

Automatizirano TIG zavarivanje legura bakra

Roš, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:283738>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**

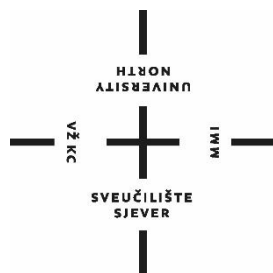


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



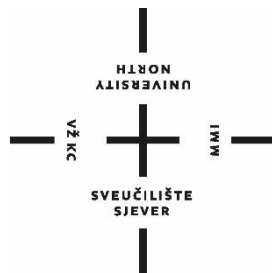
DIPLOMSKI RAD br. 048/STR/2021

Automatizirano TIG zavarivanje legura bakra

Mario Roš

Varaždin, rujan, 2021.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Odjel za strojarstvo



DIPLOMSKI RAD br. 048/STR/2021

Automatizirano TIG zavarivanje legure bakra

Student:
Mario Roš, 0942/336D

Mentor:
doc. dr. sc. Matija Bušić

Varaždin, rujan, 2021.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Mario Roš	MATIČNI BROJ	0942/336D
DATUM	14.9.2021.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Automatizirano TIG zavarivanje legura bakra		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Automated TIG welding of copper alloys		
MENTOR	dr.sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, član povjerenstva		
	4. izv. prof. dr. sc. Sven Maričić, zamjenski član povjerenstva		
	5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	048/STR/2021
OPIS	

U teoretskom dijelu diplomskog rada na temelju literaturnih podataka potrebno je dati pregled svojstava, podjele i primjene legura bakra. Potrebno je proučiti i opisati specifičnosti pri zavarivanju legura bakra različitim tehnologijama zavarivanja. Pomoću normi dati pregled oblikovanja pripreme spojeva i vrste zaštitnih plinova. Posebno detaljno obraditi ručno, robotizirano i automatizirano TIG zavarivanje. Dati pregled automata dostupnih na tržištu za TIG zavarivanje, te opisati njihove specifičnosti i mogućnosti.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima legure bakra provesti automatizirano TIG zavarivanje uz varijaciju parametara zavarivanja. Na izvedenim zavarenim spojevima provesti ispitivanje savijanjem u 3 točke prema važećoj normi i analizirati geometriju zavarenih spojeva na poprečnom presjeku zavarenog spoja. Prema rezultatima ispitivanja donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

14.09.2021.



POTPIS MENTORA

M. Bušić

Zahvala

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

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Matiji Bušiću na prihvaćanju mentorstva, korisnim savjetima i izdvojenom vremenu koji su mi omogućili da uspješno završim ovaj diplomski rad.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Gordani i Ivici koji su mi svih ovih godina mojeg školovanja bili moralna i financijska podrška. Hvala ostatku obitelji i prijateljima na svakom razgovoru i podršci.

Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada bio je ispitati utjecaj parametara na izgled i kvalitetu dobivenog zavara. Proces zavarivanja odvijao se uz pomoć automata za zavarivanje. Promjenjivi parametri kod eksperimenta bili su jakost struje i brzina zavarivanja. Rad se sastoji od teoretskog i eksperimentalnog dijela.

U teoretskom dijelu rada opisana su osnovna svojstva bakra i njegovih legura. Zatim se u radu opisuje princip TIG zavarivanja. Opisana je osnovna oprema, prednosti, nedostaci te princip rada kod postupka. Nakon toga slijedi oblikovanje spojeva, dodatni materijali i utjecaj različitih parametara na oblik zavarenog spoja. U posljednjem poglavlju teoretskog dijela opisani su neki od dostupnih automata na tržištu.

U eksperimentalnom dijelu rada opisuje se proces zavarivanja ETP bakra pod utjecajem različitih parametara. Dobiveni uzorci su zatim izrezani na tri epruvete za daljnja ispitivanja. Drugi dio eksperimenta bio je test savijanja prema normi EN ISO 5173. Posljednji dio u eksperimentu bio je dobivanje makro presjeka uzoraka.

Ključne riječi: bakar i njegove legure, TIG zavarivanje, automati za zavarivanje

Summary

The aim of this master thesis was to examine the influence of welding parameters on the appearance and quality of the obtained weld. Welding process was performed with an automated welding system. The variable parameters in the experiment were welding speed and welding current. The thesis consists of a theoretical and an experimental part.

The theoretical part of the thesis describes the basic properties of copper and its alloys. Then the thesis describes the principle of GTAW. The basic equipment, advantages, disadvantages and the principle of the welding procedure. This is followed by the formation of the joints, additional materials and the influence of various parameters on the shape of the welded joint. The last chapter of the theoretical part describes some of the available automated welding systems on the market.

The experimental part of the thesis describes the welding process of ETP copper under the influence of different parameters. The obtained samples were then cut into three tubes for further testing. The second part of the experiment was the bend test according to EN ISO 5173. The last part of the experiment was obtaining macro cross-sections of the samples.

Keywords: copper and copper alloys, GTA welding, automated welding systems

Popis korištenih kratica

Kratica

Opis

AC	Alternating Current
ASME	American Society of Mechanical Engineers
DC	Direct Current
DM	Dodatni materijal
EN	European Standard
ETP	Electrolytic Tough Pitch Copper
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HF	High Frequency
HRN	Hrvatske norme
IACS	International Association of Classification Societies
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	Tungsten Inert Gas
ZUT	Zona utjecaja topline

Popis korištenih oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	%	Istezljivost
<i>HB</i>	-	Tvrdoća prema Brinellu
<i>R_{p0,2}</i>	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>R_m</i>	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>v_z</i>	cm/min	brzina zavarivanja
<i>l</i>	mm	razmak između valjaka
<i>R</i>	mm	polumjer valjka
<i>L_s</i>	mm	maksimalna širina zavara kod savijanja
<i>t_s</i>	mm	debljina uzorka kod savijanja
<i>Ød</i>	mm	promjer trna kod savijanja

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Bakar i legure bakra	2
2.1. Nelegirani bakar	2
2.2. Legure bakra	4
2.2.1. Legure bakra s cinkom	5
2.2.2. Bronze.....	7
2.3. Primjena bakra	8
3. TIG zavarivanje.....	9
3.1. Prednosti i nedostaci	10
3.2. Oprema za TIG zavarivanje.....	11
3.3. Princip rada.....	14
4. Dodatni materijali za TIG zavarivanje legura bakra i oblikovanje spojeva.....	14
5. Utjecaj parametara na oblik zavarenog spoja.....	19
5.1. Jakost struje	19
5.2. Napon električnog luka kod zavarivanja	20
5.3. Brzina zavarivanja	21
5.4. Brzina dodavanja dodatnog materijala	22
5.5. Volframove elektrode	22
5.6. Orijentacija elektrode	24
5.7. Smjesa zaštitnih plinova	25
5.8. Brzina hlađenja	25
6. Automatizirano zavarivanje	26
6.1. Prednosti i nedostaci automatizacije.....	26
6.2. Automati za pravocrtno zavarivanje.....	27
6.3. Automati za orbitalno zavarivanje.....	32
6.3.1. Oprema kod orbitalnog zavarivanja	33

6.3.2. Programiranje i parametri zavarivanja	36
6.4. Kombinirani sustavi za zavarivanje.....	36
6.5. Robotizirano zavarivanje	37
6.5.1. Prednosti i nedostaci.....	38
7. Eksperimentalni dio.....	39
7.1. Osnovni materijal	39
7.2. Oprema za zavarivanje	40
7.2.1. Izvor struje za zavarivanje.....	41
7.2.2. Plinovi za zavarivanje.....	42
7.2.3. Gorionik i netaljiva elektroda	43
7.2.4. Automat za zavarivanje	45
7.3. Priprema i proces zavarivanja.....	47
8. Rezultati zavarivanja	48
8.1. Ispitivanje savijanjem	51
8.2. Makro presjek	56
9. Zaključak.....	61
Literatura	63
Popis slika	66
Popis tablica	69

1. Uvod

Bakar i njegove legure koriste se u svakodnevnim proizvodima koji nas okružuju i tako unaprjeđuju životne standarde. Imaju odličnu električnu i toplinsku vodljivost, dobru oblikovljivost i dobru otpornost na koroziju. Mogu se spajati procesima lemljenja i zavarivanja. Čisti bakar se najviše koristi kod prijenosa električne energije. Legure bakra se koriste kod izmjenjivača topline, sustava grijanja, solarnih kolektora i sličnih aplikacija koje zahtijevaju brzi prijenos topline.

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina Ar, He ili njihovoj smjesi. Ovaj postupak ima primjenu na širokom spektru materijala: čelici, plemeniti čelici, teški i laki obojeni metali. U usporedbi sa MIG/MAG postupkom zavarivanja je puno sporiji proces, no međutim omogućava zavarivanje puno kompleksnijih spojeva i nudi bolju kvalitetu.

Napredovanjem tehnologija u suvremenom svijetu razvio se i postupak automatizacije TIG zavarivanja kako bi se uklonio nedostatak velikog vremena izrade, pritom zadržavajući samu kvalitetu izrade.

2. Bakar i legure bakra

Bakar je jedan od prvih materijala koje je čovjek počeo koristiti i do danas postao je treća najkorištenija grupa materijala odmah nakon željeza i aluminija. Bakar i legure bakra imaju jako široku upotrebu zbog odlične električne i toplinske vodljivosti, izvanredne otpornosti na koroziju, jednostavnosti izrade i otpornost na umor. Lako su lemljivi te se mogu zavariti različitim metodama. U tablici su prikazana neka osnovna svojstva bakra.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bakra [1]

Gustoća	kg/m^3	8930
Talište	°C	1083
Modul elastičnosti	MPa	125000
Toplinska rastezljivost	$10^{-6}/K$	17
Električna vodljivost	$m/\Omega mm^2$	35...38
Toplinska vodljivost	W/mK	240...386
Vlačna čvrstoća*	MPa	200...360
Istezljivost	%	2...45

*ovisno o stanju

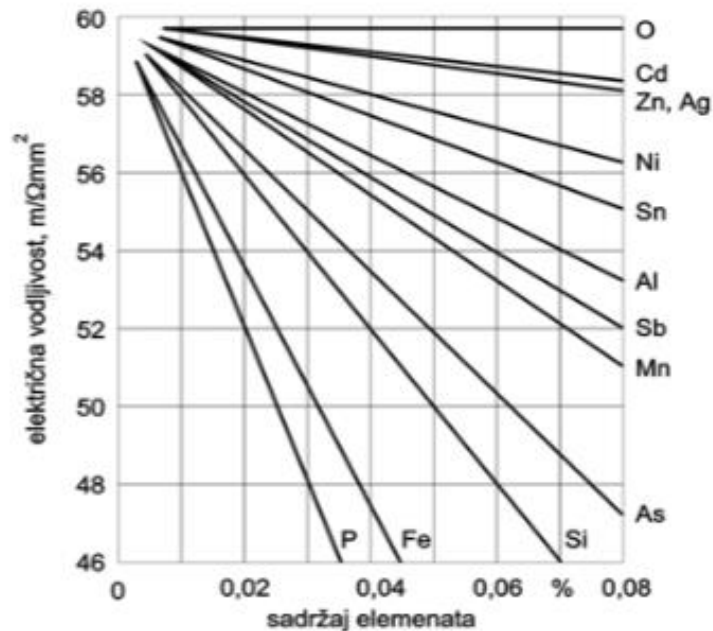
Danas se bakar pretežito koristi u elektrotehnici, dok se u strojogradnji ili brodogradnji koriste njegove legure. Neki od nedostataka bakra su: visoka cijena, visoko talište, ne smije se koristiti u dodiru s hranom ili kod prerade namirnica jer se prekrije otrovnom zelenom prevlakom (bakrov acetat).

2.1. Nelegirani bakar

Bakar je element atomskog broja 29 i relativne atomske mase 63.54 te ima plošno centriranu kubičnu rešetku. On je prijelazni metal, a budući da spada u grupu plemenitih metala ima dosta sličnih svojstava srebru i zlatu. Ima odličnu električnu i toplinsku vodljivost, duktilan je i otporan na koroziju. Ima visoku topivost prema drugim metalima kao što su nikal, cink, kositar i aluminij.

Vodljivost je jedna od glavnih karakteristika koja odvaja bakar od ostalih metala. Čisti bakar ima najbolju električnu vodljivost odmah nakon srebra, koja uvelike ovisi o čistoći. Električna

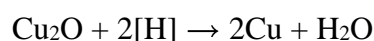
vodljivost materijala mjeri se sa odnosom standardne šipke čistog bakra kojoj je 1913. godine dodijeljena vrijednost od 100% IACS. Od tada, poboljšane su tehnike obrade i dobivanja čistog bakra sa električnom vodljivošću nešto više od 100%.



Slika 1. Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [1]

Bakar koji se koristi kod prijenosa električne energije i povezivanja ima električnu vodljivost od najmanje 85% IACS. Komercijalno čisti bakar ima vrijednost od 101% IACS kao i neki od ostalih vrsta bakra oslobođenih kisika. Legiranjem bakra sa ostalim materijalima u svrhu da se dobije povećana čvrstoća smanjuje se električna provodljivost.

Osim dobre električne vodljivosti, bakar karakterizira i dobra toplinska vodljivost koja se temelji na pokretljivosti slobodnih elektrona metalnih stanja. To svojstvo je važno kod izmjenjivača topline. Čvrstoća kod nelegiranog bakra uvelike je ovisna o otopljenim primjesama. Najčišći bakar ima nisku čvrstoću. Zato veće povišenje temperature naglo smanjuje čvrstoću. Upravo radi ovog razloga je, za velike električne strojeve, bilo potrebno razviti posebne vrste s poboljšanom statičkom izdržljivošću. No, također dobra toplinska vodljivost predstavlja otežano zavarivanje bakra. Kod bakra koji sadrži kisik, u kombinaciji s vodikom iz zaštitnog plina može doći do kemijske reakcije gdje nastaje vodena para, odnosno dolazi do pojave „vodikove bolesti“. [1]



Kod ove pojave mogu nastati vidljive pore te može doći do snižavanja čvrstoće i žilavosti. Ovaj problem se više ne može otkloniti te se dijelovi u kojima je bolest prisutna bacaju.

Bakar ima veliku otpornost na koroziju. Netopiv je u hladnoj i toploj vodi, slabo topiv u klorovodičnoj kiselini i amonijevom hidroksidu, a topiv u dušičnoj kiselini i vrućoj sumpornoj kiselini.

ETP bakar najčešće je korištena vrsta bakra u svijetu. Koristi se u raznovrsnoj električnoj i elektroničkoj opremi, sadrži do 0.0355% nečistoća. ETP1 je najčišći oblik bakra s maksimalnim udjelom nečistoća do 0.0065%. Zbog ove visoke čistoće ETP1 se koristi kod najzahtjevnijih zadataka kao što su prijenosi snage i signala. U primjeni se pojavljuje kod namotaja motora i transformatora. ETP sadrži do 0.0355% nečistoća. [34]

Tablica 2. Svojstva ETP bakra [35]

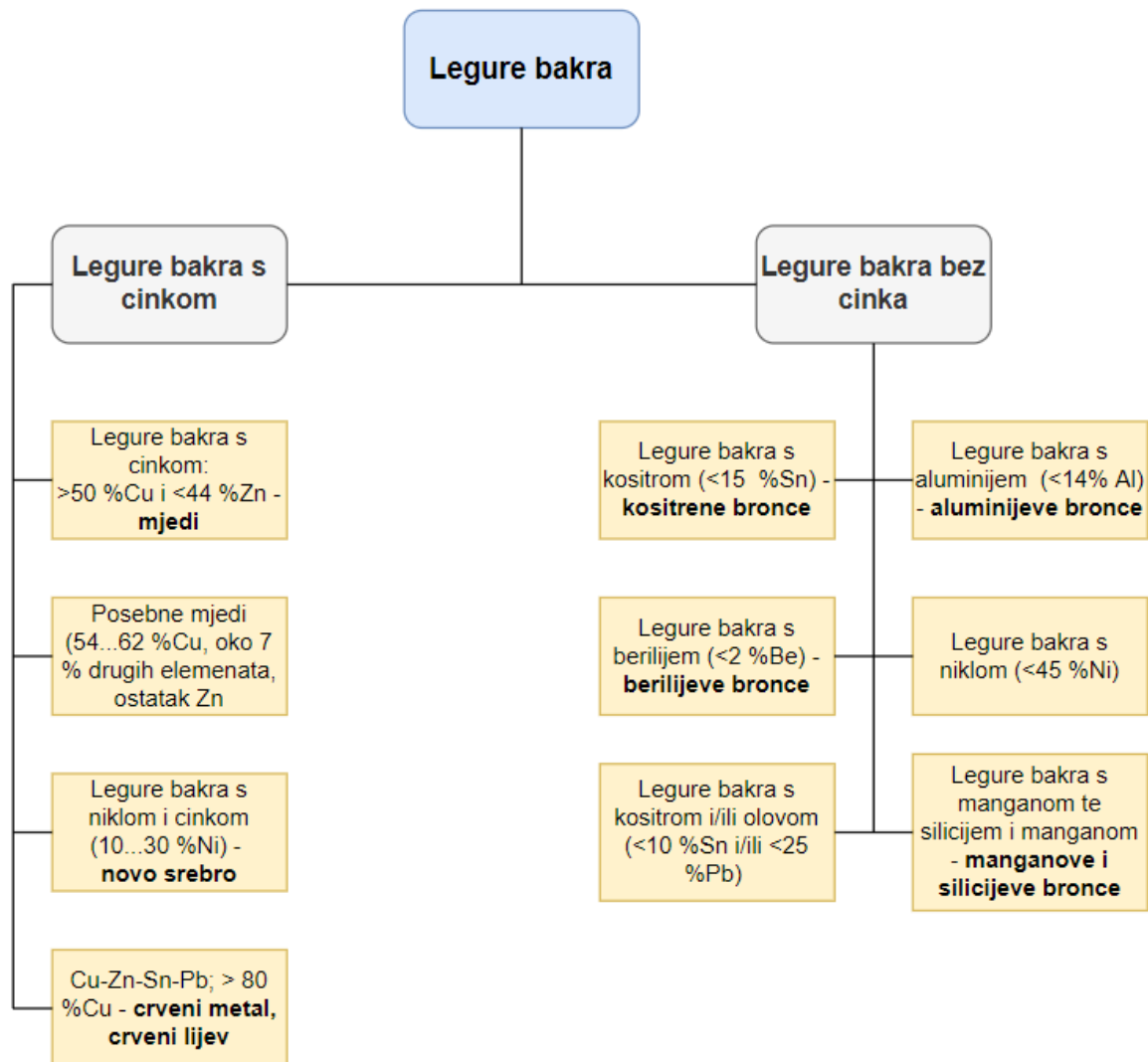
Naziv	ETP
Gustoća	8890 kg/m³
Vlačna čvrstoća	250 MPa
Granica elastičnosti	60 – 300 MPa
Youngov modul elastičnosti	120 GPa
HB	70
Talište	1085°C
Toplinska vodljivost	394 W/mK
Toplinski kapacitet	380 J/g K

2.2. Legure bakra

Legure se mogu podijeliti s obzirom na temelju vrste i udjela glavnih legirnih elemenata. Glavne vrste legura bakra označene su tradicionalnim imenima: mjedi i bronce.

Mjedi su legure bakra s cinkom gdje se također mogu pojaviti i drugi elementi. Oni se mogu podijeliti na dvije podskupine: α -mjedi koji se oblikuju deformiranjem u hladnom stanju te ($\alpha+\beta$)-mjedi koji su oblikovljivi deformiranjem u toplom stanju. Bronce su u pravilu legure

bakra s kositrom. Ostale vrste pored bakra mogu sadržavati cink, olovo, aluminij, željezo, mangan, itd. Imenuju se po elementu koji je prisutan u najvećoj količini.



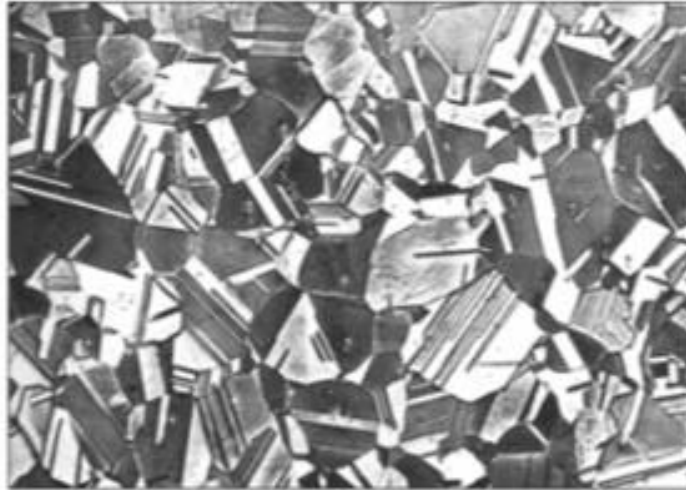
Slika 2. Podjela leguri bakra

2.2.1. Legure bakra s cinkom

Mjed ili mesing je glavna, najraširenija legura bakra s cinkom. Ima široku primjenu zbog svojih svojstava: dobra električna i toplinska vodljivost, dobra mehanička svojstva, mogućnost prerade u toplom i hladnom stanju. Osim cinka, kod ovih legura se pojavljuju nečistoće te često i neki dodatni elementi koji poboljšavaju određena svojstva legure, ovisno o njezinoj primjeni.

[4]

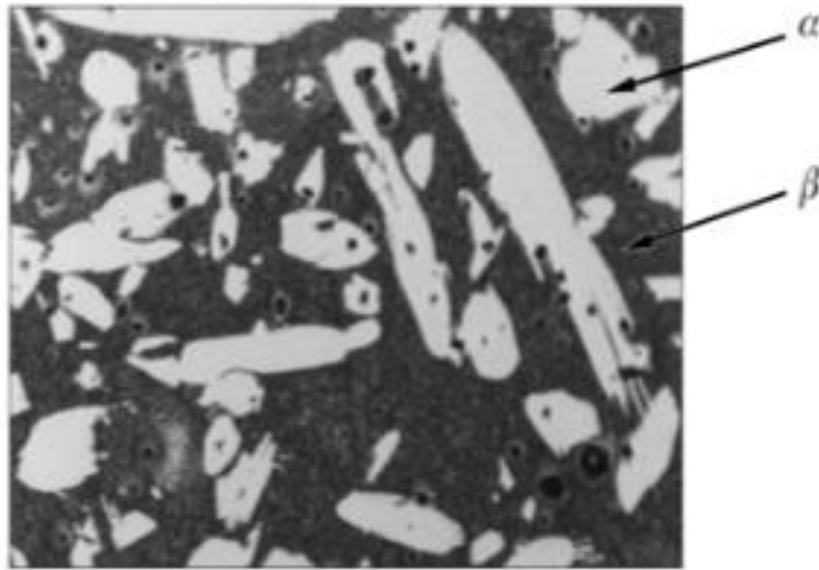
Mjedi se nadalje dijele na α – mjedi i $(\alpha + \beta)$ mjedi. Hladno gnječene α -mjedi su prema mikrostrukturi jednofazne homogene legure. Koriste se radi dobre duktilnosti kod maksimalnog udjela cinka od 30%. [1]



Slika 3. Mikrostruktura α mjedi: CuZn30, hladnognječeno stanje [5]

Hladno oblikovane α – mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju. Kroz proces hladnog oblikovanja na granicama zrna skupljaju se dislokacije te se na tim mjestima poprima stanje više energije. Kod pojave amonijaka ili vlage može doći slabljenja veza po granicama zrna i stvaranja pukotina (eng. *season cracking*). Ovaj problem se može spriječiti žarenjem za smanjenje zaostalih naprezanja. [1]

($\alpha + \beta$) mjedi su legure sa više od 37% Zn i do 60% Cu. U pravilu oblikuju se u toplom stanju u početnim fazama prerade, dok se kasnije hladno oblikovanje primjenjuje samo za dobivanje završnih dimenzija i korektnog stupnja očvrnuća za daljnju uporabu. [1]



Slika 4. Mikrostruktura ($\alpha+\beta$) - mjedi (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [5]

Posebne mjedi se koriste radi poboljšavanja korozijske postojanosti ili nekih drugih svojstava. U pravilu, dodatni element čini 7% udjela, bakar 54 – 62% te ostatak cink. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata je sljedeći:

- Aluminij – povećava čvrstoću, na površini stvara oksidni sloj koji štiti mjed od oksidacije, istezljivost ostaje ista
- Nikal – povećava čvrstoću, otpornost na koroziju i djeluje na usitnjavanje zrna
- Željezo – usitnjavanjem zrna povećava čvrstoću
- Mangan – povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi, vodenoj pari i kiselinama
- Silicij – smanjuje zaostala naprezanja, povećava žitkost kod zavarivanja stvaranjem topljive troske
- Kositar – povećava otpornost na koroziju u morskoj soli [1]

2.2.2. Bronce

Bronce su uglavnom legure bakra na bazi svih legirnih elemenata osim cinka. Ime dobivaju prema elementu s najvećim postotnim udjelom. Najčešće su to kositrene bronce, a mogu se još pojaviti aluminijeve, manganske, berilijeve bronce.

Hladno deformirane **kositrene bronce** obično sadrže mali udio fosfora koji služi kao deoksidant. Ove legure imaju vrlo dobru otpornost na koroziju, osobito u morskoj vodi. Većim udjelom kositra, otpornost na koroziju se povećava. Uglavnom se koriste za korozijski postojeane opruge, dok se lijevane kositrene bronce koriste za izradu kliznih ležaja, [6]

Aluminijeve bronce su legure koje sadrže do 14% aluminija. Manji udio mogu činiti nikal, željezo, mangan i silicij, ovisno o svojstvu koje se želi poboljšati. Neka od svojstava aluminijskih bronci su:

- Visoka čvrstoća
- Odlična otpornost na koroziju
- Odlična otpornost na kavitacijsko trošenje kod propelera
- Duktilnost i dobro oblikovanje hladnim deformiranjem
- Zavarljivost
- Pogodno za rad na visokim temperaturama (do 400 °C) isto kao i za rad na niskim temperaturama
- Dobra otpornost na trošenje [7]

2.3. Primjena bakra

Najveća udio bakra odlazi u građevinsku upotrebu, gdje se koristi za električne i vodoinstalaicijske sustave, sustave grijanja i klimatizacije. Drugi najveći potrošač bakra su elektroničke komponente i dijelovi. To su najčešće telekomunikacijski sustavi, elektromotori, elektroprivreda. U tablici su prikazana podjela upotrebe bakra u Sjedinjenim Američkim Državama.



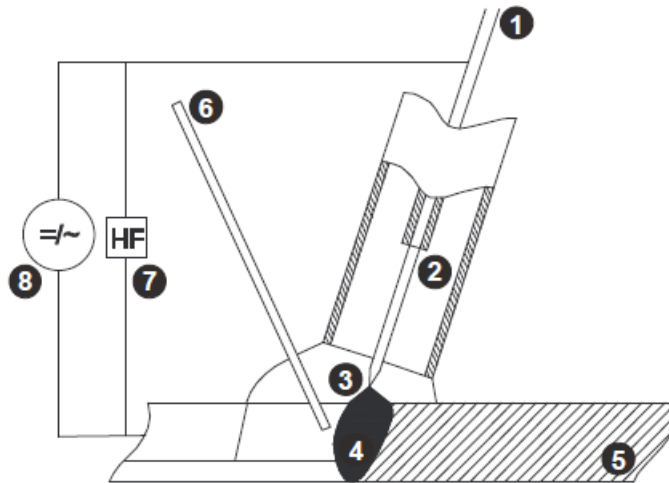
Slika 5. Korištenje bakra kod namotaja transformatora

Tablica 3. Podjela potrošnje bakra u SAD-u [2]

Primjena	Potrošnja	
	kg x 10 ⁶	%
Električne i građevinske žice	551.11	16
Vodoinstalacije i grijanje	520.27	15.1
Klimatizacija i hladnjaci	304.36	8.8
Elektroprivreda	293.47	8.5
Telekomunikacije	246.75	7.2
Automobilska industrija (električni dijelovi)	231.79	6.7
Oprema u industriji	226.80	6.6
Elektronika	185.52	5.4
Automobilska industrija	125.19	3.6
Industrijski ventili i armatura	108.41	3.2
Rasvjeta i žice za povezivanje	104.78	3.1
Ostalo	544.76	15.8
Ukupno	3443.21	100

3. TIG zavarivanje

Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG postupak) gdje električni luk nastaje između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala koji se tali. Zona utjecaja topline, osnovni materijal te volframova elektroda pod zaštitnom su atmosferom inertnog plina (argon, helij ili mješavina). Ti plinove ne izgaraju, niti dodaju ili oduzimaju svojstva ili nečistoće zavaru. Postupak TIG zavarivanja može se odvijati sa ili bez dodatnog materijala. Dodatni materijal može biti žica od aluminija i njegovih legura, bakra i njegovih legura, nehrđajućeg čelika itd. [9]



Slika 6. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja
 1 – nepaljiva elektroda; 2 – sapnica gorionika; 3 – električni luk; 4 – rastaljeni materijal; 5 – osnovni materijal; 6 – dodatni materijal; 7 – visokofrekventni generator, 8 – izvor struje

3.1. Prednosti i nedostaci

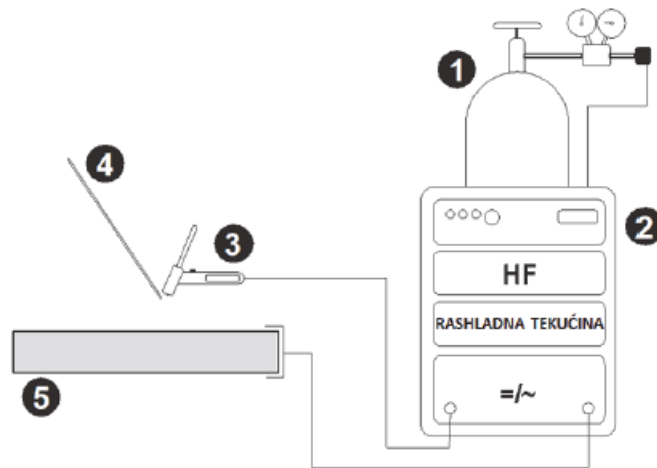
Najveća prednost TIG postupka zavarivanja je što se njime mogu zavarivati svi metali: nehrđajući čelik, titan, aluminij, magnezij, bakar čak i zlato. Koncentrirano električni luk smanjuje ZUT. To je velika prednost kod zavarivanja metala s velikom provodljivošću topline zbog toga što je zavareni spoj najslabiji u samoj zoni utjecaja topline gdje se očekuje prijelom kod ispitivanja. [9]

Sam proces ne stvara štetne plinove no oni se mogu pojaviti kod slučajeva metala koji imaju prevlaku na površini. Osnovni materijal treba se što bolje očistiti od mrlja, ulja i boje kako bi dobili što idealnije uvjete. Kod TIG postupka zavarivanja nema prijenosa materijala, odnosno ne dolazi do prskanja i stvaranja troske. [9]

Pogodno je za izvođenje zavarivanja u svim položajima te za izvođenje reparaturnih radova. Pravilno izveden zavareni spoj ima vrlo lijep estetski izgled, gladak je i čist. [10]

Glavni nedostatak ovog postupka je spora brzina zavarivanja, odnosno mali depozit dodatnog materijala. Sama oprema te zaštitni plinovi su skuplji u odnosu na MIG postupak zavarivanja. Mora se provesti dobra izobrazba zavarivača jer se traže veliki zahtjevi u kvaliteti zavara. [9]

3.2. Oprema za TIG zavarivanje



*Slika 7. Shematski prikaz standardne opreme za TIG postupak zavarivanja [10]
1 – zaštitni plin; 2 – izvor struje za zavarivanje; 3 – gorionik; 4 – dodatni materijal; 5 – osnovni materijal*

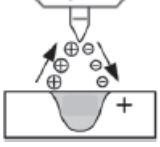
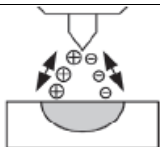
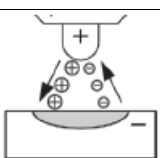
Osnovni dijelovi klasičnog uređaja za TIG postupak zavarivanja su:

1. Izvor struje za zavarivanje

Izvori struje mogu biti transformatori, ispravljači i pretvarači. Transformator se koristi kod zavarivanja lakih metala te se njemu obavezno pridodaje visokofrekventni generator. On može biti smješten u izvoru struje ili izvan izvora u komandnom ormariću. Proizvodi električnu struju vrlo visokog napona od nekoliko tisuća volti. Funkcija te dobivene struje je stvaranje električnog luka bez dodira vrha elektrode sa radnim komadom i podržavanje stabilnosti električnog luka kod zavarivanja s izmjeničnom strujom.

Za impulsno TIG zavarivanje izvori su građeni tako da se mogu programski podesiti za mijenjanje jakosti struje u određenim vremenskim periodima tijekom zavarivanja. [11]

Tablica 4. Vrste struje i materijali za TIG zavarivanje [8]

Vrsta struje	Zavarivani materijali	Napomena	Oblik vrha elektrode i penetracije
Istosmjerna struja Elektroda “-“ pol	Svi materijali osim Al i Mg i njihovih legura	Moguće je najveće opterećenje elektrode	
Izmjenična ili impulsna struja	Al, Mg ili njihove legure	Moguće je uklanjanje oksida s površine osnovnog materijala	
Istosmjerna struja Elektroda “+“	Posebni slučajevi	Vrlo malo dopušteno opterećenje elektrode	

2. Nužna kontrola jakosti struje
3. Kliješta suprotnog pola
4. Gorionik

Osnovna podjela gorionika se zasniva na vrsti hlađenja samog gorionika. Tako postoje 3 vrste gorionika:

- a) Zrakom hlađeni gorionici za ručno zavarivanje – koriste se kod niske jakosti struje i potreban im je samo okolni zrak za hlađenje (do 200 A)
- b) Vodom hlađeni gorionici za ručno zavarivanje – koristi se kod veće jakosti struje (200 – 600 A)
- c) Vodom hlađeni gorionici za automatizirano zavarivanje



Slika 8. Primjer gorionika Miller A-200 [12]

5. Sustav za hlađenje (crijevo za hlađenje, sustav za kontrolu hlađenja)
6. Zaštitni plin

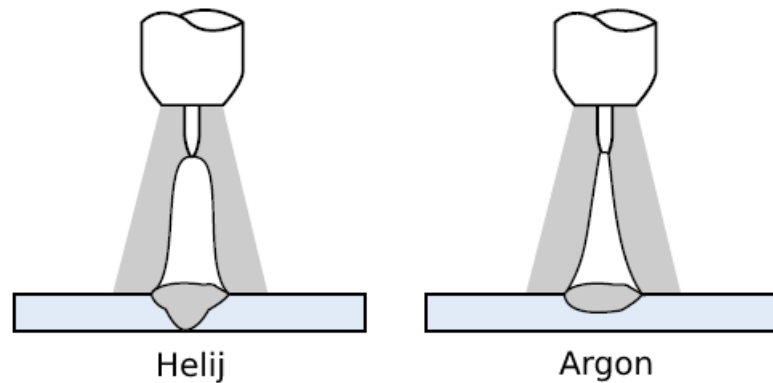
Kod TIG zavarivanja koriste se dva plina i njihove mješavine. To su argon i helij, Glavni uvjet kod zaštitnih plinova je vrlo visoka čistoća, odnosno razina od 99.995%.

Osnovna uloga je zaštititi osnovni metal od atmosfere, kako ne bi došlo do nepoželjnih pogrešaka u zavaru. Danas se više koristi argon zbog svoje cijene. Ima veću gustoću od zraka pa samo prekrije površinu zone taljenja, dok helij ima deset puta manju gustoću od argona pa zbog toga mora imati dva do tri puta veći protok. [9]

Kod izbora zaštitnog plina, posebno se mora obratiti pozornost na ionizacijski potencijal plina. Ionizacijski potencijal se mjeri u voltima i to je točka kod koje će se uspostaviti električni luk između elektrode i radnog komada. Za argon taj potencijal iznosi 15.7 V, dok je za helij 24.5 V. Argon ima nisku toplinsku vodljivost, te nije dobar vodič topline. Rezultat toga je koncentriraniji i stabilniji električni luk. [9]

Za razliku od argona, helij ima visoku toplinsku vodljivost. Tako je područje električnog luka puno šire. Prednost kod helija je puno veća dubina penetracije.

Zbog ovog razloga je kod debljih materijala poželjniji helij ili mješavina argona i helija.



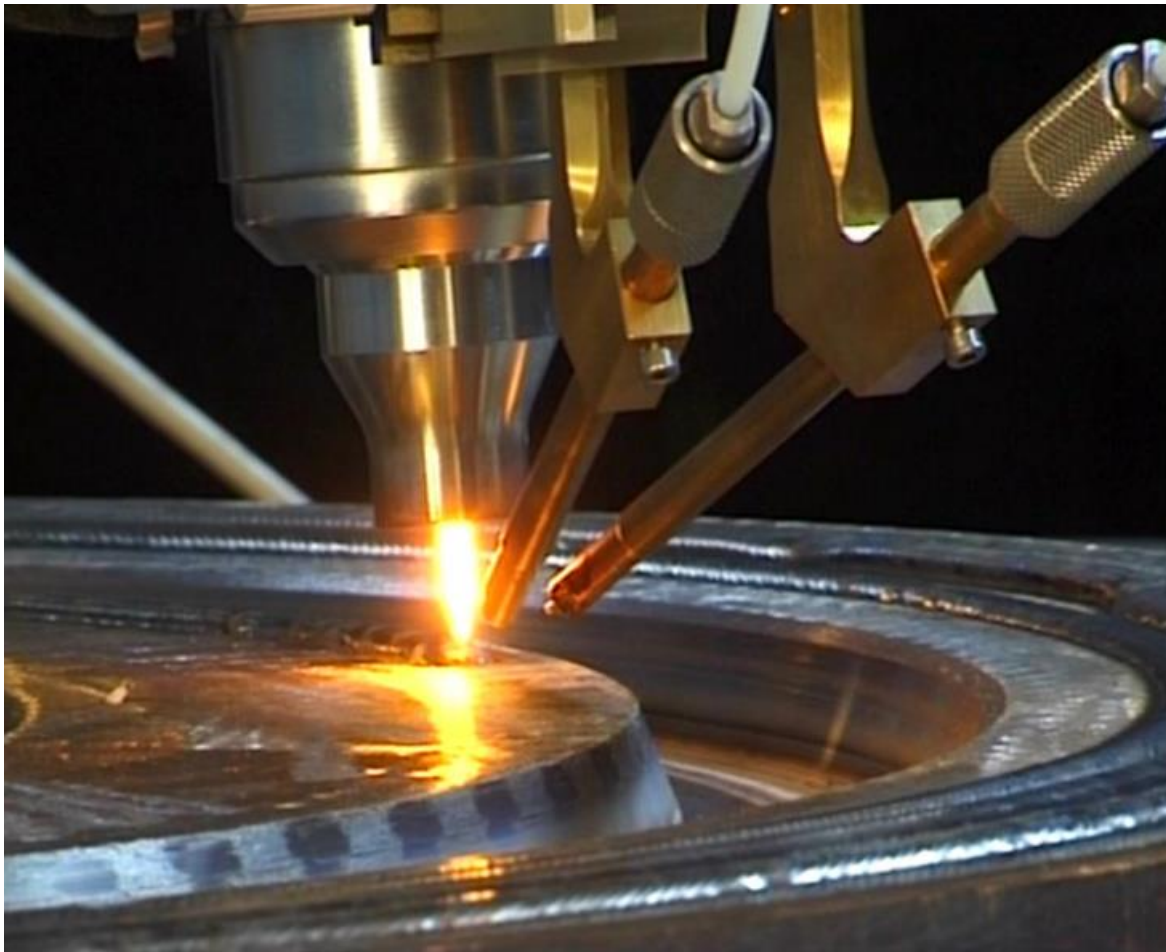
Slika 9. Prikaz električnog luka i penetracije kod helija i argona [9]

3.3. Princip rada

Postupak ručnog TIG zavarivanja primjenjuje se u slučajevima kada nije moguće koristiti automatizirani proces zavarivanja ili kada jednostavno on nije ekonomski isplativ. TIG postupak zavarivanja je proces koji koristi izvor struje, zaštitni plin i gorionik s netaljivom elektrodom. Energija se dobiva preko izmjenične ili istosmjerne struje, koja prolazi kroz gorionik sve do netaljive elektrode. Elektroda služi samo za uspostavu električnog luka. Električni luk zaštićen je od atmosfere inertnim plinom. Ovisno o vrsti i dimenzijama radnog komada zavarivanje je moguće izvesti s ili bez unošenja dodatnog materijala.

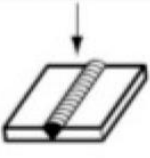
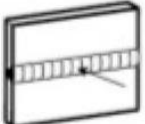
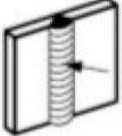
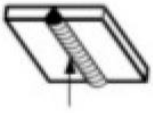
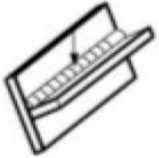
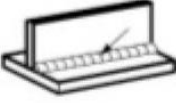
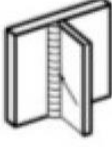

4. Dodatni materijali za TIG zavarivanje legura bakra i oblikovanje spojeva

TIG zavarivanje moguće je izvesti s ili bez dodatnog materijala. Dodatni materijal može se dodati ručno ili automatizirano. Pri automatiziranom procesu, DM se mehanizirano dovodi do osnovnog materijala u “hladnom“ (“cold wire“) ili predgrijanom stanju (“hot wire“). Prednost ovog načina dovođenja dodatnog materijala je znatno povećanje produktivnosti. [10]



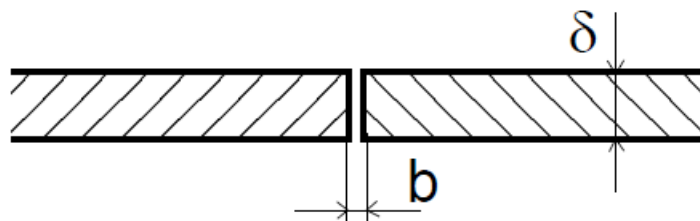
Slika 10. TIG Hot Wire

Dodatni materijali koji se koriste kod zavarivanja bakra nisu od čistog bakra nego sadrže manju količinu Ag, Sn, Ni, Mn, Si, itd. Za zavarivanje čistog bakra koristi se EL-CuMn2 elektroda, a za zavarivanje Sn-bronce koriste se EL-CuSn7, EL-CuSn13 elektrode. Za zavarivanje Al-bronce koriste se EL-CuAl9, EL-CuM14Al, EL-CuAl9Ni2Fe elektrode. Specijalna bazična elektroda za zavarivanje bakra s čelikom i zavarivanje bakrenih legura je EZ-Bakar 1 elektroda, dok se za zavarivanje Cu-legura kao i za zavarivanje bakra s čelikom, sivim lijevom i broncama koristi i EZ-Bakar 2 elektroda. Za zavarivanje mjedi upotrebljavaju se dodatni materijali legirani sa Zn, Si, Sn ili Zn, Si, Mn, Ni, Sn, Ag. [8]

Naziv spoja	Vodoravni položaj	Zidni položaj	Vertikalni položaj	Nadglavni položaj
Sučeoni	 1G / PA	 2G / PC	 3G / PF PG	 4G / PE
Kutni	 1F / PA	 2F / PB	 3F / PF PG	 4F / PE

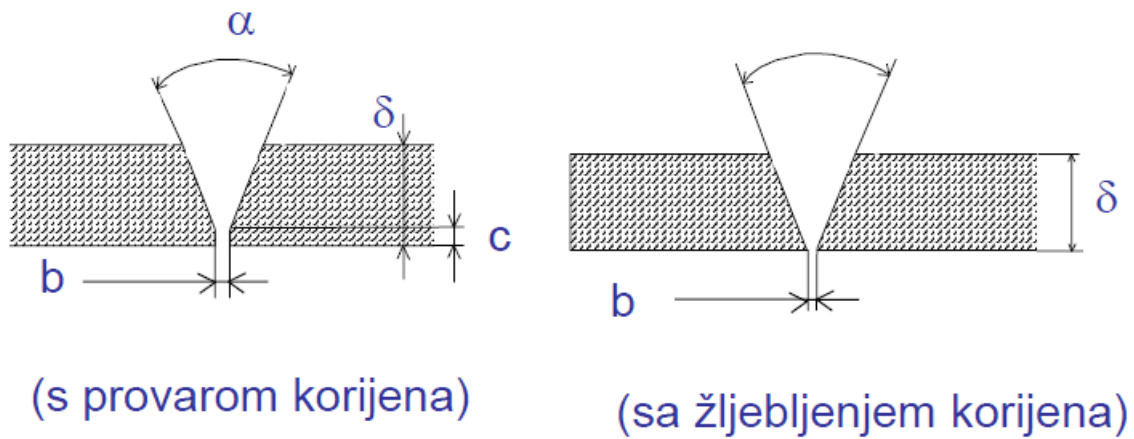
Slika 11. Položaji zavarivanja prema ASME, sekcija IX i HRN EN 287 [37]

Radi osiguranja kvalitete zavarenog spoja po čitavom presjeku, rubovi dijelova koji će se zavarivati obično se pripremaju tako da formiraju neki oblik žlijeba. Sučeoni I-spoj koristi se za tanke stijenke 2-5 mm.



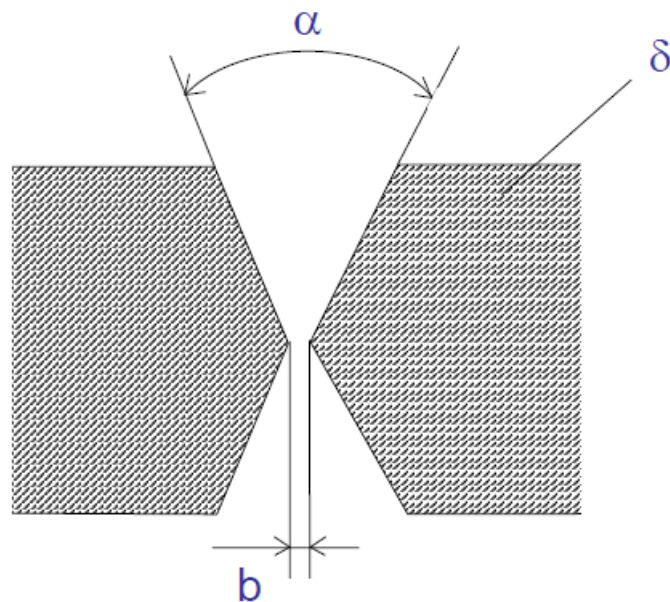
Slika 12. Sučeoni I-spoj [37]

Sučeoni V-spoj koristi se za debljine stijenke 4-18 mm. Za debljine veće od 20 mm nije ekonomična primjena. V-spoj se zavaruje samo s jedne strane s provarivanjem korijena. Kod pripreme bez provara vrši se žlijebljenje korijena zavora.



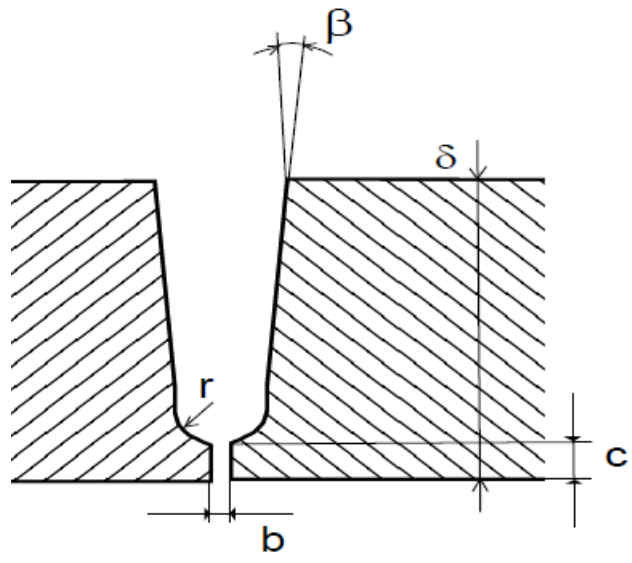
Slika 13. Sučeoni V-spoj [37]

Sučeoni X-spoj koristi se za debljine stjenke 15-40 mm, a za bakar već od 8 mm. Zavaruje se s obje strane.

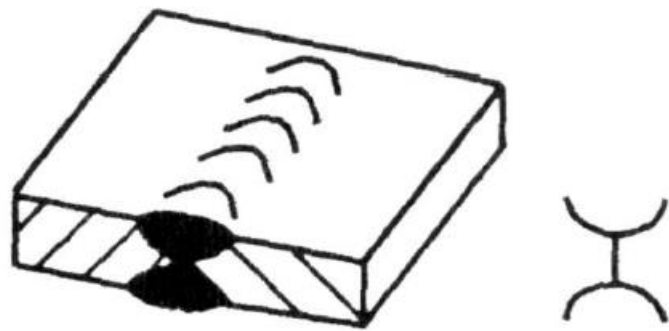


Slika 14. Sučeoni X-spoj [37]

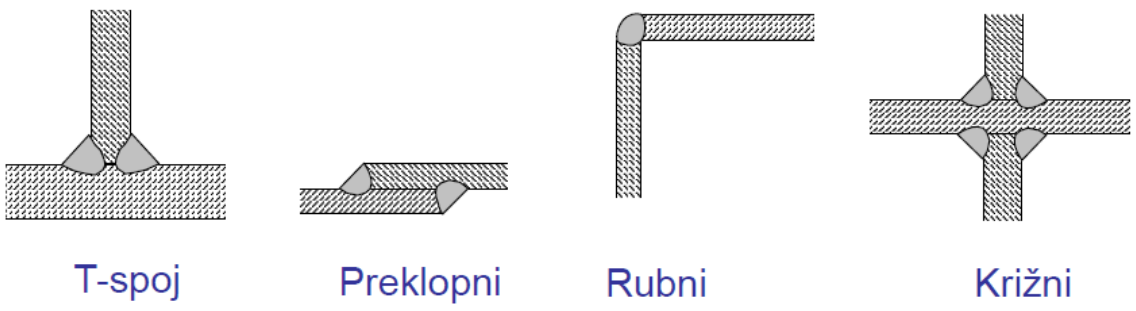
Sučeoni U-spoj koristi se za debele materijale, deblje od 30 mm. U nekim slučajevima i kod tanjih materijala uz TIG zavarivanje Sučeoni dvostruki U-spoj koristi se za materijale neograničenih debljina, gdje je pristup moguć s obje strane.



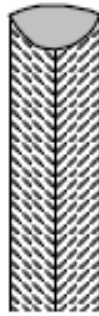
Slika 15. Sučioni U-spoj [37]



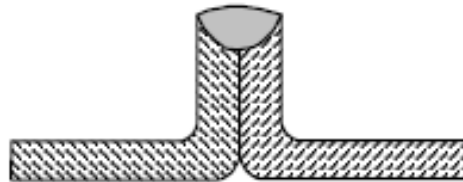
Slika 16. Sučioni dvostruki U-spoj [37]



Slika 17. Primjeri kutnih spojeva [37]



Slika 18. Naliježući spoj [37]



Slika 19. Prirubni spoj [37]

5. Utjecaj parametara na oblik zavarenog spoja

Svojstva uvelike ovise o različitim parametrima zavarivanja. Neki od njih su vrsta struje, napon, brzina zavarivanja, brzina dodavanja elektrode, promjer, orijentacija, polaritet elektrode, mješavina plinova. Kako bi se dobio što kvalitetniji zavar, potrebno je dobro poznavanje svih parametara. U ovom poglavlju ti parametri su obrađeni zasebno.

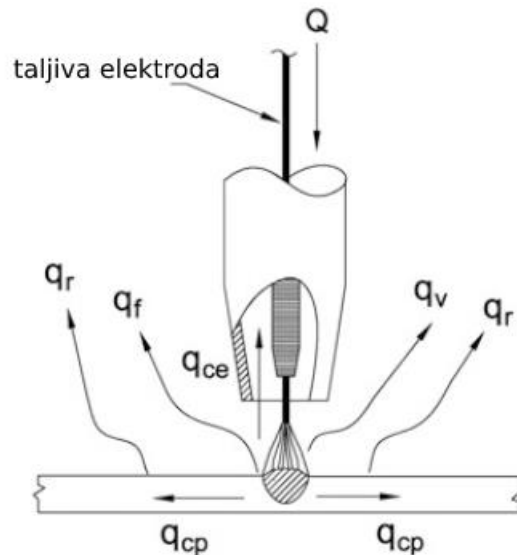
5.1. Jakost struje

Jakost struje jedna je od najutjecajnijih varijabli u procesu zavarivanja. Ukoliko je jačina struje velika, dubina penetracije će biti isto tako previše duboka. Suprotno tome ako je jačina struje mala, rezultat može biti nedovoljno duboka penetracija. Sva energija (Q) koja se dobiva od izvora struje dijeli se na nekoliko dijelova: jedan dio odlazi na taljenje osnovnog materijala, drugi dio odlazi na taljenje elektrode (q_f) te treći dio odlazi u okolinu kondukcijom (q_{cp} i q_e), konvekcijom (q_v) i zračenjem (q_r). Ova energija se također može prikazati slijedećim formulama:

$$Q = IV \text{ J/s} \quad \text{ili} \quad Q = I^2 R_a \text{ J/s}$$

gdje je,

- Q korištena električna energija
 I jakost struje zavarivanja
 U napon struje
 R_a otpor električnog luka



Slika 20. Raspodjela topline kod zavarivanja [29]

Korištenje istosmjerne struje uvijek pruža mirniji električni luk i jednolik prijenos metala usporedno sa izmjeničnom strujom. Istosmjerna struja također pruža dobre rezultate kod zavarivanja s niskim naponom pa se često koristi kod zavarivanja tanjih presjeka.

Prednost korištenja izmjenične struje je cijena izvora energije. Posebno je poželjna kod TIG postupka zavarivanja gdje izmjena polariteta pomaže kod zagrijavanja volframove elektrode istovremeno raskidajući sloj oksida kod zavarivanja aluminijskih legura. [29]

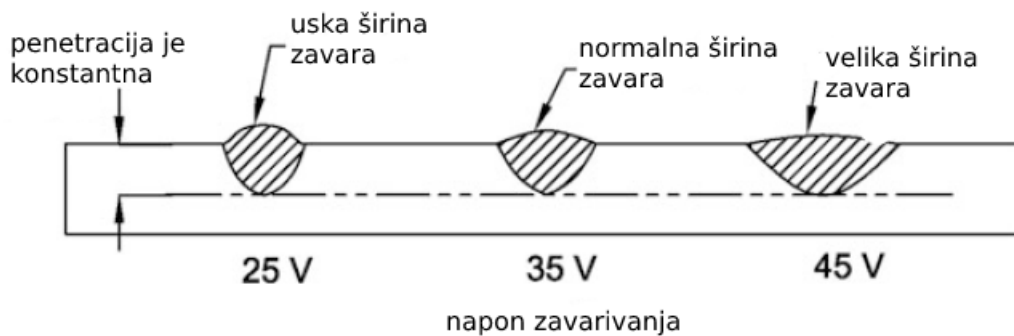
Ukoliko su ostali parametri konstantni, učinak struje se može svesti na sljedeće:

- Upravlja prijenosom topline i taljenjem elektrode, odnosno depozitom materijala
- Penetracija zavara

5.2. Napon električnog luka kod zavarivanja

Napon električnog luka ovisi od duljini električnog luka i tipu elektrode. Duljina električnog luka je udaljenost između vrha elektrode i površine rastaljenog radnog komada. Kao osnovno pravilo uzima se da duljina električnog luka ne bi smjela biti veća od promjera elektrode.

Depozit metala nije jednolik proces, jer se svakim odvajanjem metala od elektrode na radni komada napon u električnom luku konstantno mijenja. Te varijacije mogu se svesti na minimum kada se zavarivanje odvija pod dobrim uvjetima jakosti struje i duljine električnog luka. Širina zavara ovisi o udaljenosti električnog luka. Kada je udaljenost električnog luka mala tada napon električnog luka postaje veći i time raste širina zavara (svi ostali parametri su konstantni). Suprotna situacija je kod niskog napona zavarivanja, dok postoji mala duljina električnog luka pa je samim time širina zavara uža. Primjeri su prikazani na slici.



Slika 21. Primjer niskog, optimalnog i velikog napona električnog luka [29]

Jačina napona električnog luka ima zanemariv utjecaj na penetraciju zavarivanja. Neki od zaključaka utjecaja napona električnog luka su:

- Kod većeg napona zavar ima veću širinu te je „plosnatiji“
- Veća udaljenost električnog luka rezultirat će nedostatkom smjera i intenziteta
- Veća udaljenost električnog luka može izazvati prskanje, pojavu poroziteta, nejednak depozit
- Niža udaljenost električnog luka rezultira malom širinom zavara

5.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je posebno važan parametar zbog toga što kontrolira ukupno vrijeme zavarivanja i samim time ima utjecaj na cijenu izrade. U većini slučajeva brzina je fiksirana mehanizmom dok se ostali parametri poput napona i struje mijenjaju kako bi dobili konstantnu kvalitetu zavara. Neki od efekata variranja brzine zavarivanja za bilo koju kombinaciju električne struje i napona su sljedeći:

Sa povećanjem brzine zavarivanja:

- Unos topline po jedinici duljine zavarenog spoja se snižava
- Manji je unos dodatnog materijala

- Snižavanje zaostalih naprezanja
- Povećava se vjerojatnost pojave poroziteta budući da se zavar brže hladi

Sa snižavanjem brzine zavarivanja:

- Povećava se unos dodatnog materijala po jedinici duljine
- Raste unos topline po jedinici duljine
- Raste širina zavara
- Povećava se ZUT
- Povećavaju se zaostala naprezanja

Kada bi se svi ostali parametri držali konstantnima, penetracija zavara je maksimalna kod srednje brzine zavarivanja. Kod niže brzine zavarivanja rastaljeni metal ublaži prijenos topline sa električnog luka zbog toga što tekući metal ima manju toplinsku konduktivnost. Kod veće brzine zavarivanja smanji se unos topline po jedinici duljine te time smanji dubinu penetracije. Brzina zavarivanja unutar ograničenja može kontrolirati širinu zavara, brzinu hlađenja i dubinu penetracije. [29]

5.4. Brzina dodavanja dodatnog materijala

Brzina dodavanja dodatnog materijala određuje količinu metala koji se prenosi po jedinici duljine zavara ili po jedinici vremena. Svi mehanizirani uređaji imaju automatiziran sustav dodavanja elektrode.

5.5. Volframove elektrode

Volframove elektrode služe za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada. Volframove elektrode ne tale se kod zavarivanja, nego se njihovo trošenje povezuje sa brušenjem njezine geometrije. Izrađuju se u promjerima 0.5; 1.0; 1.6; 2.4; 3.2; 4.0; 6.4 i 8.0 mm, a duljine najčešće 150 mm.

Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [10]

Tip elektrode	Oznaka (boja)	Primjena i karakteristike
W	Zelena	dobra stabilnost luka kod AC zavarivanja, otporna na onečišćenja, niža cijena
dodatak oksida 1.8-2.2 % CeO ₂	Siva	karakteristike slične kao i kod elektroda sa torijevim oksidom
dodatak oksida 1.7-2.2 % ThO ₂	Crvena Žuta Ljubičasta Narančasta	laka uspostava luka, veća stabilnost luka, podnosi veće opterećenje, duži vijek trajanja, otežana stabilnost luka kod oblog oblikovanja na AC strujama
dodatak oksida 1.3-1.7 % La ₂ O ₃	Zlatna Crna Plava	vrlo slične karakteristike kao kod elektroda s torijevim oksidom
dodatak oksida 0.15-0.40 % ZrO ₂	Smeđa	izvrsne karakteristike kod AC zavarivanja i zaobljenog vrha elektrode, visoka otpornost na onečišćenja, laka uspostava električnog luka, prikladno kod zahtjeva gdje nije dozvoljeno prisustvo wolframa u zavaru

Promjer elektrode ima direktan utjecaj na dubinu penetracije zavara. Kako u nekom trenutku količina energije koja prolazi kroz elektrodu je konstantna manji promjer elektrode će imati veću gustoću prijenosa energije od većeg promjera elektrode. To rezultira dubljom penetracijom zavara kod elektroda s manjim promjerom. U slučaju povećanja jakosti struje

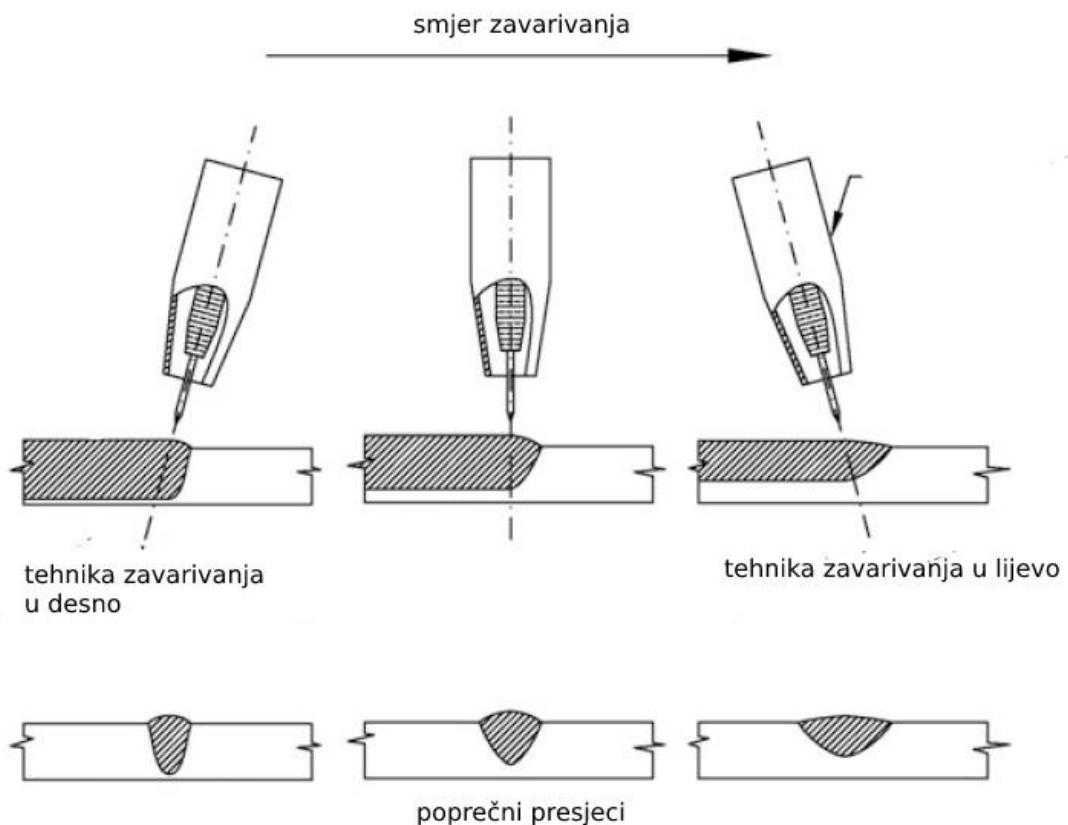
kako bi povećali unos depozita, mora se povećati promjer elektrode zbog toga što može doći do nestabilnog i nepredvidivog električnog luka. [29]

5.6. Orijentacija elektrode

Orijentacija elektrode ima puno veći utjecaj na izgled zavara i dubinu penetracije od napona i brzine zavarivanja. Orijentacija elektrode definirana je na dva načina:

- Kut između osi elektrode i smjera zavarivanja
- Kut između elektrode i površine radnog komada

Kada se formira kut od $10-20^\circ$ u smjeru zavarivanja povećava se dubina penetracije, snižava se razina prskanja i električni luk je stabilniji. Nedostatak je smanjenje vidljivosti putanje zavarivanja. Kod slučaja kada je kut zavarivanja $10-20^\circ$ suprotan smjeru zavarivanja, tada se snižava dubina penetracije, zavar je širi i plosnati. Povećava se udaljenost električnog luka te se time povećava i prskanje. Kod ovog slučaja vidljivost putanje nije ometana elektrodom. [29]



Slika 22. Prikaz rezultata poprečnih presjeka obzirom na tehniku zavarivanja [29]

Tehnika zavarivanja u lijevo se češće koristi kod tankih materijala ili materijala s nižim talištem, dok se tehnika zavarivanja koristi kod debljih materijala, već od 3 mm.

5.7. Smjesa zaštitnih plinova

Primarna funkcija zaštitnih plinova je zaštititi električni luk i rastaljeni metal od utjecaja atmosfere. Ako se ovo dvoje ne zaštiti dobro, u zavaru mogu nastati oksidi i nitridi koji dovode do nastanka poroznosti i krhkosti zavara. Osim ovih funkcija plinovi formiraju plazmu električnog luka, stabiliziraju električni luk na površini materijala i osiguravaju jednolik prijelaz rastaljenog metala. Zaštitni plinovi imaju utjecaj na sljedeća svojstva:

- Karakteristike električnog luka
- Način prijelaza rastaljenog metala
- Penetraciju i oblik zavara
- Brzinu zavarivanja
- Čišćenje zavara
- Mehanička svojstva zavara [29]

Tablica 6. Usporedba karakteristika zavarivanja pri korištenju različitih plinova [10]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjenja	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego kod 100% Ar	veća nego kod 100% Ar

5.8. Brzina hlađenja

Zavarivanje je izrazit toplinski proces. Vrijeme zagrijavanja nekog dijela zavara je kratko. Temperatura velikom brzinom naraste do točke taljenja. Suprotno tome ciklus hlađenja ovisi o nekoliko različitih faktora. Neki od njih su brzina zavarivanja, debljina radnog komada, temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura. [29]

Kod zavarivanja bakra i njegovih legura bitno je poznavanje njegovog toplinskog istezanja, električne i toplinske provodljivosti. Zbog velike toplinske provodljivosti nužno je obaviti predgrijavanje na temperaturu oko 100 °C po jednom mm debljine osnovnog materijala, maksimalno do 600 °C kako kod precipitacijski očvrnutih legura bakra ne bi došlo do omekšanja zone taljenja, otapanja precipitata i u nekim slučajevima do toplih pukotina. [8]

6. Automatizirano zavarivanje

Postupak automatizacije zavarivanja koristi robote odnosno automate kao bi se povećale performanse u proizvodnji zavara. Uvođenjem suvremenih tehnologija kod postupka zavarivanja povećava se brzina zavarivanja, preciznost, kvaliteta zavara te se također minimizira pojava grešaka ili nedosljednih zavara naspram kod ručnog zavarivanja.

Roboti kod zavarivanja kreću se glatko i vrlo precizno prateći pomak koji im je unaprijed programiran. Također mogu na sebi sadržavati različite senzore koji prate sam šav te korigiraju parametre kod zavarivanja. [15]

Automatizirano zavarivanje može se podijeliti na 2 vrste: poluautomatizirano zavarivanje i potpuno automatizirano zavarivanje.

- Poluautomatizirano zavarivanje – operater ručno učvrsti poluproizvod koji se treba zavariti, zatim se odrede parametri kod zavarivanja te se robot ili automat pušta u rad. Nakon postupka zavarivanja, operater uzima proizvod s radnog mjesta te ponovo pokreće proces s novim radnim komadom.
- Potpuno automatizirano zavarivanje – kod ovog tipa zavarivanja postoji sustav različitih strojeva, robota koji zajedno surađuju kako bi radni komad učvrstili, sensorima odredili pozicije koje treba zavariti, izvršili proces zavarivanja te na kraju obavili kontrolu kvalitete zavarenog spoja. [16]

6.1. Prednosti i nedostaci automatizacije

U moderno doba sve su veća ulaganja u automatizaciju industrije zbog veće produktivnosti i profitabilnosti koji ona postiže. Zavarivanje je jedno od kompleksnijih proizvodnih procesa

zbog različitih ulaznih parametara koji svako na svoj način utječe na konačni rezultat. Prema statistikama, polovica svjetskih robota koristi se za procese zavarivanja. Neke od bitnijih prednosti su:

1. Povećanje produktivnosti – roboti, odnosno automati mogu obraditi radne komade tri do pet puta brže od čovjeka, djelujući kontinuirano
2. Dosljednost i ponovljivost – ručno zavarivanje zahtijeva visoku razinu vještine i koncentraciju kako bi se proces izvodio iznova te sa istom kvalitetom, dok automati mogu izvoditi doslovno isti ciklus kontinuirano, 24 sata dnevno
3. Sigurnost i zdravlje – zavarivači su izloženi različitim opasnostima kao što su električni udar, udisanje plinova i štetnih para, oštećenje rožnice oka.
4. Kvaliteta – pravilnim određivanjem parametara može se dobiti visoka kvaliteta rada na prvom kao i na zadnje radnom komadu.
5. Radna snaga – sa malim brojem zavarivača s velikom vještinom i znanjem, automati pomažu u uklanjanju ovog nedostatka ručnog zavarivanja
6. Potrošnja materijala – kod ručnog zavarivanja, karakteristike zavara ovise o zavarivaču te mogu rezultirati većom potrošnjom materijala nego što je to potrebno. Roboti su programirani tako da uvijek koriste točnu količinu materijala što rezultira većom uštedom tijekom duljeg vremena.
7. Konkurentska prednost [17]

Osim brojnih prednosti koje nosi automatizacija industrije, postoje i neki nedostaci. Najveći nedostatak uvođenja automata, odnosno robota za zavarivanje su veliki početni troškovi. Nakon duljeg vremena korištenja, ulaganje se višestruko vraća. Drugi nedostatak je fleksibilnost. Dok se zavarivač može jednostavno prebaciti s jednog tipa radnog komada na idući za koji vrijede drugi parametri zavarivanja, automatizirani uređaji se fokusiraju na jedan proizvod dok ih se ne programira za novi. [18]

6.2. Automati za pravocrtno zavarivanje

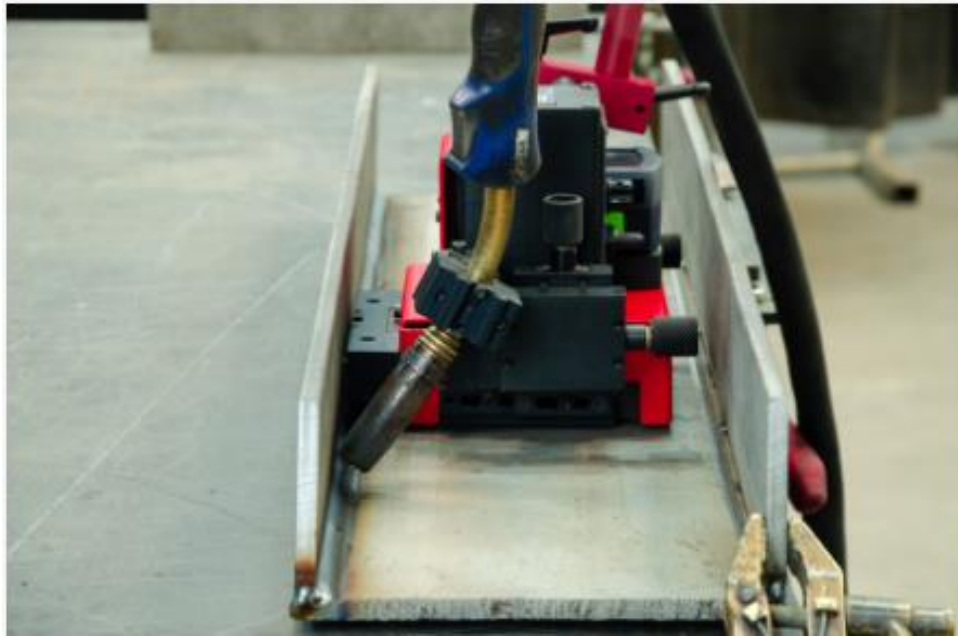
Sa sve većom kvantitetom pravocrtnog zavarivanja za industriju su razvijeni posebni „gusjeničari“ koji bez obzira na duljinu zavara gotovo garantiraju kvalitetu kroz bilo koji presjek zavarenog profila, cijevi ili predmeta koji se zavaruje. Ovi uređaji osiguravaju precizne pomake sapnice te konstantnu brzinu pomaka. Prikazano je nekoliko primjera ovakvih automata.

Mini Spider – automat za uska zavarivanja

Mini Spider je automat malih dimenzija s pogonom na bateriju. Dizajniran je tako da izvodi kontinuirane zavare sa svoje lijeve ili desne strane koristeći MIG ili MAG postupak zavarivanja. Brzina zavarivanja je osigurana sa 4 magnetna kotača kojima se uređaj kreće. Konstantnom, kontinuiranom i ponovljivom brzinom zavarivanja mogu se dobiti točno tražene specifikacije zavarenog spoja. Također nakon određenog vremena smanjuje se potrošnja samog materijala. Postoji mogućnost spajanja uređaja na dodatan izvor energije spajanjem na gradsku mrežu. Koristi se kod zavarivanja različitih profila. Slični primjeri automata su Gecko (Promotech®), Arcrover (Fronius) [20]



Slika 23. Mini spider [20]



Slika 24. Zavarivanje uz pomoć automata [20]

Tablica 7. Karakteristike Mini Spider automata [20]

Napon	18 V DC, 5.2 Ah (baterija) 1~110-240 V, 50-60 Hz (opcija)
Snaga	25 W
Promjer sapnice	16 – 22 mm
Horizontalna brzina zavarivanja	0 – 110 cm/min
Vertikalna brzina zavarivanja	0 – 100 cm/min
Masa uređaja (bez baterije)	7.6 kg

Semac – Elena

Ovaj tip automata primjeren je za pravocrtno zavarivanje različitih vrsta limova, dijelova spremnika, kućišta i cijevi. Mogu se koristiti sa više tipova zavarivanja: MIG/MAG, TIG, plazma, laser. Pogodna je za debljinu materijala od 0.15 do 10 mm, ovisno o vrsti materijala. Materijali koji se zavaraju ovim uređajem su: čelik, nehrđajući čelik, aluminij, titan, bakar. Postoje različiti izvedbe uređaja (ELENA I, ELENA II, ELENA III) koje su specijalizirane za neki oblik zavarivanja (vertikalno zavarivanje, zavarivanje velikih promjera, velikih dužina, unutarnje zavarivanje cijevi). Na slici ispod prikazan je tip ELENA VII za posebno velike dijelove. Ovo se posebno traži kod konstrukcije spremnika ili bojlera. Vertikalna pozicija je

prihvatljiva u ovim slučajevima jer se odmah odredi orijentacija za proces zavarivanja te daljnje naknadne procese. [21]



Slika 25. Prikaz Semac Elena One automata i primjera mogućih zavarivanja cijevi

GWS – Sustav s pokretnim postoljem

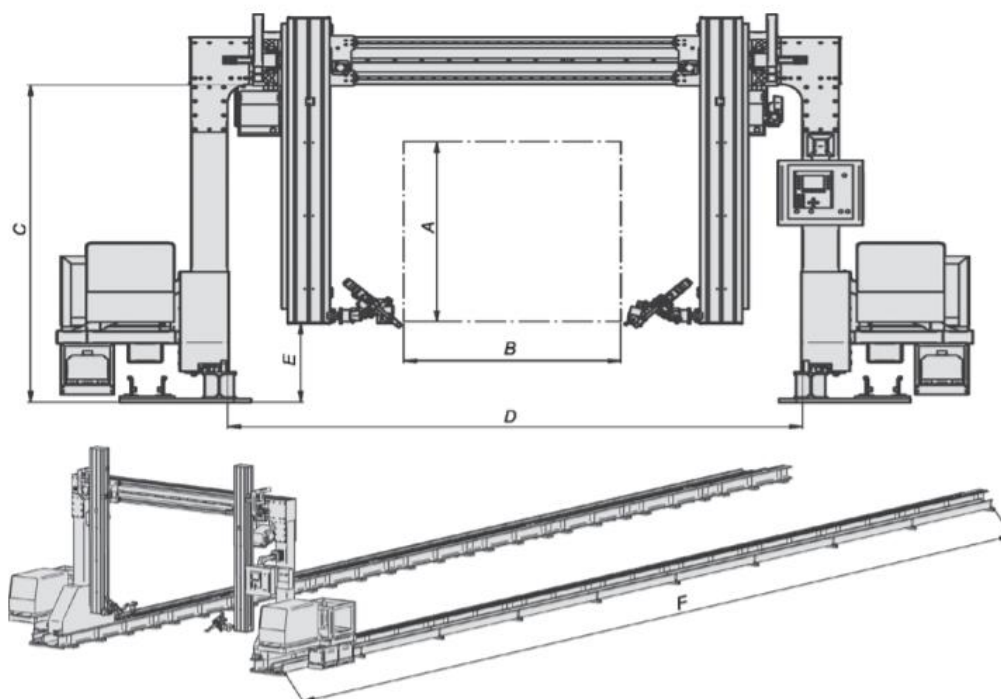
Svojim izgledom ovaj sustav podsjeća na trookoordinatni mjerni uređaj. Namijenjen je za zavarivanje greda velikih dimenzija. Kod ovog sustava može se koristiti MIG/MAG tip zavarivanja ili zavarivanje pod troskom ovisno o zahtjevima kupca. Osnovna verzija sadrži 5 računalno kontroliranih osi koje se upravljaju putem računalnog softwarea. Svaka os ima pogona na visoko kvalitetni servo motor koji je kontroliran digitalnim pretvaračem. Kruta i teška konstrukcija bazira se na aluminijskim profilima. [21]



Slika 26. Promotech GWS sustav zavarivanja [21]

Neke osnovne prednosti ovog sustava su:

- Automatizirani proces zavarivanja
- Visoka efikasnost i stopa proizvodnje
- Oslobađanje vrijeme rada nekoliko zavarivača
- Osiguravanje visokokvalitetnih zavarenih spojeva s konstantnom ponovljivošću
- Zavarivanje u više prolaza
- Unapređuje se radna okolina te sigurnost na radnom mjestu [21]



Slika 27. Prikaz sustava s pokretnim postoljem [21]

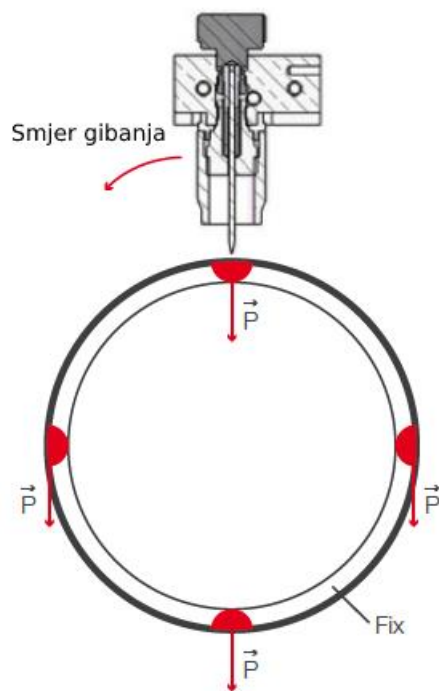
Tablica 8. Prikaz dimenzija različitih vrsta GWS sustava [21]

GWS vrsta/veličina	GWS 1200/1200	GWS 1500/1500	GWS 1500/2500	GWS 1800/3300
A x B [mm]	1200 x 1200	1500 x 1500	1500 x 2500	1800 x 3300
C x D [mm]	2000 x 3100	2300 x 3500	2300 x 4500	2600 x 5500

6.3. Automati za orbitalno zavarivanje

Početak orbitalnog zavarivanja je tijekom 60-ih godina prošlog stoljeća kako bi se zadovoljile potrebe svemirske industrije. Proces se može jednostavno automatizirati te se sastoji od pištolja koji rotira oko nepomičnog komada koji se zavaruje. Prikladan je kod zavarivanja cijevi i može se implementirati na terenu. [22]

Na ponovljivost utječu razni faktori, npr. oblik volframove elektrode, čistoća plina, priprema površine. Ovaj oblik zavarivanja danas se najviše koristi kod farmaceutske, prehrambene, kemijske i nuklearne industrije.



Slika 28. Shematski prikaz orbitalnog zavarivanja cijevi [22]

Orbitalno zavarivanje stabilan je proces, no prethodno je potrebna dobra priprema. Može se zavariti širok spektar materijala: čelici visoke tvrdoće, čelici otporni na koroziju, nelegirani ili niskolegirani ugljični čelik, legure nikla, titan, bakar, aluminij. Sam proces se izvodi u kontroliranim uvjetima u zaštićenoj atmosferi. Izrazito je čist postupak zavarivanja te postiže stroge zahtjeve kvaliteti i izgledu zavara. Korisničko sučelje pojednostavljuje sam proces zavarivanja tako da postupkom mogu upravljati i operateri koji ne moraju nužno biti zavarivači. U većini slučajeva, računalni sistem određuje parametre zavarivanja, te vodi operatera do optimalnih rezultata zavarivanja. [22]

6.3.1. Oprema kod orbitalnog zavarivanja

1. Programibilan izvor napajanja

a. Prijenosni izvori energije

Mala masa omogućava prijenos izvora energije do radnog mjesta. Male dimenzije omogućuju prolaz kroz otvore manjih dimenzija. Može kontrolirati do 4 parametra zavarivanja. [23]

Tablica 9. Prijenosni izvor energije [23]

Masa	< 30 kg
Jakost struje	do 160 A
Napon	230 V

b. Izvori energije srednje veličine

Jakost struje može biti do 400 ampera. Zbog veće mase, postavljeni su na kotačima zbog mobilnosti. Mogu kontrolirati do 6 parametara zavarivanja. [23]

c. Veliki izvori energije

Jakost struje: 300 – 600 ampera. Napon: 3 – fazni 415 V ili višenaponski ulaz. Može kontrolirati 6 ili više parametara zavarivanja. [23]

2. Glava zavarivanja

Kod orbitalnog zavarivanja glava ima nekoliko važnih funkcija. Prva je da drži elektrodu na mjesto kako bi zavar bio što kvalitetniji. Također održava konstantnu temperaturu i opterećuje radni komad tlakom. Postoje dva glavna oblika orbitalnih glava za zavarivanje. [23]

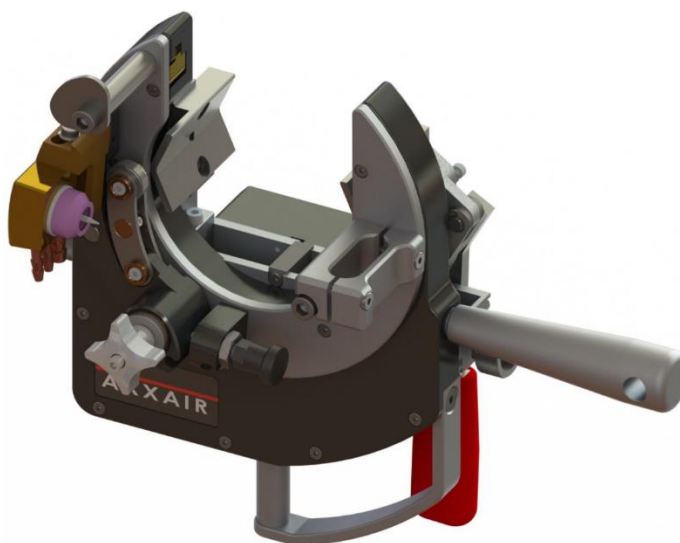
Zatvoreni oblik glave ima kompaktni dizajn i savršena je kod zavarivanja na terenu cijevi manjeg presjeka. Zaštitni plin zatvorene glave omogućuje odvijanje samo procesa u odličnoj zaštitnoj inertnoj atmosferi oko cijevi. Dobivaju se zavareni spojevi odlične kvalitete na čeliku debljine do 2,3 mm i promjera između 6 i 114,3 mm. Ovaj tip se najviše koristi u industriji gdje su važni higijenski uvjeti, npr. prehrambena i farmaceutska industrija. Najčešće korišteni materijali kod ovog zavarivanja su nehrđajući čelik i titan.



Slika 29. Axxair orbitalna glava zatvorenog oblika [24]

Orbitalne glave otvorenog oblika mogu se koristiti kod uvjeta ograničenog prostora. U opremu je uključeno motorizirano pozicioniranje kako bi se olakšalo korištenje gdje postoji ograničen prostor za zavarivanje pod različitim kutevima.

Ukoliko se ovaj tip glave koristi često, preporuča se sustav vodenog hlađenja, u suprotnom sustav hlađenja sa zrakom radi lakše ukupne mase opreme i pogodnije cijene. [24]



Slika 30. Orbitalna glava otvorenog oblika [24]

3. Dodavač žice

4. Sustav za hlađenje

Postoje dva osnovna sustava hlađenja kod orbitalnog zavarivanja. Sustav hlađenja zrakom i sustav vodenim hlađenjem. U tablici je prikazana usporedba tih dvaju sustava.

Tablica 10. Usporedba sustava hlađenja orbitalnog zavarivanja [24]

Sustav hlađenja zrakom	Sustav vodenim hlađenjem
Zavarivanje većih volumena i pod višom jakosti struje	Zavarivanje pod nižom jakosti struje
Veći radni ciklus	Manja početna ulaganja
Jednostavno upravljanje	Lako prenosivo, nema potrebe za izvorom rashladne tekućine
	Jednostavno postavljanje
Visoka cijena – velika početna ulaganja; troškovi održavanja	Ne podržava zavarivanje pod većom jakosti struje

6.3.2. Programiranje i parametri zavarivanja

Svaki zavar koji se izvodi orbitalnim zavarivanjem može se zasebno kontrolirati i konfigurirati kako bi se dobile najbolje moguće karakteristike zavara. Većina uređaja za orbitalno zavarivanje ima mogućnost prilagodbe parametara unutar programa ovisno o vremenu ili kutu oko cijevi. Na taj se način mogu mijenjati brzina kretanja, promjena struje ili drugi parametri unutar jedne rotacije. Time se može smanjiti unos topline u materijal nakon što se cijev već prethodno zagrije. [25]

Postavke se mogu prilagoditi za različite baze materijala, promjera cijevi i njihovih debljina. Varijacije koje vode do pogrešaka kod konvencionalnih uređaja za zavarivanje mogu biti minimizirane. Većina proizvođača uređaja za orbitalno zavarivanje pruža i unaprijed postavljene programe uz opremu. Dodatni programi se mogu napraviti te se svaka konfiguracija može snimiti i spremi za kasnije proučavanje ili ponovo izvođenje. Moderniji uređaji se mogu ažurirati preko USB uređaja. [25]

6.4. Kombinirani sustavi za zavarivanje

Kombinirani sustavi za zavarivanje uključuju više različitih metoda zavarivanja u jednom sklopu. U jednom ciklusu zavarivanja time se omogućuje zavarivanje više različitih pozicija preko longitudinalnog i orbitalnog zavarivanja. Smanjuje se ukupno vrijeme zavarivanja time što se smanjuju pojedina vremena izmjene elektroda, vremena stezanja radnog komada, prilagodba struje i ostalih parametara. Jedan od primjera kombiniranih sustava predstavlja tvrtka Fronius. [26]



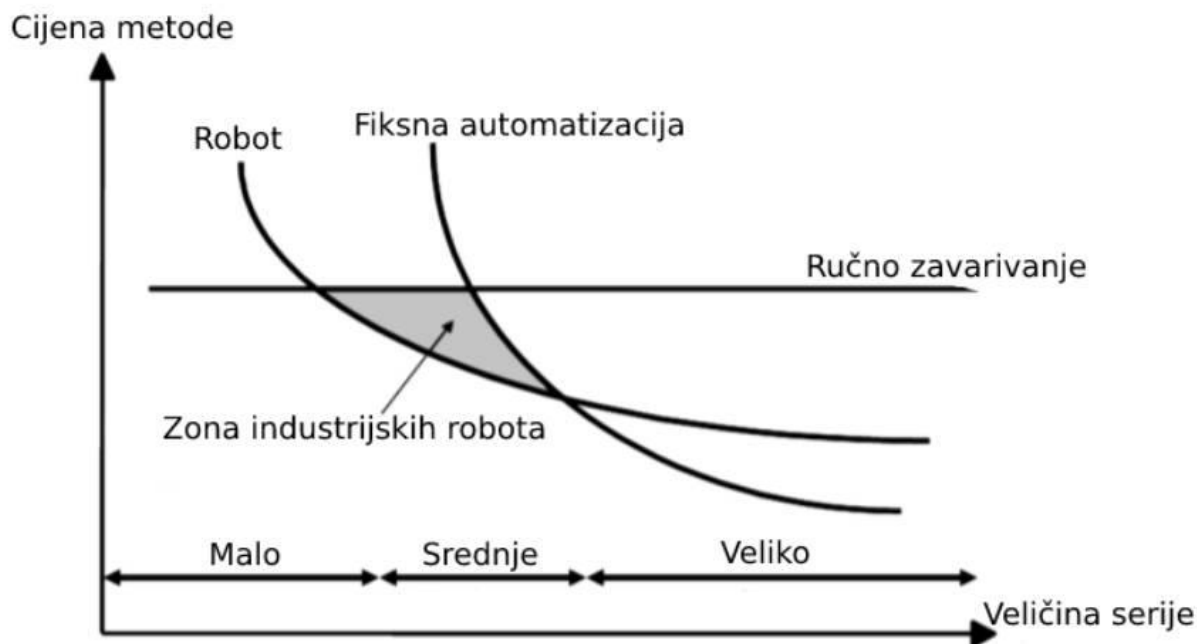
Slika 31. Fronius kombinirani sustav zavarivanja [26]

Visoko napredni kontroler može upravljati do 10 motoriziranih osi kretanja, potpomognuto grafičkim prikazom. Na samom gorioniku ugrađena je kamera koja uživo prenosi slike električnog luka na zaslone. U sustavu se još nalaze oslonci za radni komad, pozicioner te izvori struje.

6.5. Robotizirano zavarivanje

Sustav robotiziranog zavarivanja koristi se u različitim industrijama. Integracijom robota ostvaruju se mnoge pogodnosti kod zavarivanja. Najznačajnije od njih su preciznost i produktivnost. Također jedna od značajki je smanjivanje čovjekovog rada i njegovog utjecaja.

Industrijsko robotsko zavarivanje daleko je najveća primjena robota u svijetu. Najbolji primjer upotrebe je autoindustrija. Radi sve strožih zahtjeva kvalitete i vremena isporuke počinju se koristiti i u manjim poduzećima. Na slici je prikazano područje isplativosti ulaganja u robotsko zavarivanje.

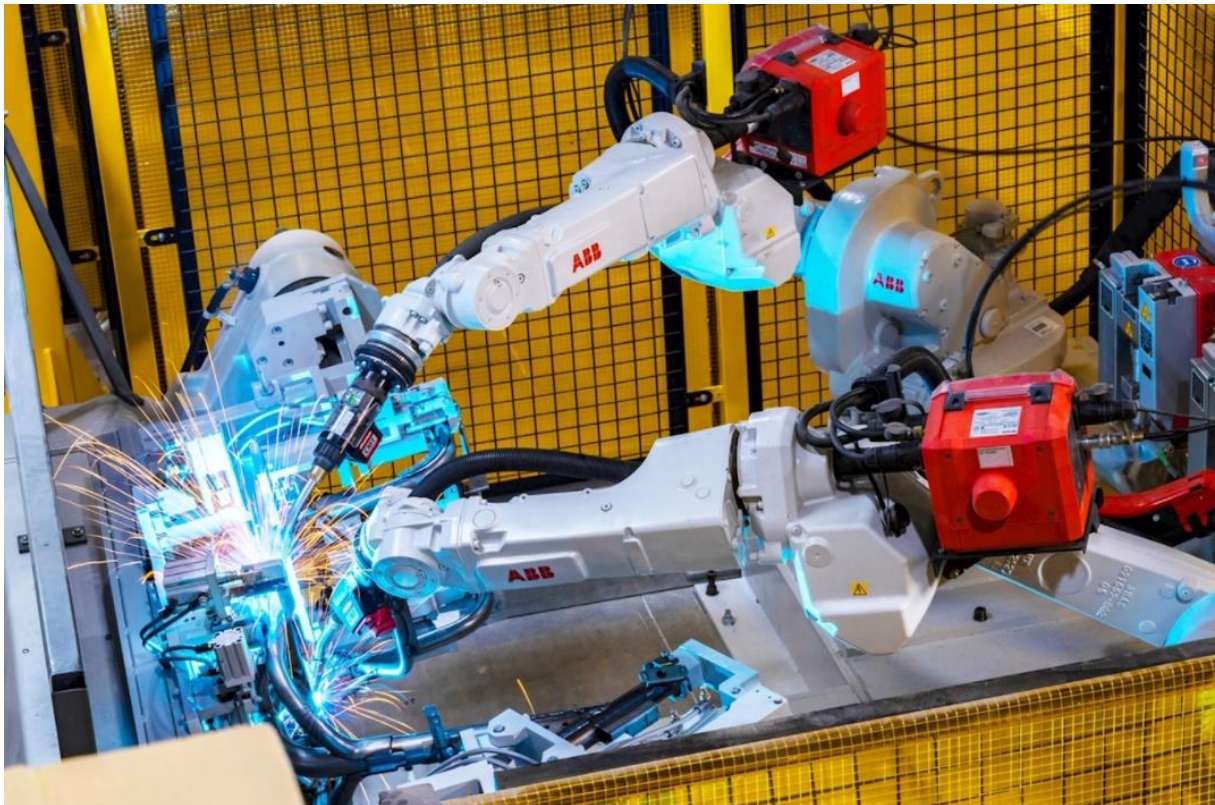


Slika 32. Prikaz zone industrijskih robota [28]

6.5.1. Prednosti i nedostaci

Uvođenje robotskog zavarivanja više nije odlika samo velikoserijske proizvodnje budući da je robotizacija sve naprednija i pristupačnija samom korištenju. Neke od prednosti korištenja robota u zavarivanju su poboljšavanje kvalitete, bolja ponovljivost, brži ciklusi rada te naposljetku i veća ekonomska isplativost. Nedostatak iskusnih zavarivača predstavlja nužnost napredovanja i ulaganja u automatizaciju kako bi se ona mogla uključiti u što više procesa u proizvodnji. Tako bi operater koji radi zajedno s robotom na jednoj zoni rada mogao pripremati radni komad dok bi u drugoj robot sam izvršio zavarivanje drugog. Također proizvođači robota za zavarivanje surađuju s ostalim proizvođačima dodatne opreme kako bi njihovi proizvodi što bolje zajedno funkcionirali. Prednost robota za zavarivanje nad ostalim automatima je njihova mogućnost rotacija i kretanja preko nekoliko različitih osi. [28]

Cijena je još uvijek najveći nedostatak kod korištenja robota za zavarivanje. Potrebno je imati iskusnog čovjeka koji može napraviti program po kojem će robot izvoditi proces. Loše programiranje vodi do loših rezultata. Još jedan nedostatak robota za zavarivanje je njihova ograničenost kretanja.



Slika 33. ABB robot IRB 1660ID u postupku zavarivanja [39]

7. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u laboratoriju K-21 na Sveučilištu Sjever. Cilj ovog eksperimenta bio je ispitati utjecaj različitih parametara na izgled i kvalitetu dobivenog zvara. Osnovni materijal bile su Cu-ETP ploče dimenzija 160x70x3 mm. Eksperiment se provodio uz pomoć Rail Bull automata za pravocrtno zavarivanje. Nakon zavarivanja proveden je test savijanja i napravljeni su makro presjeci uzoraka.

7.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal za ovaj eksperiment bio je elektrolitički pročišćeni bakar velike električne vodljivosti. Dimenzije uzoraka su 160x70x3 mm. Od strane proizvođača dobiven je atest kojim se garantiraju neka od svojstava ove vrste bakra. Materijal je napravljen u skladu s HRN EN 1652 normom kojom se garantira kemijski sastav.

Material 3059367 - SHEETS Cu-ETP 3,0X1000X2000 R240(1/2T) EN, Total: 546,000
 Batch V1365/20, Neto 546 KG
 Standard: EN 13599 OR EN 1652

CHARACTERISTIC	UoM	MIN.	MAX.	RESULT
Sample 200154353				
1. % Cu	%	99,900	-	99,900 %
2. Tens. strength Rm	N/mm2	240,0	300,0	248,9 N/mm2
3. Elongation A50	%	15,0	-	39,8 %
4. Yield strength Rp0	N/mm2	180,0	-	216,8 N/mm2
5. electrical conduct	SIM	57,0	-	57,1 SIM

Slika 34. Atest dobiven od strane proizvođača

Tablica 11. Karakteristike osnovnog materijala

Tip bakra	%Cu	R_m [Mpa]	Produljenje A50%	R_{p0} [Mpa]	Električna provodljivost [SIM]
Cu ETP	99,900	248,9	39,8	216,8	57,1

7.2. Oprema za zavarivanje

U ovom potpoglavlju ukratko je opisana oprema koja se koristila u eksperimentu. Proces zavarivanja je automatiziran uz pomoć Rail Bull automata. Korištena je istosmjerna struja te je izvor struje uređaj marke Varstroj. Za zaštitnu atmosferu korištena je mješavina argona i helija.



Slika 35. Oprema za zavarivanje

7.2.1. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje je Varstroj Vartig 2005 AC/DC uređaj. Ovaj tip uređaja namijenjen je za TIG zavarivanje. Primjenjuje se kod montažnih i remontnih radova, u radionicama ili lakšoj industriji. Neke od karakteristika uređaja su :

- Odlična kvaliteta zavara
- Digitalni prikaz svih funkcija
- HF – visokofrekventno paljenje bez kontakta
- 2. i 4. taktno zavarivanje

Tablica 12. Tehnički podaci uređaja [30]

TIP	Vartig 2005 AC/DC
Priključni napon:	1 x 230 V
Osigurač (spori):	20 A
Područje zavarivanja TIG DC:	5 - 170 A
Područje zavarivanja TIG AC/DC:	5 – 200 A
Područje zavarivanja REL:	5 – 170 A
Intermitencija TIG AC/DC:	40% - 200 A 60% - 160 A / 170 A 100% - 130 A / 130 A
Napon zavarivanja REL/TIG:	20-26,8 V / 10-16,8 V
Promjer elektrode:	Ø 1,5 – 4 mm
Hlađenje izvora:	Prisilno – ventilator
Masa:	18 kg
Dimenzije (mm):	440 x 222 x 480



Slika 36. Kontrolna ploča

Funkcije uređaja za zavarivanje VARTIG 2005 AC/DC:

- 1) Prikaz trenutno korištene struje za zavarivanje
- 2) Tipka za spajanje na rad sa daljinskim regulatorom
- 3) Tipka za odabir vrste struje
- 4) Prikaz uključenja termo zaštite
- 5) Prikaz uključenja invertera
- 6) Prikazivač za prikaz parametara zavarivanja
- 7) Tipka za prespajanje između parametara zavarivanja
- 8) Prikaz ručnog pulsiranja glavne i završne struje
- 9) 2-taktni rad + paljenje sa dodirrom
- 10) 4-taktni rad + paljenje sa dodirrom
- 11) 2-taktni rad + HF paljenje
- 12) 4-taktni rad + HF paljenje
- 13) Encoder za regulaciju parametara zavarivanja
- 14) Tipka za mijenjanje vrste zavarivanja

7.2.2. Plinovi za zavarivanje

Za ovaj eksperiment koristila se mješavina inertnih plinova argon i helij. Mješavina je usklađena prema normi ISO 14 175-I3-ArHe-50. Preko ove oznake znamo da se u boci nalazi

50% helija i 50% argona. Čistoća plinova je 99.99%. Jedan od konstantnih parametara u ovom eksperimentu je protok plina čiji je iznos 16 l/min.



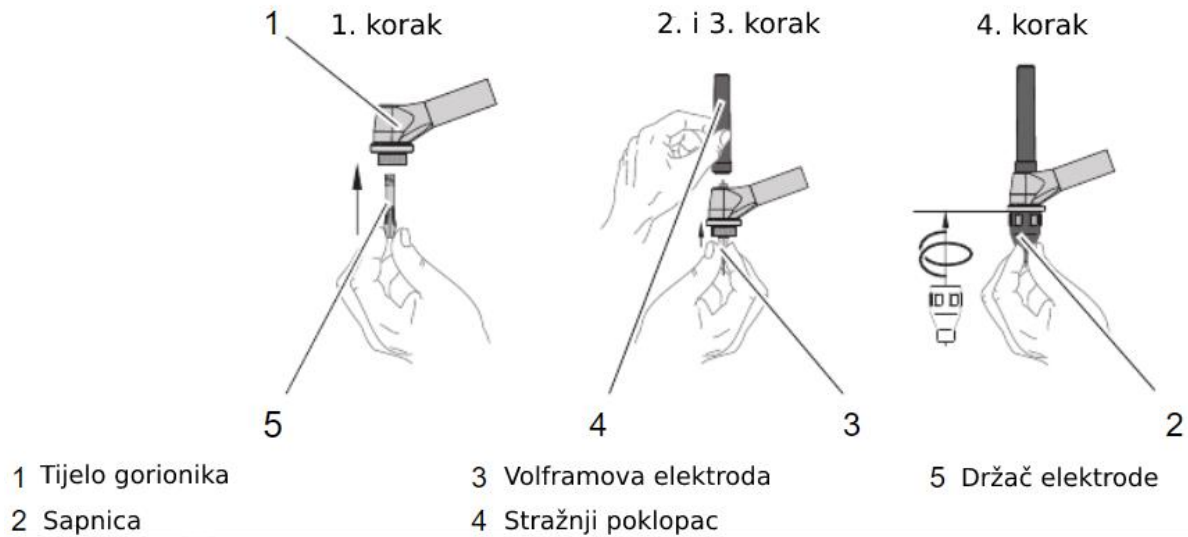
Slika 37. Označeni sastav plinova u boci

7.2.3. Gorionik i netaljiva elektroda

Korišten je ABITIG® GRIP 450 W gorionik za zavarivanje. Gorionik se sastoji od 3 komponente: stražnji poklopac, držač elektrode/ difuzor plina i plinska sapnica sa navojem. Hlađenje ovog tipa uređaja izvodi se tekućinom. U tablici su prikazani tehnički podaci vezani za gorionik.

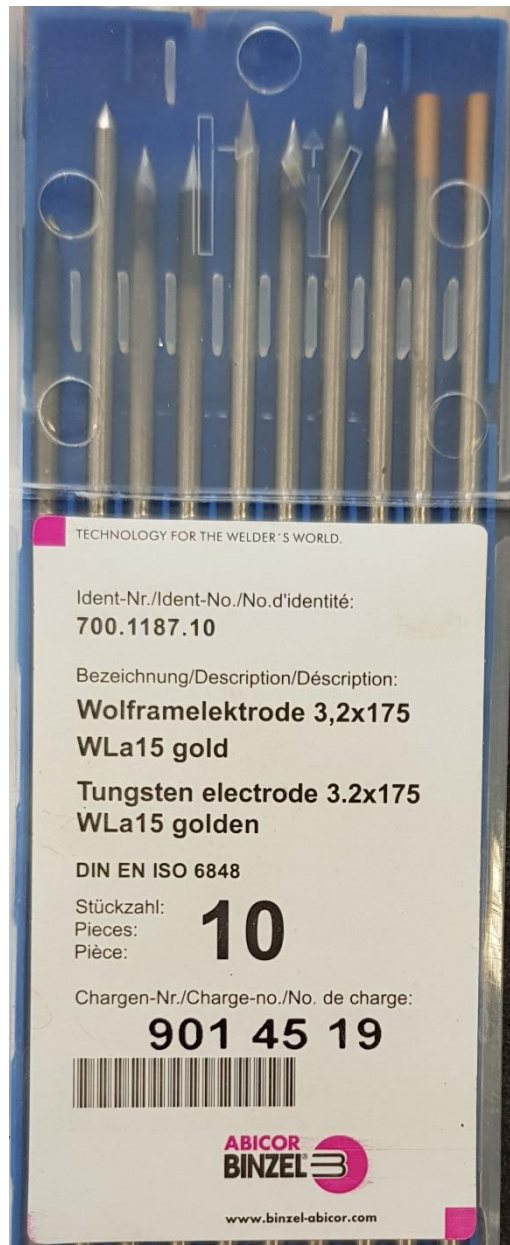
Tablica 13. Tehnički podaci gorionika [31]

Model	ABITIG® GRIP 450 w
Snaga	
DC:	420 A / 400 A
AC:	300 A / 280 A
Intermitencija (%):	60 / 100
Volfram elektrode Ø (mm):	1.6 – 4.8



Slika 38. Prikaz postavljanja elektrode u gorionik [31]

U gorioniku se nalazi WLa15 zlatna volfram elektroda dimenzija 3.2x175 mm. Elektroda je prekrivena lantanovim oksidom što omogućava lakše stvaranje električnog luka. Može se koristiti kod istosmjerne i izmjenične struje.



Slika 39. Volframove elektrode

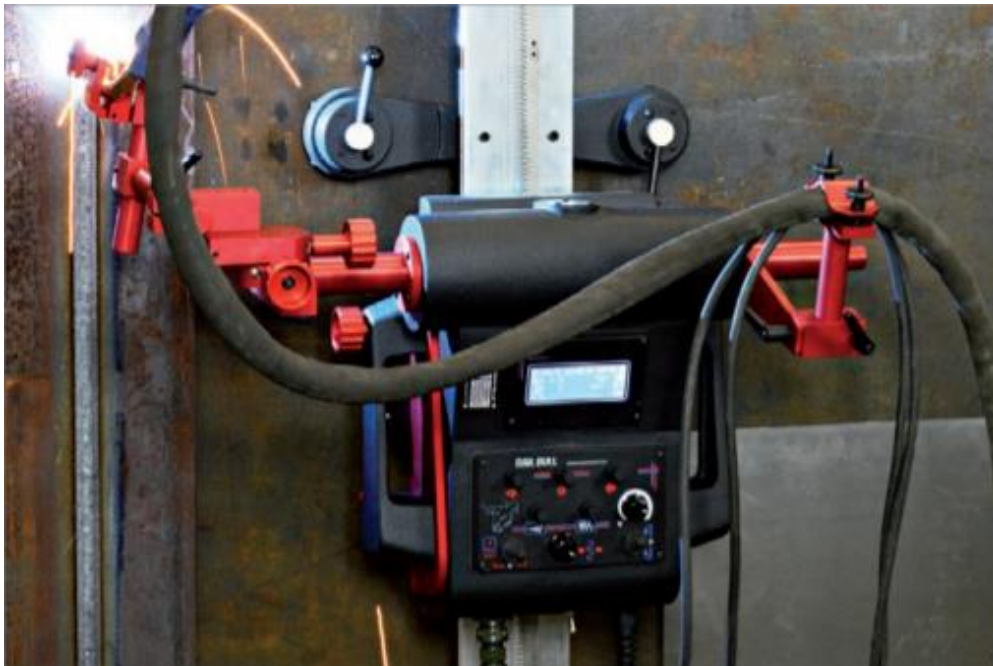
7.2.4. Automat za zavarivanje

Zavarivanje se izvodilo pomoću pravocrtnog Rail Bull automata za zavarivanje tvrtke Promotech. Uređaj je lagane i kompaktne veličine. Namijenjen je za horizontalno i vertikalno pravocrtno zavarivanje. Također ugrađen je sustav osciliranja, odnosno njihanja po putanji zavarivanja ukoliko se to traži. Primjenjuje se u brodogradnji, izradi transformatora, konstrukcijskih čelika, spremnika ulja i vode, u bilo kojoj aplikaciji koja zahtijeva duge, kontinuirane zavare. Kako se koristi i kod kružnih objekata, minimalan radijus kod kojeg uređaj funkcionira mora biti 5000 mm.

1. Tipka za uključivanje/isključivanje
2. Kontrolna ploča
3. Držać gorionika sa stezaljkom
4. Sklop za pozicioniranje
5. Ruka oscilatora
6. Zaslon
7. Stezaljka konektora
8. Ručica pogonske spojke
9. Poluga za montažu
10. Ručka za nošenje
11. Tipka za paljenje el. luka



Slika 40. Rail Bull automat [32]



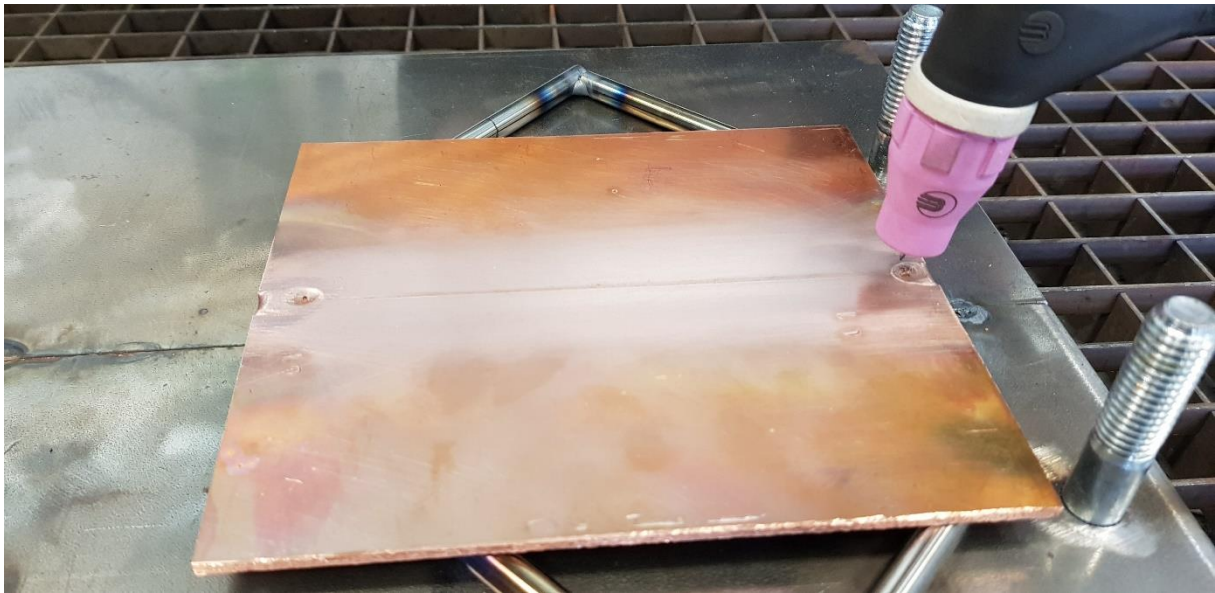
Slika 41. Automatizirano vertikalno zavarivanje pomoću Rail Bull automata [32]



Slika 42. Prikaz kontrolne ploče Rail Bull automata

7.3. Priprema i proces zavarivanja

Prije samog procesa zavarivanja potrebno je pripremiti uzorke. Uzorci su prethodno sušeono učvršćeni kako bi lakše izvodilo zavarivanje. Svaki uzorak se brusi i očisti alkoholom kako bi se uklonile površinske nečistoće koje mogu imati utjecaj na konačan rezultat. Protok plina je određen kao konstantan parametar kod svakog uzorka te on iznosi 16 l/min. Odabrana volframova elektroda mora se nabrusiti i zatim se učvršćuje u gorionika. Koristi se istosmjerna struja sa minus polom na elektrodi. Ispod gorionika postavlja se postolje na kojem su se fiksirali uzorci. Udaljenost između vrha elektrode i uzorka iznosi 3 mm uz kut nagiba 80°. Dimenzije uzoraka su 160x70 mm uz 3 mm debljine.



Slika 43. Pozicioniran uzorak ispod elektrode

Na kontrolnoj ploči automata definira se brzina i amplituda osciliranja. Brzina osciliranja iznosi 20 cm/min, a amplituda 0,2 cm. Nakon postavljanja svih konstantnih parametara izvodi se zavarivanje. Svaki uzorak se neposredno prije zavarivanja predgrijava na 300 °C preko kontaktnog grijača. U tablici su prikazani uzorci te njima pripadajući parametri

Tablica 14. Odabir parametara za svaki uzorak

Uzorak	Jakost struje [A]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]
1	156	20
2	156	23
3	152	20
4	152	23
5	160	23
6	160	20

8. Rezultati zavarivanja

Nakon što je proces zavarivanja završen dobiveni su različiti rezultati zavara uzoraka. Na slikama ispod prikazana su lica dobivenih zavara. Uzorak broj jedan i uzorak broj dva prikazani su na slikama ispod. Jakost struje kod ovih uzoraka iznosi 156 A. v_{z1} iznosi 20 cm/min, v_{z2}

iznosi 23 cm/min. Iz priloženih slika vidljivo je da mala promjena parametra brzine utjecala je na potpuno drukčiji izgled zavora.



Slika 44. Lice zavora prvog uzorka



Slika 45. Lice zavora drugog uzorka

Kod uzorka broj tri i uzorka broj četiri jakost struje je iznosila 152 A. Uzorak broj tri v_z iznosi 20 cm/min, dok kod uzorka broj četiri v_z iznosi 23 cm/min.



Slika 46. Lice zavora trećeg uzorka



Slika 47. Lice uzorka četvrtog uzorka

Uzorak broj 5 i uzorak broj 6 izvedeni su na najvećoj jakosti struje od 160 A. Kod uzorka broj 5 brzina zavarivanja je iznosila 23 cm/min, a kod uzorka broj 6 brzina zavarivanja je iznosila 20 cm/min.

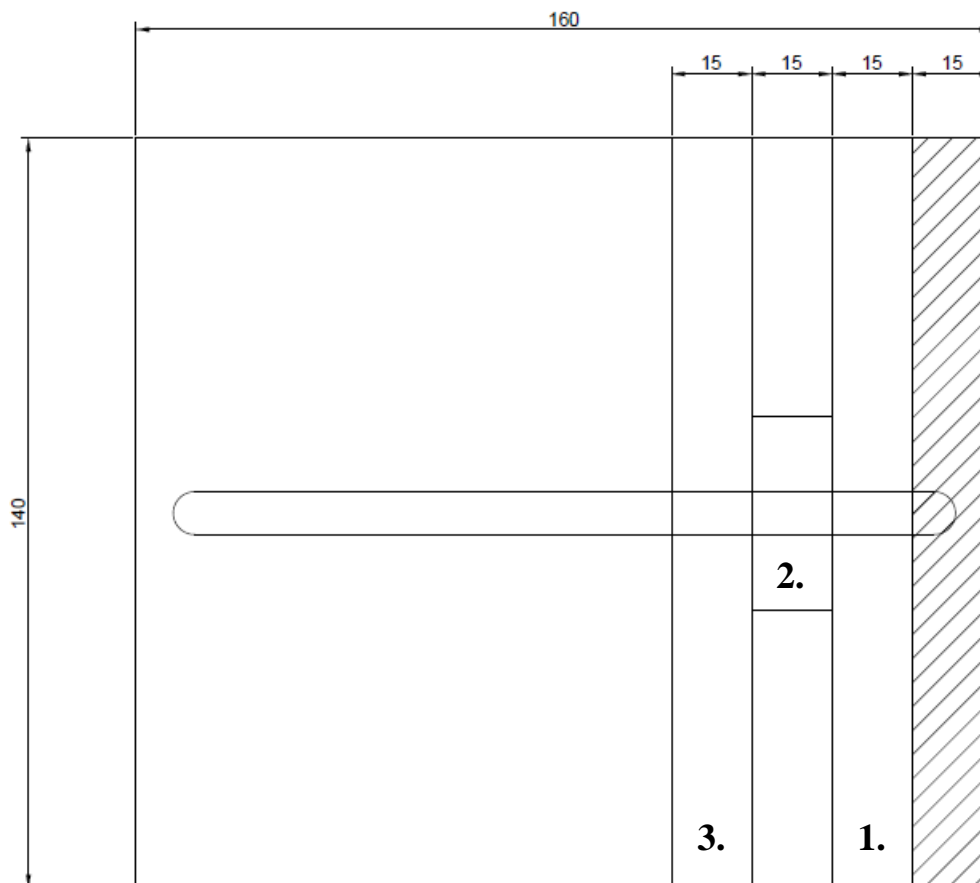


Slika 48. Lice zavora petog uzorka



Slika 49. Lice zavora šestog uzorka

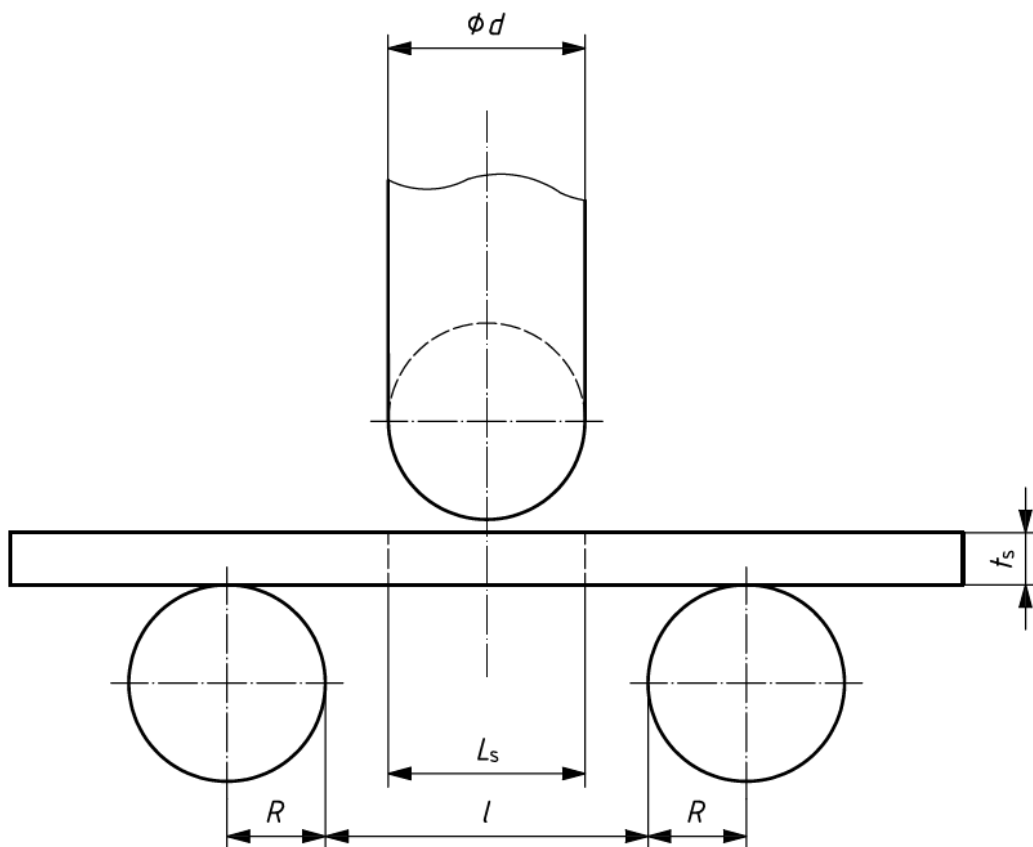
Nakon zavarivanja iz svakog su se radnog komada na tračnoj pili izrezana su tri uzorka za ispitivanje savijanjem i brušenjem. Širina uzoraka je 15 mm. Početni dio radnog komada se odbacuje, prvi i treći uzorak se koriste za pokus savijanja, a drugi se koristi za makro presjek.



Slika 50. Skica izrezivanja uzoraka

8.1. Ispitivanje savijanjem

Nakon što su se dobili uzorci za daljnja ispitivanja, uzima se prva i treća epruveta za test savijanja. Ispitivanje se provodi prema normi EN ISO 5173. Na slici ispod prikazana je shema savijanja,



Slika 51. Shema savijanja prema normi EN ISO 5713 [33]

Tablica 15. Dimenzije kod savijanja

l	70 mm
R	27.5 mm
L_s	8 mm
t_s	3 mm
ϕd	6 mm

Epruvete su podvrgnute savijanju do 180°, neki testovi su prekinuti pri pojavi prijeloma. Na slikama su prikazani dobiveni rezultati. Na svakoj fotografiji lijeva epruveta prikazuje savijanje korijena zavara, dok desna prikazuje savijanje lica zavara.



Slika 52. Epruvete prvog uzorka



Slika 53. Epruvete drugog uzorka



Slika 54. Epruvete trećeg uzorka



Slika 55. Epruvete četvrtog uzorka



Slika 56. Epruvete petog uzorka



Slika 57. Epruvete šestog uzorka

Kod drugog, trećeg i četvrtog uzorka dolazi do prijeloma kod savijanja korijena zavara, dok se kod lica zavara golim okom ne vidi prijelom. Kod šestog uzorka dobiveni su obrnuti rezultati, korijen zavara ostaje čitav, dok kod savijanja lica zavara dolazi do pojave loma. Pri savijanju uzorka broj jedan i uzorka broj pet prijelom se pojavljuje kod savijanja korijena i kod savijanja lica zavara. Svaki dobiveni prijelom u ispitivanju se pojavljuje u ZUT.

8.2. Makro presjek

Drugo ispitivanje odvijalo se na drugoj epruveti uzorka. Iz druge epruvete izrezani su manji uzorci dimenzija 36x15 mm. Ti uzorci su zatim podvrgnuti brušenju kako bi se dobio što bolji izgled presjeka zavara. Uzorci su brušeni na uređaju za poliranje i brušenje Presi Minitex 250 SP1.

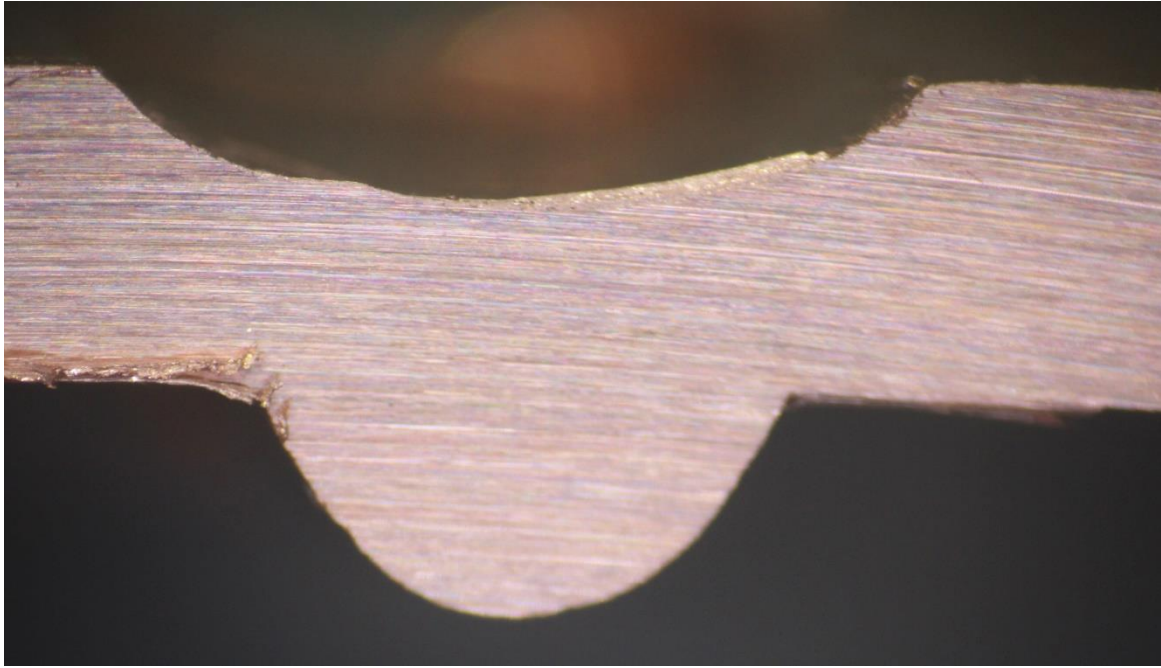


Slika 58. Presi Minitech 250 SP1

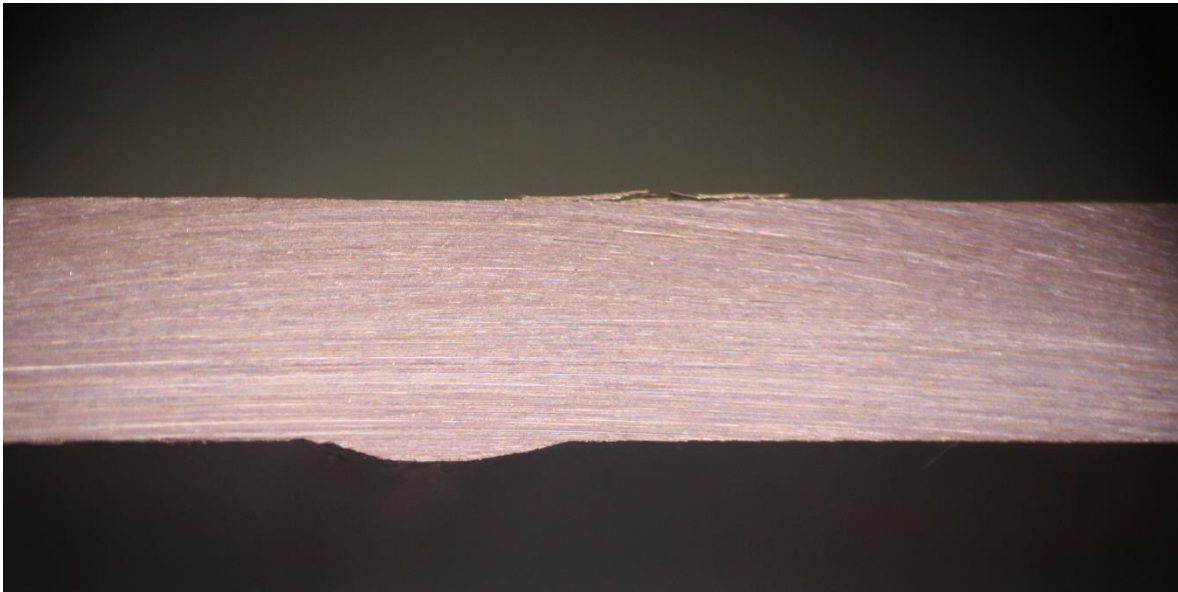
Uzorci su brušeni slijedećim granulacijama brusnog papira:

1. P180
2. P360
3. P600

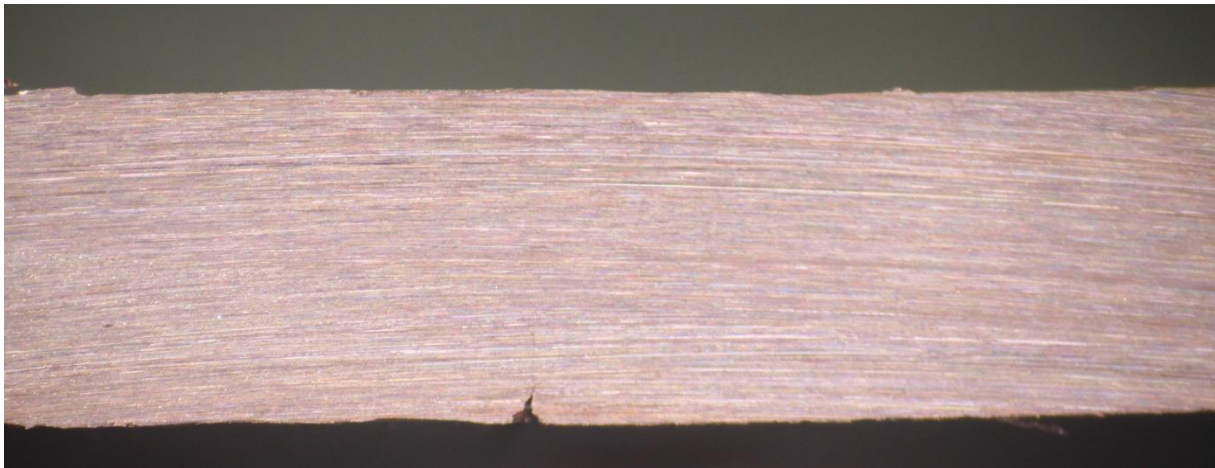
Nakon brušenja bakar nije podvrgnut nagrizanju nego su se poprečni presjeci fotografirali na svjetlosnom mikroskopu proizvođača BTC sa povećanjem 1,5. Fotografije makro presjeka zavara napravljene su sa digitalnim fotoaparatom Canon EOS 2000D. Dobiveni su sljedeći presjeci.



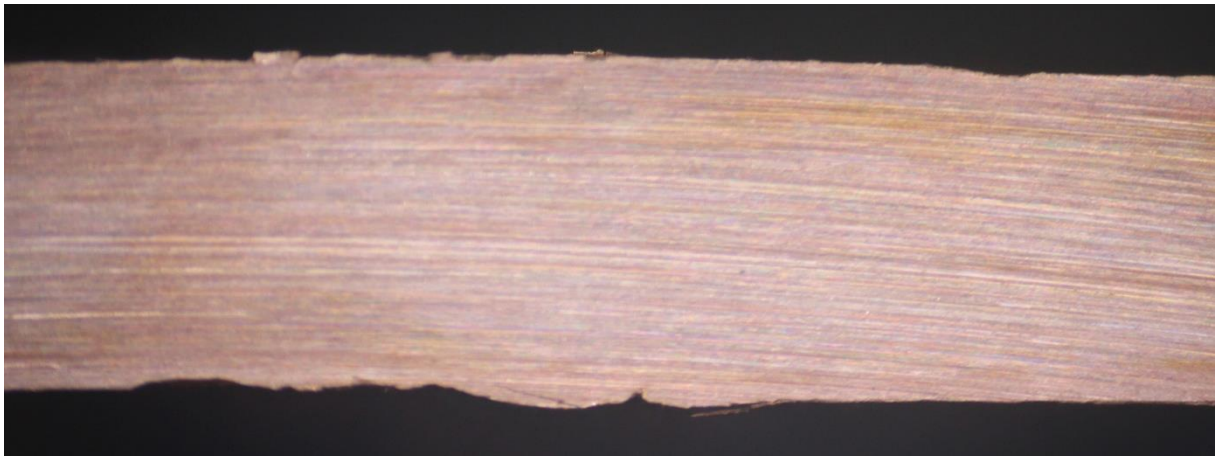
Slika 59. Makro presjek zavara broj jedan



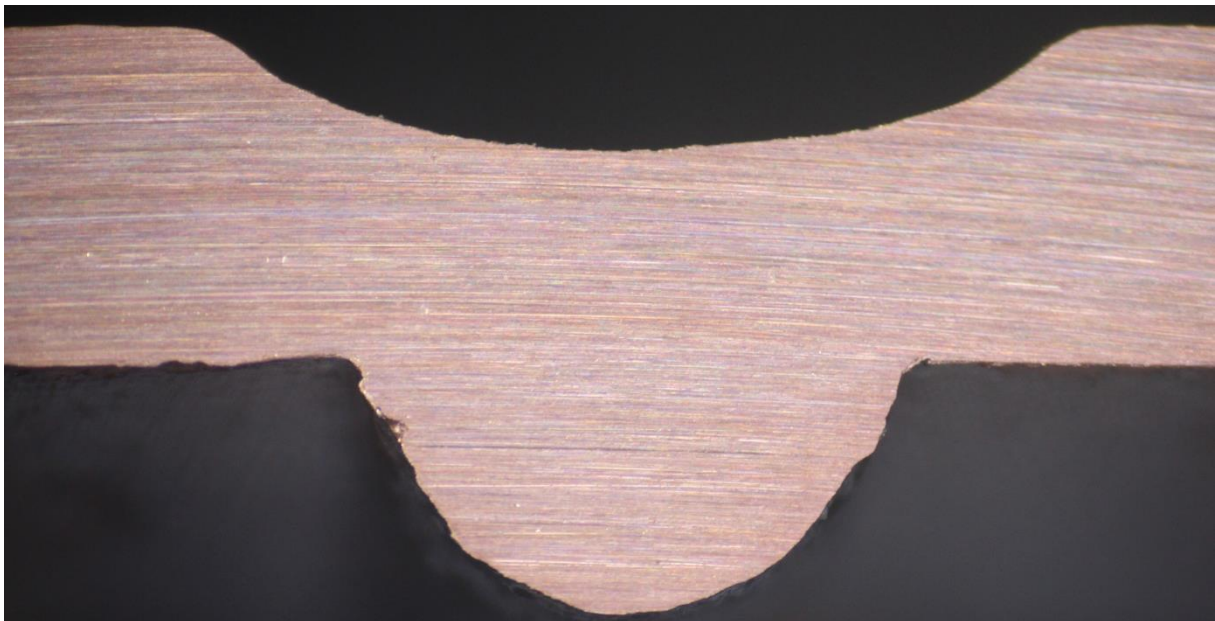
Slika 60. Makro presjek zavara broj dva



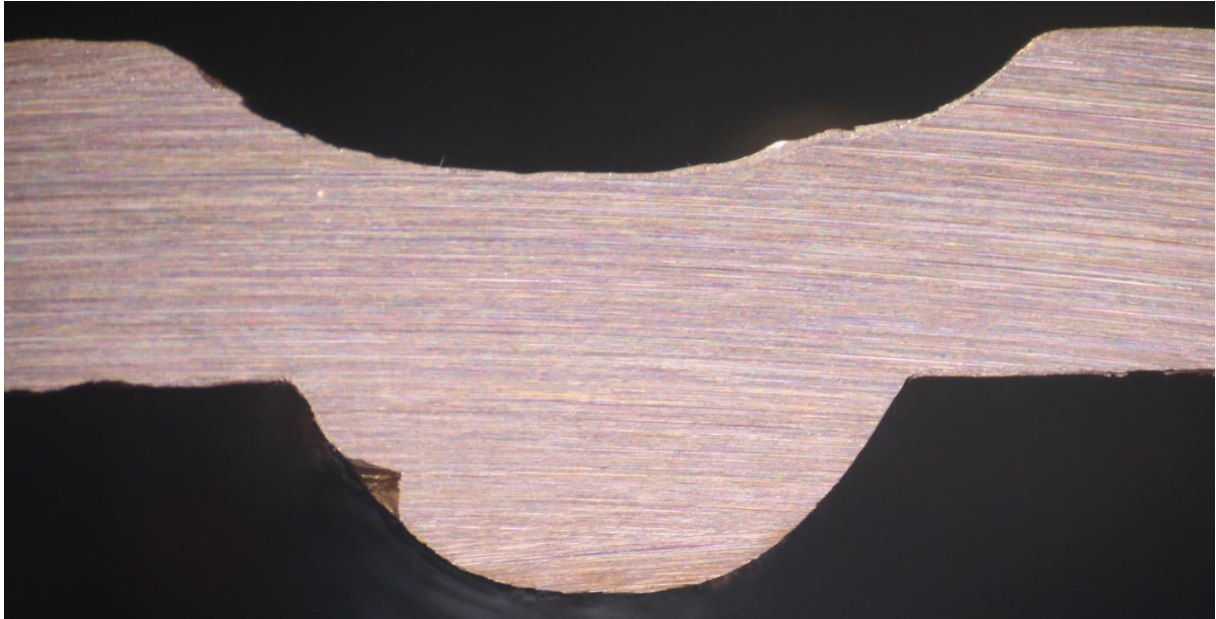
Slika 61. Makro presjek zavara broj tri



Slika 62. Makro presjek zavara broj četiri



Slika 63. Makro presjek zavara broj pet



Slika 64. Makro presjek zavara broj šest

Iz dobivenih fotografija teško se može odvojiti granica osnovnog materijala i područja metala zavara. Bakar je kemijski postojan u neutralnim i lužnatim vodenim otopinama pa samim time otežan proces nagrivanja bakra kako bi se dobili bolji rezultati makro presjeka.

9. Zaključak

Kvaliteta TIG postupka zavarivanja višestruko je veća naspram ostalim postupcima zavarivanja, no spor proces i iskustvo zavarivača smanjuje njegovo korištenje u praksi. Automatizacijom procesa postupak uklanjaju se upravo ova dva nedostatka.

Cilj rada bio je ispitati utjecaj parametara na izgled i kvalitetu dobivenog zavara. Sa svakim povećanjem jakosti struje i brzine zavarivanja vidjela se razlika u protaljivanju. Sa manjom strujom i većom brzinom, unos topline je puno manji po jedinici dužine. Tako kod uzorka broj tri i uzorka broj četiri zavar nije potpuno protaljen. Kod korištenja veće struje i brzine zavarivanja, unos topline po jedinici vremena je značajno veći. Kod primjera pet i šest gdje je korištenja najveća jakost struje 160 A, kod uzoraka dolazi do prokapljivanja. Sasvim mala promjena u dva parametra dovodi do sasvim drukčijih rezultata u izgledu presjeka zavara.

Rezultati testa savijanja zavara pokazali su da će se prijelom prije pokazati kod savijanja korijena zavara. Svi dobiveni prijelomi pojavljuju se na granici zone taljenja i ZUT-a gdje se zbog prokapljivanja smanjila debljina uzoraka.

Zbog dobre korozijske postojanosti, nagrizanje bakra je puno kompleksniji postupak i teško radi ovog razloga doći do vidljivih rezultata na makro presjecima.



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, **Mario Roš** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom **Automatizirano TIG zavarivanje legure bakra** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Mario Roš

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, **Mario Roš** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom **Automatizirano TIG zavarivanje legure bakra** čiji sam autor.

Student:
Mario Roš

Literatura

- [1] Filetin, T., Kovačiček, F., & Indof, J. (2002). Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [2] Davis, J. R. (Ed.). (2001). Copper and copper alloys. ASM international.1
- [3] CD Association. (2013). THE COPPER ADVANTAGE A Guide to Working With Copper and Copper Alloys. New York: Copper Development Association.
- [4] Collini, L. (Ed.). (2012). Copper Alloys: Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes. BoD–Books on Demand.
- [5] <https://docplayer.net/53959343-Bakar-cu-i-bakrove-legure.html> - nastavni materijali, FSB, 2012 (dostupno 13.8.2021.)
- [6] Francis, R. (2010). The corrosion of copper and its alloys: A practical guide for Engineers. NACE International.
- [7] Meigh, H. (2000). Cast and wrought aluminium bronzes: properties, processes and structure. CRC Press.
- [8] Gojić, M. (2008). Tehnike spajanja i razdvajanja materijala
- [9] TIG Handbook Miller
- [10] Horvat, M., Kondić, V., & Brezovački, D. (2014). Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. Tehnički glasnik, 8(4), 426-432.
- [11] Živčić, M., (1985). TIG zavarivanje za srednjestručni kadar. Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb
- [12] <https://www.millerwelds.com/accessories/guns-torches/weldcraft-tig-torches> (dostupno 24.8.2021.)
- [13] Samardžić, I., Bogovac, D., Jorgić, T., & Kovačić, K. (2015). Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija. Tehnički glasnik, 9(2), 202-208.
- [14] Samardzic, I. (2007). Automatic pipe butt welding processes in steam boilers production. In Meeting of" WELDING & MATERIALS Technical, Economic and Ecological Aspects", 2007, Dubrovnik & Cavtat, Hrvatska.

- [15] <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/technical-support/welding-engineering/welding-automation> (dostupno 14.8.2021)
- [16] <https://www.assemblymag.com/articles/84103-the-pros-and-cons-of-automated-welding> (dostupno 14.8.2021)
- [17] <https://www.scottautomation.com/news/articles/top-10-advantages-of-robotic-welding/> (dostupno 15.8.2021)
- [18] <https://arcboss.com/pros-and-cons-of-automated-welding/> (dostupno 16.8.2021)
- [19] <https://www.k-tig.com/2017-blog/22-welding-automation-technologies-to-improve-productivity> (dostupno 22.8.2021)
- [20] <https://www.promotech.eu/en/products/mini-spider-fillet-welding-tractor/> (dostupno 22.8.2021)
- [21] <https://www.semac.com.br/en/schnelldorfer-2/longitudinal-seam-welders/>
- [22] Orbital TIG welding handbook, Axxair
- [23] <https://www.orbitalft.com/ultimate-guide-to-orbital-welding/> (dostupno 27.8.2021)
- [24] <https://www.axxair.com/en/blog/orbital-welding-open-or-closed-weld-head-which-one-to-choose> (dostupno 27.8.2021)
- [25] <https://www.machinery.world/index.php/2017/04/20/8-practical-orbital-welding-tips/> (dostupno 30.8.2021)
- [26] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/multi-welding-systems/fmw-multi-welding-system/fmw-multi-welding-system> (dostupno 2.9.2021)
- [27] Chen, S. B. (2007). Robotic welding, intelligence and automation (Vol. 362). T. J. Tarn, & C. Zhou (Eds.). Berlin: Springer.
- [28] Hong, T. S., Ghobakhloo, M., & Khaksar, W. (2014). Robotic welding technology, *Comprehensive materials processing*, 6(February), 77-99.
- [29] Mandal, N. R. (2017). Welding parameters. In Ship construction and welding (pp. 159-174). Springer, Singapore.

- [30] https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig_1705-2005.pdf
(dostupno 2.9.2021)
- [31] <https://www.manualslib.com/manual/1659060/Abicor-Binzel-Abitig-Grip-Series.html?page=13#manual> (dostupno 2.9.2021)
- [32] https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.02.pdf (dostupno 2.9.2021)
- [33] Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests (ISO 5173:2009)
- [34] <https://copperalliance.org.uk/about-copper/conductivity-materials/electrolytic-tough-pitch-copper/> (dostupno 10.9.2021)
- [35] <https://material-properties.org/what-is-electrolytic-tough-pitch-copper-etp-characteristics-and-uses-definition/> (dostupno 10.9.2021)
- [36] Guidelines for Gas Tungsten Arc Welding; Miller Electric; 2013.
- [37] <https://www.westermans.com/blog/hot-wire-welding/> (dostupno 10.9.2021)
- [38] Tehnologija III – nastavni materijali, Samardžić I.
- [39] <https://new.abb.com/news/detail/10640/abb-robots-are-revving-up-vietnams-shift-to-e-mobility> (dostupno 10.9.2021)
- [40] <https://www.indiamart.com/proddetail/copper-wound-transformers-11414770097.html>
(dostupno 10.9.2021)

Popis slika

Slika 1. Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [1]	3
Slika 2. Podjela leguri bakra	5
Slika 3. Mikrostruktura α mjedi: CuZn30, hladnognječeno stanje [5].....	6
Slika 4. Mikrostruktura ($\alpha+\beta$) - mjedi (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [5].....	7
Slika 5. Korištenje bakra kod namotaja transformatora	8
Slika 6. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja 1 – netaljiva elektroda; 2 – sapnica gorionika; 3 – električni luk; 4 – rastaljeni materijal; 5 – osnovni materijal; 6 – dodatni materijal; 7 – visokofrekventni generator, 8 – izvor struje	10
Slika 7. Shematski prikaz standardne opreme za TIG postupak zavarivanja [10] 1 – zaštitni plin; 2 – izvor struje za zavarivanje; 3 – gorionik; 4 – dodatni materijal; 5 – osnovni materijal	11
Slika 8. Primjer gorionika Miller A-200 [12]	13
Slika 9. Prikaz električnog luka i penetracije kod helija i argona [9]	14
Slika 10. TIG Hot Wire	15
Slika 11. Položaji zavarivanja prema ASME, sekcija IX i HRN EN 287 [37]	16
Slika 12. Sučeoni I-spoj [37].....	16
Slika 13. Sučeoni V-spoj [37]	17
Slika 14. Sučeoni X-spoj [37]	17
Slika 15. Sučeoni U-spoj [37]	18
Slika 16. Sučeoni dvostruki U-spoj [37]	18
Slika 17. Primjeri kutnih spojeva [37]	18
Slika 18. Naliježući spoj [37].....	19
Slika 19. Prirubni spoj [37]	19
Slika 20. Raspodjela topline kod zavarivanja [29].....	20
Slika 21. Primjer niskog, optimalnog i velikog napona električnog luka [29].....	21
Slika 22. Prikaz rezultata poprečnih presjeka obzirom na tehniku zavarivanja [29]	24
Slika 23. Mini spider [20]	28
Slika 24. Zavarivanje uz pomoć automata [20].....	29
Slika 25. Prikaz Semac Elena One automata i primjera mogućih zavarivanja cijevi	30
Slika 26. Promotech GWS sustav zavarivanja [21]	31
Slika 27. Prikaz sustava s pokretnim postoljem [21]	32
Slika 28. Shematski prikaz orbitalnog zavarivanja cijevi [22].....	33

Slika 29. Axxair orbitalna glava zatvorenog oblika [24]	34
Slika 30. Orbitalna glava otvorenog oblika [24]	35
Slika 31. Fronius kombinirani sustav zavarivanja [26]	37
Slika 32. Prikaz zone industrijskih robota [28]	38
Slika 33. ABB robot IRB 1660ID u postupku zavarivanja [39]	39
Slika 34. Atest dobiven od strane proizvođača	40
Slika 35. Oprema za zavarivanje	40
Slika 36. Kontrolna ploča	42
Slika 37. Označeni sastav plinova u boci	43
Slika 38. Prikaz postavljanja elektrode u gorionik [31]	44
Slika 39. Volframove elektrode	45
Slika 40. Rail Bull automat [32]	46
Slika 41. Automatizirano vertikalno zavarivanje pomoću Rail Bull automata [32]	46
Slika 42. Prikaz kontrolne ploče Rail Bull automata	47
Slika 43. Pozicioniran uzorak ispod elektrode	48
Slika 44. Lice zavara prvog uzorka	49
Slika 45. Lice zavara drugog uzorka	49
Slika 46. Lice zavara trećeg uzorka	49
Slika 47. Lice uzorka četvrtog uzorka	50
Slika 48. Lice zavara petog uzorka	50
Slika 49. Lice zavara šestog uzorka	50
Slika 50. Skica izrezivanja uzorka	50
Slika 51. Shema savijanja prema normi EN ISO 5713 [33]	52
Slika 52. Epruvete prvog uzorka	53
Slika 53. Epruvete drugog uzorka	54
Slika 54. Epruvete trećeg uzorka	54
Slika 55. Epruvete četvrtog uzorka	55
Slika 56. Epruvete petog uzorka	55
Slika 57. Epruvete šestog uzorka	56
Slika 58. Presi Minitech 250 SP1	57
Slika 59. Makro presjek zavara broj jedan	58
Slika 60. Makro presjek zavara broj dva	58
Slika 61. Makro presjek zavara broj tri	59
Slika 62. Makro presjek zavara broj četiri	59

Slika 63. Makro presjek zavara broj pet.....	59
Slika 64. Makro presjek zavara broj šest.....	60

Popis tablica

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bakra [1]	2
Tablica 2. Svojstva ETP bakra [35]	4
Tablica 3. Podjela potrošnje bakra u SAD-u [2]	9
Tablica 4. Vrste struje i materijali za TIG zavarivanje [8].....	12
Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [10]23	
Tablica 6. Usporedba karakteristika zavarivanja pri korištenju različitih plinova [10]	25
Tablica 7. Karakteristike Mini Spider automata [20].....	29
Tablica 8. Prikaz dimenzija različitih vrsta GWS sustava [21].....	32
Tablica 9. Prijenosni izvor energije [23]	33
Tablica 10. Usporedba sustava hlađenja orbitalnog zavarivanja [24].....	35
Tablica 11. Karakteristike osnovnog materijala.....	40
Tablica 12. Tehnički podaci uređaja [30].....	41
Tablica 13. Tehnički podaci gorionika [31]	43
Tablica 14. Odabir parametara za svaki uzorak	48
Tablica 15. Dimenzije kod savijanja	52