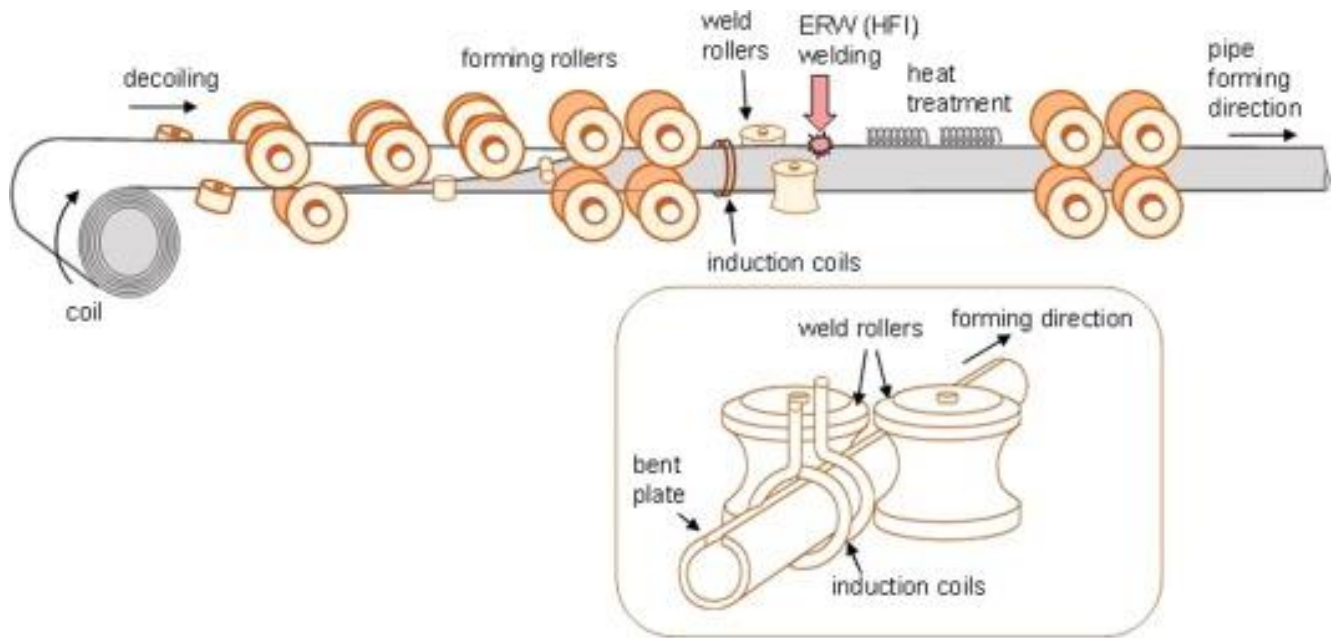
zavarivanje velikih čeličnih profila u građevinskim konstrukcijama, poput mostova, zgrada i industrijskih hala.

Brodogradnja:

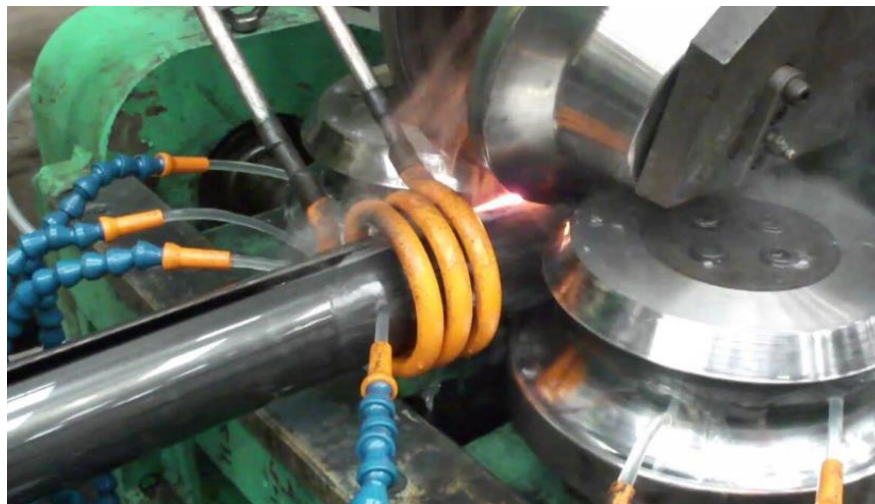
Zavarivanje velikih čeličnih komponenti u brodogradnji.

Proizvodnja teških strojeva:

Koristi se za spajanje velikih metalnih dijelova u proizvodnji teških strojeva i opreme.



Sl.10 slika načina zavarivanja putem ERW metode i kretanja materijala u finalni produkt cijevi, [izvor: https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electric-resistance-welding](https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electric-resistance-welding) (14.9.2024)



Sl.11 slika bližeg izgleda tokom ERW zavarivanja, izvor: <https://www.permanentsteel.com/newshow/main-points-of-quality-control-in-high-frequency-welded-pipe-welding-process.html> (14.9.2024)

### **3. Konstrukcije**

Zavarene konstrukcije su konstrukcije kod kojih se primjenjuje tehnologija zavarivanja za spajanje elemenata te konstrukcije npr. pozicija, sklopova i podsklopova. Problemi koji se uvijek trebaju pomno pratiti i uzimati u obzir su problemi zavarenog spoja jer može doći do slabljenja na istom spoju. Najbolja zavarena konstrukcija je ona koja sadrži najmanje zavarenih spojeva.

Važna stavka prije zavarivanja konstrukcija je istraživanje materijala koji će se zavarivati, u to spadaju: njegova mehanička svojstva, sadržaj kemijskih elemenata i debljina materijala. Pomoću istraživanja i saznatih stavki može se odrediti kakve se teškoće mogu javljati i očekivati prilikom zavarivanja, imati poznate uvijete eksploatacije i kakvi se zahtjevi za kvalitetu trebaju ispuniti.

Konstrukcije su građene od raznih vrsta materijala, odabir materijala za konstrukciju ovisi o njezinoj eksploataciji, mehaničkih svojstava. Konstrukcija može biti otporna na koroziju, toplinu, razina fleksibilnosti i nosivosti konstrukcije. Obradit ćemo vrste materijala koji se koriste u konstrukcijama te proučiti njihova svojstva i naposljetku saznati koje se prijašnje obrađene tehnologije zavarivanja koriste za te vrste materijala. (Valentino, 2016)

### **4. Zavarljivost materijala pretežito korištenih u konstrukcijama**

#### **4.1 Zavarljivost čelika**

Čelik je legura željeza i ugljika (2,06%), svo proizvedeno sirovo željezo se prerađuje u čelik, jer čelik sadrži puno bolja mehanička svojstva od željeza poput čvrstoće, tvrdoće, žilavošću, elastičnošću, mogućnost lijevanja i mehaničke obrade koje su i karakteristike čelika.

Podjela čelika:

- Prema postupku proizvodnje
- Prema kemijskom sastavu – legirani i ugljični čelici
- Prema namjeni – alatni i konstrukcijski čelici
- Prema mikro strukturi – austeniti, feritni, martenzitni, perlitni, ledeburitni
- Prema preradi – kovani, sirovi, ljevani, valjani, vučeni čelici



Pošto čelik sadrži ugljik koji mu povećava mehanička svojstva poput tvrdoće i čvrstoće, također udio ugljika je poželjno imati što manje kada pričamo o zavarivanju. Čelici koji su skloniji boljem zavarivanju su oni koji sadrže manje od 0.25% udio ugljika. (Valentino, 2016)

#### 4.1.1 Zavarljivost nelegiranog čelika

Nelegirani čelik se koristi kao glavni element kod izrade mnogih konstrukcija u praksi zbog svojih pogodnijih svojstava poput:

- Niska cijena i široka dostupnost
- Laka obrada i mogućnost dobrog zavarivanja
- Duktilnost i čvrstoća
- Raznovrsna primjena i sposobnost daljnje obrade
- Dugotrajnost
- Sigurnost

Najvažniji element u nelegiranim konstrukcijskim čelicima je upravo ugljik, sadržaj ugljika varira u granicama od 0.1 do 0.6 %. Također sadrži ostale elemente poput: 0.5% Si (Silicij), 0.1 Al (Aluminij), 0.1% Ti (Titan), 0.8 Mn (Mangan), 0.05% S (Sumpor), 0.25 Cu (Bakar) i 0.05 P (Fosfor).

Naveli smo već čelike koji su dobri za zavarivanje, no također se koriste čelici sa većim udio ugljika  $C > 0.25\%$  za koje je zavarljivost uvjetna. Prije zavarivanja tih čelika postoji nekoliko mjera kako bi se smanjila vjerojatnost pukotina i kako bi postigli zadovoljavajuća svojstva, u nastavku sljede mjere za kvalitetno zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika.

##### 1. Predgrijavanje

Na temperaturu predgrijavanja nelegiranih čelika utječe postotak ugljika, debljina stjenke, upetost i sadržaj difuzijskog vodika, što dovodi do konstante regulacije temperature.

C, %	To, °C
0.20 – 0.30	100 – 150
0.30 – 0.45	150 – 275
0.45 – 0.8	275 - 425

Tab.1 Tablica koja označuje temperature predgrijavanja nelegiranih čelika prilikom njihovog zavarivanja, izvor: Valentino, D. (2016, Uvod u projektiranje tehnologije zavarivanja, zavarljivost i ispitivanje zavarenih spojeva. Završni rad Sveučilište Sjever Varaždin) (15.9.2024)

2. Zavarivljanje sa većim unosom topline

Veći unos topline tokom zavarivanja možemo ostvariti ako nam je brzina zavarivljanja manja, veća struja i promjer elektrode što rezultira u smanjenju zakaljivanja (tvrdoće) i manja vjerojatnost hladnih pukotina

3. Primjena bazičnih elektroda

Primjenom bazičnih elektroda dobijamo veću udarnu žilavost i istežljivost koje rezultiraju u manju mogućnost pukotina.

4. Za smanjenje naprezanja, debljine i diskontinuiteta (koncentracije naprezanja), potrebno je održavati nizak sadržaj sumpora (S) i fosfora (P). Sadržaj S i P obično se ograničava na 0,05%, dok suvremeni čelici često imaju ispod 0,035% tih elemenata. Ova razina se smatra maksimalno prihvatljivom za dobru zavarljivost. Posebnim rafiniranjem moguće je smanjiti sadržaj sumpora na 0,001%. Čelici s tako niskim sadržajem sumpora otporni su na tople pukotine uzrokovane korozijom i na trganje u slojevima.

Tehnologije zavarivanja koje koristimo u zavarivanju nelegiranih čelika su:

- MIG/MAG – zaštitni plin im je aktivni plin koji pomaže u poboljšanju kvalitete zavarenog spoja, zavarivanje automobilskih dijelova, građevinske materijale i metalne konstrukcije
- SMAW/REL – elektroda je izvor topline i dodatni materijal, zavarivanje nelegiranih čelika u građevinskoj industriji i popravak opreme
- TIG – zahtjev visoke preciznosti i kontrole nad zavarivanjem – cjevovodi, cjevni spojevi, tankovi
- SAW – električni luk prekriven slojem praška – štiti zavareni spoj od oksidacije i zraka – debele ploče nelegiranih čelika – mostovi, teške konstrukcije, cijevi

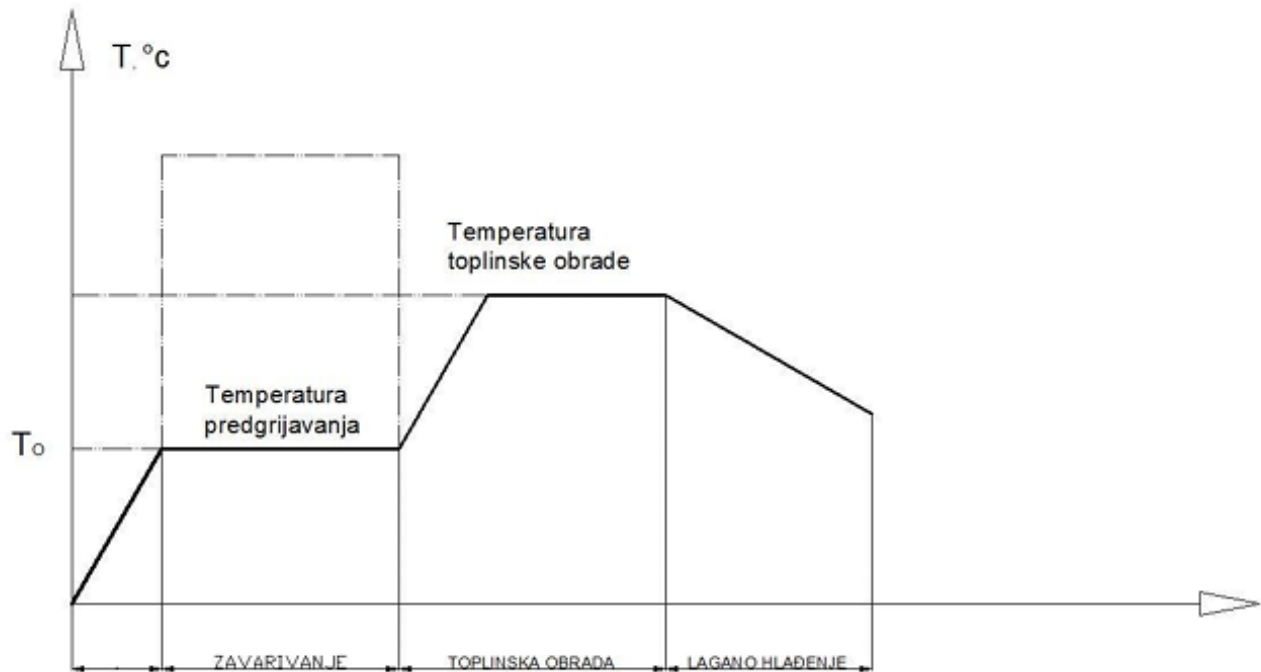
(Valentino, 2016)

#### 4.1.2 Niskolegirani čelici i čelici otporni na puzanje

Niskolegirani čelici i čelici otporni na puzanje se koriste najviše za rad gdje su prisutni velikim temperaturama jer što je viša temperatura čelici postižu višu čvrstoću. Kako ti čelici u sebi sadrže Krom (Cr) i Molibden (Mo), Cr i Mo zajedno povećavaju njihovu prokaljivost, dok Cr stvara zaštitni oksidni sloj na površini koji radi otpor na oksidaciju pri visokim temperaturama. Javljanje hladnih pukotina je moguće iz razloga što se zavarljivost i prokaljivost čelika s više legiranih dodataka povećava, povećava se također tvrdoća, što je veća čvrstoća i tvrdoća tome su više skloni hladnim pukotinama. Kako bi se spriječile hladne pukotine potrebno je sljedeće:

- Elektorde s niskim sadržajem difuzijskom vodika – hladne pukotine koje se isto zovu Vodikove pukotine nastaju zbog nakupljanja difuzijskog vodika unutar zavarenog spoja nakon što se ohladi, elektrode s niskim sadržajem difuzijskog vodika imaju kontrolirane razine vlage u oblozi elektroda koje spriječavaju stvaranje vodika tokom zavarivanja.
  
- Predgrijavanje C (ugljik) – Mo (molibden) čelika:
  - do 10 mm debljine – nije potrebno predgrijavanje
  - preko 10 mm debljine – predgrijavanje na 200 °C
  - jače legirane materijale – predgrijavanje na 200 – 300 °C

Nakon zavarivanja uz pregrijavanje, u slučaju da je potrebna toplinska obrada, preporuka je dizanje temperature predgrijavanja čelika na temperaturu odžarivanja. Odžarivanje čelika je smanjenje unutarnjih napreznja, povećanje duktilnosti i žilavosti, te poboljšanje mikrostrukture čelika nakon zavarivanja. Pomoću toga možemo smanjiti nastanak pukotina pri hlađenju zavarenog spoja.



Graf.1 graf na kojem se vidi dizanje temperature na temperaturu toplinske obrade niskolegiranih čelika, izvor: Valentino, D. (2016, Uvod u projektiranje tehnologije zavarivanja, zavarljivost i ispitivanje zavarenih spojeva. Završni rad Sveučilište Sjever Varaždin) (15.9.2024)

Tehnologije zavarivanja koje koristimo u zavarivanju niskolegiranih čelika su:

- MIG/MAG
- SMAW/REL
- TIG
- SAW
- ESW – zavarivanje debelih materijala – niskolegirane čelične konstrukcije – mostovi, brodovi, industrijski spremnici.
- ERW – proizvodnja cijevi za vodu, plin i naftu

(Valentino, 2016)

#### 4.1.3 Zavarivanje visokolegiranih čelika

Čelici koji imaju više od 4% sadržaja legirajućih elemenata spadaju u skupinu visokolegiranih čelika, visokolegirani čelici nakon što se visko temperaturno zagrijaju te se ohlade na zraku dobijaju različitu strukturu materijala, te mogu se podijeliti na:

- martenzitni čelici (meko martenzitni)
- martenzitno – feritni čelici
- austenitno – martenzitni čelici
- austenitno – feritni čelici
- feritni čelici
- austenitni čelici

Prilikom zavarivanja martenzitnih Cr – čelika (13% - 18% Cr) u praksi se koriste materijali s postotkom ugljika manjim od 0.15 %. Kod većih udjela ugljika može doći do hladnih pukotina i zakaljivanja u zoni utjecaja topline što rezultira povećanjem tvrdoće, čvrstoće, pada duktilnosti i gubitka korozijske postojanosti.

Za zavarivanje feritnih čelika ( 13% - 30 % Cr, manje od 0.1 % C) potrebno je koristiti sušene obložene elektrode i prašak, predgrijati na temperaturni raspon od 200 °C do 300 °C, osigurati minimalni unos topline do 1.5 kJ / mm zbog sprječavanja većih pogrubljenja te koristiti odgovarajuće austenitne dodatne materijale zbog pada žilavosti u području zavarenog spoja.

Austenitni čelici su danas najraširenija grupa s gledišta primjene i proizvodnje, a karakterizira ih visoka duktilnost i niska čvrstoća. Danas se austenitni čelici smatraju relativno zavarljivim materijalima. Bez obzira na njihovu veliku otpornost prema koroziji, prilikom zavarivanja može se povećati osjetljivost prema koroziji u procjepu, pa može doći do toplih pukotina.

Tehnologije zavarivanja koje koristimo u zavarivanju visokolegiranih čelika jesu:

- TIG – korištenje volframove elektrode – precizno zavarivanje visokolegiranih čelika – tanki materijali
- MIG/MAG – automobilska industrija i brodogradnja

- ESW – debelo zavarivanje visokolegiranih čelika u brodovima i industrijskim spremnicima
- ERW – proizvodnja dugih cijevi i tankih limova

(Valentino, 2016)

#### **4.2 Zavarljivost aluminija**

Aluminij sadrži visoku otpornost na koroziju jer mu se stvara zaštitni oksidni sloj na površini, kada je aluminij u kontaktu s zrakom, on reagira s kisikom i stvara aluminij oksid na površini (ako se taj sloj slučajno ošteti automatski se sam regenerira ako je u dodiru s kisikom. Manja mu je gustoća i čvrstoća u usporedbi sa čelikom, no aluminij sadrži dobar omjer čvrstoće i težine što ga čini boljim izborom za primjenu u laganim konstrukcijama. Aluminij se isključivo može zavarivati u zatvorenom prostoru jer ima drukčija fizička i kemijska svojstva od čelika. Aluminij sadrži sljedeće karakteristike:

- Dobra toplinska vodljivost
- Jaka električna vodljivost
- Veliki koeficijent toplinskog rastezanja
- Tokom zagrijavanja nema mijenjanja boje
- Skol vrućim pukotinama (formiraju se tokom zavarivanja dok je aluminij jos u rastaljenom stanju, te se pojavljuju u zahvatu zavara gdje je aluminij u polutekućem ili tekućem stanju zbog toplinskih naprezanja – širi se i skuplja)

Tehnologije zavarivanja koje se koriste pri zavarivanju aluminija:

- TIG – minimalno prskanje, dobra kontrola nad toplinom zavarivanja, preciznost - tanki limovi
- MIG – teža za kontrolirati, zahtjev visoke preciznosti u postavkama opreme i plina – veće debljine limova – karoserija auta, strukture od aluminisjkog lima i profila, okviri i krila zrakoplova

(Valentino, 2016)

### 4.3 Zavarljivost bakra

Bakar sadrži visoku toplinsku provodnost, te je sklon oksidaciji i ima niska tališta za razliku od drugih metala pa je poprilično zavarivanje izazovno. Poteškoće koje se javljaju pri zavarivanju bakrenih legura:

- Visoka toplinska vodljivost – 6 puta veća toplinska vodljivost od čelika što znači da se na mjesto zavarivanja mora dovesti velika količina topline, zavareni spoj se treba izolirati uz pomoć šamotnih opeka kako bi se spriječilo odvođenje topline na zavarenom spoju
- Afinitet s kisikom i Vodikom – dok je u rastaljenom stanju, ima veliki afinitet prema kisiku i vodikom što može negativno utjecati na kvalitetu zavarenog spoja, koristi se zaštita taline poput boraksa ili smjese boraksa i borne kiseline nakon čišćenja površine zavarenog spoja
- Cinkove pare – stvaranje opasnih cinkovih para – potrebno korištenje zaštite i radno mjesto treba biti dobro prozračeno
- Visoka žitkost taline – izvođenje zavarivanja u položenom položaju zbog bolje kontrole nad postupkom
- Unutarnja naprezanja i deformacije – širenje i stezanje materijala

Tehnologije zavarivanja koje se koriste pri zavarivanju bakra:

- TIG – zavarivanje tankih bakrenih limova, strukturalni elementi u industrijskoj opremi, bakreni vodiči, konektori, terminali (električna oprema)
- MIG – vodiči, konektori, terminali, okviri, bakrene cijevi za transport tekućina i plinova, dijelovi hladnjaka i klimatizacijskih uređaja

(Valentino, 2016)

### 5. Primjer zavarivanja putem MIG tehnologije

U nastavku ću objasniti primjer zavarivanja koristeći MIG tehnologiju za spajanje dvije ravne plohe ugljičnog čelika kutnim spajanjem. Zavarivanje se odvija iznad glave i radi se o kutnom spoju. Tokom zavarivanja iznad glave postoji mnogo izazova koji se trebaju uzeti u obzir poput:

- Nanos zvara protiv gravitacije
- Prskanje zavarivanja koje pada na lice i tijelo
- Kontrola brzine zavarivanja

Zavarivanje MIG postupkom iznad glave se koriste žice malog promjera, promjer korišten u primjeru je 0,8 milimetara (0.030 inča). Prije početka zavarivanja postavljaju se niži parametri

jačine struje koja se prevodi jer je onda lakša kontrola zavarivanja, te se koristi duža žica koja rezultira isto tako u niskoj jačini struje te proizvode manju kupku, treba uzeti u obzir da može doći do topljenja vrha žice koja se onda zalijepi u zavareni spoj, što rezultira u tome da zavar ne prodre kako treba između dva materijala.



Sl. 12 slika zavarivanja MIG metodom iznad glave sa manjom dužinom žice, izvor:

[https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)

Sljedeće što se uzima u obzir je način prijenosa kratkog spoja iznad glave, koristi se pulsni aparat za pulsni način prijenosa metala. Pulsni aparat proizvodi male metalne kapljice prijenosom kratkog spoja te radi s malim unosom topline koja se isto tako može i kontrolirati da prskanje bude minimalno.





Sl.13 slika pulsnog aparata koji se koristi za prijenos metala pomoću električne struje, izvor: <https://proinstal.hr/shop/aparati-zavarivanje-varenje/mig-mag-fcaw-co2/dupli-pulsni-co2-aparat-za-varenje-mig-tig-mma-200a/> (17.9.2024)

Veličina rastaljene kupke također igra ulogu pošto manja veličina kupke omogućiti površinskoj napetosti da je drži na mjestu te pošto zahtijeva manju jačinu struje, stvara manje problema sa potkopavanjem. Brzina dovoda žice se kontrolira ovisno o operateru, no treba uzeti u obzir da naslage žice trebaju biti što manje. Brzina zavarivanja iznad glave je jako bitna jer jedan od glavnih problema koji se javljaju je taj da var ne prodre kako treba na početku zavarivanja zbog brzog rasipanja topline, što se može riješiti koristeći tehniku „korak – natrag“ na početku zavarivanja ili da se brzina zavarivanja održava što manja u početku. Uspješno riješenom početku nastavlja se zavarivanje di se brzina zavarivanja poveća kako bi minimizirala distorziju zavarivanja i pomogla u održavanju zavarenog spoja hladnim.

Uz pomoć dobre tehnike i dobre brzine zavareni spoj bi trebao izgledati ovako:



Sl.14 slika dobro izvedenog zavarenog spoja MIG metodom iznad glave, izvor:

[https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)

Na uređaju koji se koristi za MIG zavarivanja može se podesiti dovod zaštitnog plina tokom zavarivanja. U slučaju postavljanja premale topline tokom zavarivanja metal ne prodire u materijal već se kupi na površini i gubi svoj zaštitni plin te se taloži na površini i ohladi.

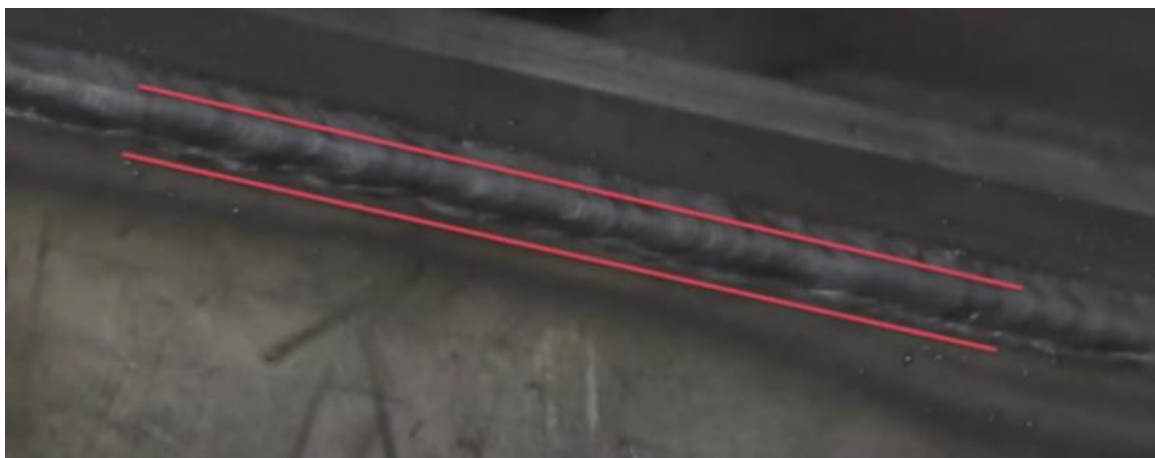


Sl.15 slika lošeg zavarenog spoja MIG metodom iznad glave, izvor:

[https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)



Sl.16 Slika zavrtnog spoja jednim prijelazom nakon što se povećala jačina struje, može se kretati lagano u obrnutom smjeru kazaljke na sat ako se operater miče u desnu stranu, ili se malo zadržava na jednoj točki pa se pomjers u desno za nekoliko milimetara; izvor: [https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)



Sl.17 Slika kuda će se kretati i nalaziti drugi prolaz, izvor: [https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)



Sl.18 Slika drugog uspješno obavljenog nanosa zavarivanja MIG metodom iznad glave, izvor: [https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)



Sl.19 Slika početka trećeg nanosa zavarivanja dok se jos nije ohladio zavareni spoj kako treba, staložilo se na početku i krene se topit, izvor: [https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)



Sl.20 Slika uspješnih pet nanosa na kutnom spoju korištenjem MIG metode zavarivanja iznad glave, izvor: [https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi\\_aU&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=uvjZNTqi_aU&t=2s) (17.9.2024)

## 6. Zaključak

Zaključak ovog završnog rada prikazuje različite aspekte tehnologija zavarivanja i materijala koji se koriste najviše u izradi konstrukcija. Obradene metode zavarivanja uključuju MIG/MAG, TIG, REL, ESW, ERW i njihovu primjenu u industriji, svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, a njihova primjena ovisi o eksploataciji zavarenog spoja, vrsti materijala i zahtjevima projekata. Čelik, aluminij, bakar su sve materijali koji se svakodnevno koriste u izradi konstrukcija, materijali također imaju svoje prednosti i nedostatke poput cijene, vrste eksploatacije, lakoći obrade, mehaničkih svojstava. Svakom materijalu se treba postupiti drugačije, za neke poput čelika s višim udio ugljika moraju se primjenjivati posebne tehnike poput pregrijavanja, kontrole topline i korištenje različitih elektroda tokom zavarivanja, te imati u vidu probleme poput hladnih pukotina i zakaljivanja. Aluminij također iako sadrži visoku otpornost na koroziju zahtjeva pažljiv pristup zbog njegove toplinske vodljivosti i formiranju vrućih pukotina, dok bakar isto tako pati od visoke toplinske vodljivosti također pati od problema sa afinitetom prema kisiku i vodik. Pravilna primjena tehnologija zavarivanja i pomno razumijevanja mehaničkih svojstava materijala su ključni za postizanje kvalitetnih, dugotrajnih i sigurnih zavarenih spojeva koji omogućuju dugovječnost opreme i industrijskih objekata.

## Popis literature

- 1) Valentino, D. (2016, Uvod u projektiranje tehnologije zavarivanja, zavarljivost i ispitivanje zavarenih spojeva. Završni rad Sveučilište Sjever Varaždin)
- 2) Kraut, B. (1988, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb)
- 3) Samaradžić, I. (2012, Termini i definicije kod zavarivanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu)
- 4) Pavletić, D. (2011, Zavarivanje 1, Tehnički fakultet Rijeka)
- 5) Pakrac, J (2008, Zavarivanje praškom punjenim žicama FCAW. Diplomski rad Sveučilište u Zagrebu)
- 6) RAM, Rijeka (2018, Moderni postupci zavarivanja)

## Popis slika

- 1) vrsta zavarenih spojeva, sučeljni, preklopni, kutni spoj.....4
- 2) SAW uređaj sa svim svojim komponentama.....6
- 3) objašnjen izgled elektrolučnog zavarivanja pod zaštitnim praškom.....7
- 4) slika pištolja za zavarivanje MIG postupkom i njegove komponente.....11
- 5) ručica pištolja, (2) plastična izolacija (bijeke boje) i navojni metalni umetak (žute boje), (3) raspršivač zaštitnog plina, (4) vodilica za žicu, (5) izlaz pištolja.....14
- 6) slika ostalih uređaja potrebnih za izvršenje zavarivanja MIG metodom.....15
- 7) svih potrebnih uređaja za uspješno zavarivanje uz pomoć SMAW metode.....17
- 8) pištolj za zavarivanje pomoću SMAW metode i njegovog utjecaja uz korištenje zaštitnog plina.....18
- 9) način zavarivanja ESW metodom
- 10) slika zavarenog spoja dvaju debljih čeličnih ploča putem ESW tehnologije.....21
- 11) načina zavarivanja putem ERW metode i kretanja materijala u finalni produkt cijevi.....21
- 12) slika bližeg izgleda tokom ERW zavarivanja.....30
- 13) slika zavarivanja MIG metodom iznad glave sa manjom dužinom žice.....31
- 14) slika pulsne aparata koji se koristi za prijenos metala pomoću električne struje.....32
- 15) slika dobro izvedenog zavarenog spoja MIG metodom iznad glave.....32

16) slika lošeg zavarenog spoja MIG metodom iznad glave.....	33
17) Slika zavernog spoja jednim prijelazom nakon što se povećala jačina struje, može se kretati lagano u obrnutom smjeru kazaljke na sat ako se operater miče u desnu stranu, ili se malo zadržava na jednoj točki pa se pomjers u desno za nekoliko milimetara.....	33
18) Slika kuda će se kretati i nalaziti drugi prolaz.....	34
19) Slika drugog uspješno obavljenog nanosa zavarivanja MIG metodom iznad glave.....	34
20) Slika početka trećeg nanosa zavarivanja dok se jos nije ohladio zavareni spoj kako treba, staložilo se na početku i krene se topit.....	35
21) Slika uspješnih pet nanosa na kutnom spoju korištenjem MIG metode zavarivanja iznad glave.....	35

### **Popis tablice**

1) Tablica koja označuje temperature predgrijavanja nelegiranih čelika prilikom njihovog zavarivanja.....	23
---	----

### **Popis grafa**

1) graf na kojem se vidi dizanje temperature na temperaturu toplinske obrade niskolegiranih čelika.....	26
---	----