

# TIG zavarivanje bakra i legura bakra

---

**Hrastinski, Martin**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:003601>

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

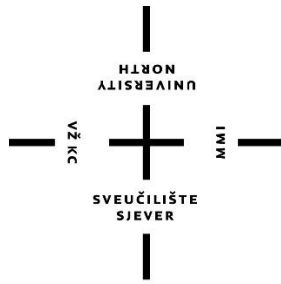
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 104/STR/2024**

## **TIG zavarivanje bakra i legura bakra**

**Martin Hrastinski, 0336026901**

Varaždin, listopad 2024. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 104/STR/2024

## TIG zavarivanje bakra i legura bakra

### Student

Martin Hrastinski, 0336026901

### Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, listopad 2024. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Martin Hrastinski

MATIČNI BROJ 0336026901

DATUM 04.03.2024.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA TIG zavarivanje bakra i legura bakra

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU TIG welding of copper and copper alloys

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc.dr.sc. Tomislav Vellki, predsjednik povjerenstva
- doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
- doc.dr.sc. Zlatko Botak, član povjerenstva
- doc.dr.sc. Boris Jalušić, zamjenski član povjerenstva
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 104/STR/2024

OPIS

U uvodnom dijelu diplomskog rada na osnovi 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 odabira dodatnog materijala. Posebno detaljno proučiti ručno i automatizirano TIG zavarivanje. Opisati odabir parametara zavarivanja i zaštitnih plinova. U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima legure bakra provesti TIG zavarivanje uz promjenu parametara postupka prema pripremljenom planu pokusa. Na zavarenim uzorcima potrebno je provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva i odrediti prihvatljivost geometrije zavarenog spoja. Provesti statičko vlačno ispitivanje na uzorcima pripremljenim iz izvedenih zavarenih spojeva. Na temelju rezultata donijeti zaključke o utjecaju pojedinih parametara na penetraciju pri zavarivanju i čvrstoću zavarenog spoja. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

18.03.2024.

POTPIŠ MENTORA

M. Bušić

SVUČILIŠTE  
SJEVER

—  
|  
NACIONALNO  
|  
—

Sveučilište  
Sjever

+

—  
|  
SVEUČILIŠTE  
SJEVER  
|  
—

#### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički 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, MARTIN HRASTINSKI (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom TIG ZAVARIVANJE BAKRA I LEGURA BAKRA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Hrastinski  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku III. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## **Predgovor**

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Matiji Bušiću, na savjetima i pomoći tijekom pisanja i izrade ovog diplomskog rada. Njegovo vodstvo i posvećenost bili su ključni za uspjeh ovog rada.

Također veliko hvala svim profesorima i djelatnicima sveučilišta koji su svojim znanjem, iskustvom i predanošću doprinijeli mom akademskom razvoju i obrazovanju. Omogućivši mi da steknem vrijedna znanja i vještine tijekom studiranja.

Veliko hvala prijateljima i kolegama koji su kroz zajedničke trenutke i izazove uljepšali moje studentske dane, pružajući podršku i pomoć u svladavanju brojnih studijskih obaveza.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji, koja je svojim razumijevanjem, strpljenjem i potporom bila moj najveći oslonac tijekom cijelog studija. Bez njihove podrške, ovaj korak u mom obrazovanju ne bi bio moguć.

## Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada jest zavarivanje bakrenih uzoraka TIG postupkom bez dodatnog materijala. Postupak zavarivanja bio je automatiziran kako bi se iznosi jakosti struje i brzine zavarivanja zadržali s ciljem postizanja jednolične kvalitete po čitavoj duljini zavara.

U prvom dijelu ovog rada obrađen je teorijski dio što se tiče bakra i njegovih legura. Opisana su kemijska i fizikalna svojstva bakra, prikazana je klasifikacija legura na bazi bakra te su navedene i opisane mjedi i bronce. Zatim su opisani prednosti i nedostaci prilikom zavarivanja pojedinih bakrenih legura. Time je počeo uvod u proces zavarivanja gdje je prikazana podjela zavarivanja sa detaljnijim opisom TIG postupka koji se koristio u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazan je proces TIG zavarivanja Cu-ETP bakrene legure. Opisan je materijal i kompletna oprema koja je korištena za zavarivanje prethodno pripremljenih uzoraka. Nakon zavarivanja vršila se vizualna kontrola zavara i uzorci su izrezani na odgovarajuće dimenzije kako bi se vršilo daljnje ispitivanje. Korišteno je ispitivanje savijanjem u tri točke i makro analiza grubozrnate mikrostrukture zavara.

Ključne riječi: bakar i legure bakra, TIG zavarivanje, vizualna kontrola, makro analiza



## Summary

The aim of this thesis is the welding of copper samples using the TIG process without additional filler material. The welding process was automated in order to maintain consistent current levels and welding speed, with the goal of achieving uniform quality along the entire weld length.

The first part of this thesis covers the theoretical aspects regarding copper and its alloys. The chemical and physical properties of copper are described, the classification of copper-based alloys is presented, and brass and bronze are listed and explained. Furthermore, the advantages and disadvantages of welding different copper alloys are discussed. This serves as an introduction to the welding process, where the different welding methods are categorized, with a more detailed explanation of the TIG process used in the experimental part of this thesis.

The experimental section describes the TIG welding process of Cu-ETP copper alloy. The material and the complete equipment used for welding the prepared samples are explained. After welding, a visual inspection of the welds was performed, and the samples were cut to appropriate dimensions for further testing. The tests included three-point bend testing and macro analysis of the weld cross-sections.

Key words: copper and copper alloys, TIG welding, visual inspection, macro analysis

## Popis korištenih kratica

<b>Kratica</b>	<b>Opis</b>
<b>AC</b>	<b>Alternating Current</b> Izmjenična struja
<b>A-TIG</b>	<b>Activated Tungsten Inert Gas</b> Aktivno zavarivanje volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
<b>CAD</b>	<b>Computer Aided Design</b> Dizajniranje s pomoću računala
<b>CAM</b>	<b>Computer Aided Manufacturing</b> Proizvodnja s pomoću računala
<b>DC</b>	<b>Direct Current</b> Istosmjerna struja
<b>DCEN</b>	<b>Direct Current Electrode Negative</b> Elektroda spojena na negativan pol istosmjerne struje
<b>DCEP</b>	<b>Direct Current Electrode Positive</b> Elektroda spojena na pozitivan pol istosmjerne struje
<b>DIN</b>	<b>Deutsches Institut für Normung</b> Njemački institut za norme
<b>FCC</b>	<b>Face - Centred Cubic</b> Plošno centrirana kubična rešetka
<b>GTAW</b>	<b>Gas Tungsten Arc Welding</b> Lučno zavarivanje volframovom elektrodom uz zaštitnoj atmosferi inertnog plina
<b>HCP</b>	<b>Hexagonal closest packed</b> Heksagonalna rešetka
<b>HRN</b>	<b>Hrvatska Norma</b>
<b>ISO</b>	<b>International Organization for Standardization</b> Međunarodna organizacija za standardizaciju
<b>MAG</b>	<b>Metal Active Gas</b> Zavarivanje kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina

**MIG**

**Metal Inert Gas**

Zavarivanje kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina

**REL**

**Ručno elektrolučno zavarivanje**

**TIG**

**Tungsten Inert Gas**

Zavarivanje volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina

**ZT**

**Zona taljenja**

**ZUT**

**Zona utjecaja topline**

**WIG**

**Wolfram Inert Gas**

Zavarivanje volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	%	Istezljivost
<i>HB</i>	-	Tvrdoća prema Brinellu
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>I<sub>d</sub></i>	A	Osnovna struja
<i>I<sub>z</sub></i>	A	Impulsna struja
<i>P</i>	W	Snaga
<i>R<sub>m</sub></i>	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>R<sub>p0,2</sub></i>	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>t<sub>d</sub></i>	A	Trajanje osnovne struje
<i>t<sub>z</sub></i>	A	Trajanje impulsne struje
<i>U</i>	V	Napon
<i>v</i>	cm/mm	Brzina zavarivanja
<i>Q</i>	kJ/mm	Unesena toplinska energija

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Bakar i legure bakra.....	2
2.1. Nelegirani bakar .....	4
2.2. Niskolegirani bakar .....	6
2.3. Klasifikacija legura na bazi bakra.....	6
2.4. Legure bakra s cinkom.....	8
2.4.1. Hladno gnječene $\alpha$ -mjedi .....	10
2.4.2. Toplo gnječene ( $\alpha+\beta$ ) – mjedi .....	11
2.4.3. Posebne mjedi.....	11
2.4.4. Lijewane mjedi.....	12
2.4.5. Legure bakra s cinkom i niklom.....	14
2.5. Legure bakra bez cinka .....	16
2.5.1. Kositrena bronca .....	17
2.5.2. Aluminijska bronca .....	21
2.5.3. Olovna i olovnokositrena bronca .....	25
2.5.4. Manganska i silicijska bronca.....	27
2.5.5. Legure bakra s niklom.....	27
3. Zavarljivost bakra i legura bakra.....	30
4. Zavarivanje.....	33
4.1. Izvori energije za zavarivanje .....	35
4.2. Vrste zavarenih spojeva.....	37
5. Postupak TIG zavarivanja.....	42
5.1. Princip rada TIG zavarivanja.....	45
5.2. Oprema za TIG zavarivanje.....	48
5.2.1. Izvori električne energije.....	49
5.2.2. Pištolj za ručno TIG zavarivanje.....	50
5.2.3. Netaljive elektrode .....	52
5.3. Glavni parametri kod TIG zavarivanja .....	54
5.3.1. Vrsta i jakost struje zavarivanja .....	54
5.3.2. Brzina zavarivanja .....	55
5.3.3. Protok i vrsta zaštitnog plina.....	55
6. Eksperimentalni dio.....	58
6.1. Osnovni materijal.....	58
6.2. Oprema za zavarivanje .....	59
6.2.1. Izvor struje.....	59
6.2.2. Zaštitni plin.....	60

6.2.3.	<i>Oprema za automatizaciju postupka zavarivanja.....</i>	<i>61</i>
6.2.4.	<i>Pištalj za TIG zavarivanje.....</i>	<i>61</i>
6.2.5.	<i>Uređaj za mjerenje temperature.....</i>	<i>63</i>
6.3.	<b>Postupak zavarivanja .....</b>	<b>64</b>
6.3.1.	<i>Paramteri za zavarivanje .....</i>	<i>64</i>
6.3.2.	<i>Vizualna kontrola zavara .....</i>	<i>65</i>
6.3.3.	<i>Priprema uzoraka za savijanje i makro analizu.....</i>	<i>69</i>
6.3.4.	<i>Savijanje uzoraka u tri točke prema BS EN ISO 5173:2009.....</i>	<i>70</i>
6.3.5.	<i>Makro analiza zavarenog spoja.....</i>	<i>72</i>
7.	<b>Zaključak .....</b>	<b>77</b>
8.	<b>Literatura .....</b>	<b>78</b>
	<b>Popis slika .....</b>	<b>80</b>
	<b>Popis tablica .....</b>	<b>82</b>



# 1. Uvod

TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) zavarivanje jedan je od najpreciznijih i najraširenijih postupaka zavarivanja i često se koristi za spajanje različitih metala. Karakterizira ga volframova elektroda kojom se stvara električni luk između elektrode i metala. Kao zaštita od utjecaja atmosfere koristi se inertni plin (argon, helij i njihove mješavine). Ovim se postupkom dobivaju čisti i visokokvalitetni zavari, što prilikom zavarivanja bakra i njegovih legura može biti ključno.

Bakar je metal poznat po velikoj toplinskoj i električnoj provodljivosti. Upravo zbog ovih svojstava bakar se koristi u elektrotehnici, strojarstvu, građevinarstvu, prehrambenoj industriji itd. S druge strane, njegova mu izuzetna svojstva otežavaju proces zavarivanja. Zbog visoke toplinske provodljivosti potrebna je precizna kontrola topline kako bi se izbjeglo pregrijavanje i deformacija materijala. Pošto je bakar sklon oksidaciji, potrebno je obratiti pozornost na zaštitu od atmosferskih utjecaja tijekom zavarivanja.

Prilikom zavarivanja legura bakra (bronce i mjedi) isto se nailazi na prepreke prilikom zavarivanja pošto svaka legura ima svoja specifična svojstva. Između legura bakra i čistog bakra javlja se odstupanje u temperaturi tališta i sklonosti oksidaciji čime se proces zavarivanja dodatno komplicira. TIG postupak nudi mogućnost zavarivanja bakra i legura bakra uz preciznu kontrolu parametara zavarivanja, kao što su vrsta i jakost struje, brzina zavarivanja, protok i vrsta zaštitnog plina, dodatni materijal itd.

U ovom će se radu detaljno obraditi problematika TIG zavarivanja bakra i njegovih legura. Razrađena je podjela i primjena bakra i njegovih legura te zavarljivost svake pojedine legure. Opisan je postupak TIG zavarivanja s pripadajućom opremom, parametrima i greškama koje mogu nastati prilikom zavarivanja.



## 2. Bakar i legure bakra

Bakar se koristi još od davnih vremena, tačnije brončanog doba. Danas se čisti bakar uglavnom koristi u elektrotehnici, dok se u strojarstvu i brodogradnji pretežito koriste legure bakra kao konstrukcijski materijali. U prirodi se najčešće nalazi u obliku spojeva (ruda) [1]:

- halkopirit,  $\text{CuFeS}_2$ ;
- halkozin,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ;
- kuprit,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;
- malahit,  $\text{CuCO}_3$ ;
- kovelin,  $\text{CuS}$ .

Ovaj metal karakterizira crvena boja s izraženim metalnim sjajem (slika 2.1.), uz gustoću od  $8930 \text{ kg/m}^3$ , talište od  $1084 \text{ }^\circ\text{C}$ , te vrelište iznosa  $2310 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ovaj metal se vrlo dobro oblikuje u hladnom i toplom stanju, međutim teško se lijeva. Bakar je drugi najbolji vodič električne struje i topline, prvi je srebro, te se najviše primjenjuje u elektrotehnici. U prisustvu vlažnog zraka, veće su mogućnosti od pojave korozije, pa se prevlači tankim slojem bazičnog karbonata koji će ga štiti od daljnje korozije [1].



*Slika 2.1. Bakrena pločica [2]*

Poznavanje svojstava bakra i njegovih legura vrlo je bitno kako bi se odredilo njihovo područje primjene [3]:

- Izvrsna električna vodljivost (po volumnoj je osnovi jedino bolje srebro, dok je aluminij bolji po masenoj),
- Visoka toplinska vodljivost koja ima značajan utjecaj na zavarivanje,
- Legiranjem se poboljšavaju svojstva bakra (čvrstoća; otpornost na puzanje, umor, koroziju i livljivost),

- Prilikom legiranja se ne smanjuje električna i toplinska vodljivost,
- Bakrene legure u žarenom stanju posjeduju izvrsnu duktilnost (proizvodnja cijevi, duboko vučenje, kovanje itd.),
- Otpornost na koroziju u morskim uvjetima uslijed stvaranje „patine“,
- Otpornost na koroziju u uvjetima djelovanja atmosfere,
- Nisu magnetični,
- Nemaju alotropskih modifikacija.

Bakar i njegove legure imaju dosta prednosti koje ga čine vrlo važnim materijalom u industriji, međutim važno je napomenuti i nedostatke [3]:

- Visoka cijena,
- Visoko talište,
- Nije pogodan za korištenje u prehrambenoj industriji, posebice gdje postoji mogućnost od dodira s hranom jer se stvara otrovna zelena prevlaka (bakrov acetat).

Izvrсна duktilnost bakra proizlazi iz njegove FCC (plošno centrirana kubična) kristalne rešetke, što znači da su metali s HCP kristalnom rešetkom manje duktilni [4].

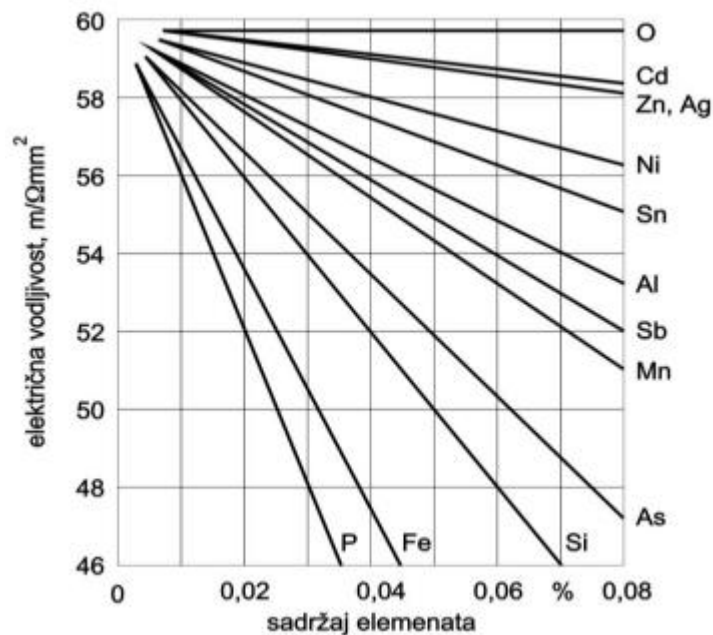
Kako bi se spoznalo u kojim uvjetima rada bakar može djelovati, u tablici 2.1. prikazana su njegova mehanička i fizikalna svojstva.

*Tablica 2.1. Mehanička i fizikalna svojstva bakra [1]*

Svojstvo	Iznos	Mjerna jedinica
Gustoća	8930	kg/m <sup>3</sup>
Talište	1084	°C
Modul elastičnosti	125	GPa
Toplinska rastezljivost	17	10 <sup>-6</sup> /K
Električna vodljivost	35 – 58	m/Ωmm <sup>2</sup>
Toplinska vodljivost	240 – 386	W/mK
Vlačna čvrstoća	200 – 360	MPa
Istezljivost	2 – 45	%

## 2.1. Nelegirani bakar

Električna vodljivost je najvažnije svojstvo bakra. Poslije srebra, bakar ima najbolju električnu vodljivost koja uveliko ovisi o čistoći, a posebno o topljivosti primjesa u istom. Fosfor je element koji ima značajno nepovoljan utjecaj na samu električnu vodljivost, dok kadmij ima osjetno manju (slika 2.2.). Kadmij se dodaje u količini do 1 % kako bi se povećala sama čvrstoća materijala, dok se fosfor dodaje u nešto manjim količinama i služi kao dezoksidans [3].



Slika 2.2. Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [3]

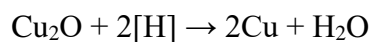
Još jedno vrlo važno svojstvo koje posjeduje bakar jest toplinska vodljivost, koja se kao i električna vodljivost temelji na pokretljivosti slobodnih metalnih stanja. Kod izmjenjivača topline nije potreban bakar najviše čvrstoće. Toplinska se vodljivost bakra ne može iskoristiti u potpunosti zbog prijelaza topline preko graničnih površina, gdje se javljaju naslage oksida i slojevi drugog porijekla. Tablica 2.2. prikazuje električnu i toplinsku vodljivost bakra [3].

Tablica 2.2. Električna i toplinska vodljivost bakra (izvod iz DIN-a 1708) [3]

Oznaka bakra		Kemijski sastav u mas. %	Električna vodljivost m/Ωmm <sup>2</sup>	Toplinska vodljivost W/mK	Smjernice za primjenu
DIN	Stara HRN				
KE-Cu	EK2-Cu	Cu ≥ 99,90	-	-	Katodni bakar za pretaljivanje radi prerade u poluproizvode bakra i proizvodnju legura.
E1-Cu58	ET1-Cu	Cu ≥ 99,90 O=0,005... 0,040	min. 58	386	Elektrolitički pročišćeni bakar visoke električne vodljivosti.
E-Cu57	(ET1-Cu)	Cu ≥ 99,90 O=0,005... 0,040	min. 57	386	
OF-Cu	EB2-Cu	Cu ≥ 99,95	min. 58	386	Bakar visoke električne vodljivosti, bez elemenata koji isparavaju u vakuumu. Zadovoljavajuća otpornost na djelovanje vodika.
SF-Cu	DVP1-Cu	Cu ≥ 99,90 P=0,015... 0,040	35...53	240...360	Dezoksidirani bakar s ograničenim udjelom fosfora. Za uporabu gdje se ne traži visoka električna vodljivost; vrlo dobro zavarljiv i lemljiv, otporan na djelovanje vodika.

Otopljene primjese uveliko utječu na čvrstoću nelegiranog bakra. Što je bakar čišći, time je čvrstoća manja, zbog čega se naglo smanjuje čvrstoća uslijed bilo kakvog većeg povišenja temperature. Ako je područje primjene bakra u uvjetima dinamičkih opterećenja, preporučuje se odabrati vrstu bakra koja ne sadrži kisik [3].

Unatoč tome što bakar posjeduje dobru toplinsku vodljivost, koje je iznimno važno svojstvo, ono mu otežava proces zavarivanja. Da bi se bakar zavarivao plinom, preporučuju se kvalitete bez kisika. Ako se koristi bakar koji sadrži kisik, uslijed djelovanja vodika iz plina za zavarivanje, postoji mogućnost od pojave „vodikove bolesti“. Vodik se u atomarnom stanju otapa u bakru, te ako naiđu atomi vodika u mikrostrukturi na čestice oksida, nastaje kemijska reakcija a samim time i para:



Pošto bakar ima malu čvrstoću, uslijed visokog tlaka vodene pare nastaju vidljive pore i odvajanja po primarnim granicama zrna po kojima je raspoređen u Cu-Cu<sub>2</sub>O eutektik. Upravo zbog tih odvajanja, bakru se snizuje čvrstoća i udarni rad loma, povećava mu se krhkost i time postaje neupotrebljiv. Jednom kada je „vodikova bolest“ nastala, ona se više ne može otkloniti, dok se zahvaćeni dijelovi bacaju [3].

Kako je bakar kemijski postojan u lužnatim i neutralnim vodenim otopinama, kiseline ga nagriza i to posebice oksidirajuće. Iz tog razloga, ne može se upotrijebiti za izradu posuda za vrenje u pivovarstvu i vodovodnih cijevi [3].

## **2.2. Niskolegirani bakar**

Dodavanjem malih količina pravilno odabranih legiranih elemenata, povećava se čvrstoća bakra, a da se pri tome zadrži zadovoljavajuća električna vodljivost. Jedni elementi omogućavaju precipitacijsko očvršćujuće (fosfor, željezo, kadmij, krom, cirkonij), dok se drugi otapaju u kristalu mješancu bakra (srebro i arsen). Pošto otopljeni elementi u kristalu mješancu osjetno smanjuju električnu vodljivost bakra, optimalne vrijednosti električne vodljivosti i čvrstoće mogu se postići precipitacijskim žarenjem. Ova vrsta bakra se koristi u strojarstvu i elektrotehnici. Zbog svojih mehaničkih i triboloških svojstava, bakar legiran berilijem je najvažnija bakrena legura za strojarstvo. Njegova iznimna svojstva postižu se toplinskim očvršćivanjem i spada pod bakrene legure bez cinka (berilijska bronca).

Uz čvrstoću i električnu vodljivost, niskolegirani bakar posjeduje i dobru otpornost na popuštanje [2].

## **2.3. Klasifikacija legura na bazi bakra**

Klasifikacija legura na bazi bakra (bakrovih legura) uglavnom se temelji na udjelu glavnih legiranih elemenata u pojedinoj leguri, međutim na njihova svojstva značajno utječu ostali legirani elementi. U tom slučaju, dvije legure s istim glavnim legiranim elementom mogu imati različita svojstva ako sadrže različite omjere ostalim elementima.

Glavne vrste legura na bazi bakra tradicionalno se dijele na mjedi i bronce. Mjedi su legure bakra kojima je glavni legirani element cink, a kod bronce je kositar. Obje vrste mogu sadržavati još nekoliko elemenata, međutim naziv se definira na temelju legure koja ima najviši udio [1,2].

Stoga, legure se dijele na [1]:

1. Legure bakra s cinkom:

- a) legure bakra samo s cinkom ( $> 50\%$  Cu i  $< 44\%$  Zn) – mjedi;
- b) posebne mjedi ( $54\%$  -  $62\%$  Cu, oko  $7\%$  drugih elemenata, ostatak Zn);
- c) legure bakra s niklom i cinkom ( $10\%$  do  $30\%$  Ni) – novo srebro.

2. Legure bakra bez cinka:

- a) bakrove legure s kositrom ( $< 15\%$  Sn) – prave bronce;
- b) bakrove legure s aluminijem ( $< 14\%$  Al) – aluminijeve bronce;
- c) bakrove legure s kositrom i/ili olovom ( $< 10\%$  Sn i/ili  $< 25\%$  Pb) – olovno kositrene i olovne bronce;
- d) bakrove legure s berilijem ( $< 2\%$  Be) – berilijeve bronce;
- e) bakrove legure s manganom te silicijem i manganom – manganove i silicijeve bronce;
- f) legure s niklom ( $< 45\%$  Ni).

U tablici 2.3. prikazane su najznačajnije legure bakra.

*Tablica 2.3. Najznačajnije legure bakra [5]*

Legure	Naziv	Oznaka
Cu – Zn	mjedi	CuZn37 CuZn38Pb CuZn36Pb1
	posebne mjedi	CuZn20Al CuZn28Sn CuZn40Al1
Cu – Sn	kositrena bronca	CuSn6 CuSn6Zn
Cu – Ni – Zn	novo srebro	CuNi10Zn45Pb CuNi25Zn15
Cu – Ni		CuNi5 CuNi30Fe
Cu – Al	aluminijeva bronca	CuAl8 CuAl8Fe

## 2.4. Legure bakra s cinkom

Mjedi čine legure kojima je glavni legirni element cink, vrlo su rasprostranjene te imaju široko područje primjene. Legurama bakra s cinkom mogu se dodati i drugi elementi, isto tako se mogu prerađivati u toplom i hladnom stanju. Mjedi koje se prerađuju deformiranjem u hladnom stanju su  $\alpha$  – mjedi, dok se ( $\alpha + \beta$ ) mjedi oblikuju deformiranjem u toplom stanju.

Sama primjena mjedi definira se na temelju sljedećih svojstava [1]:

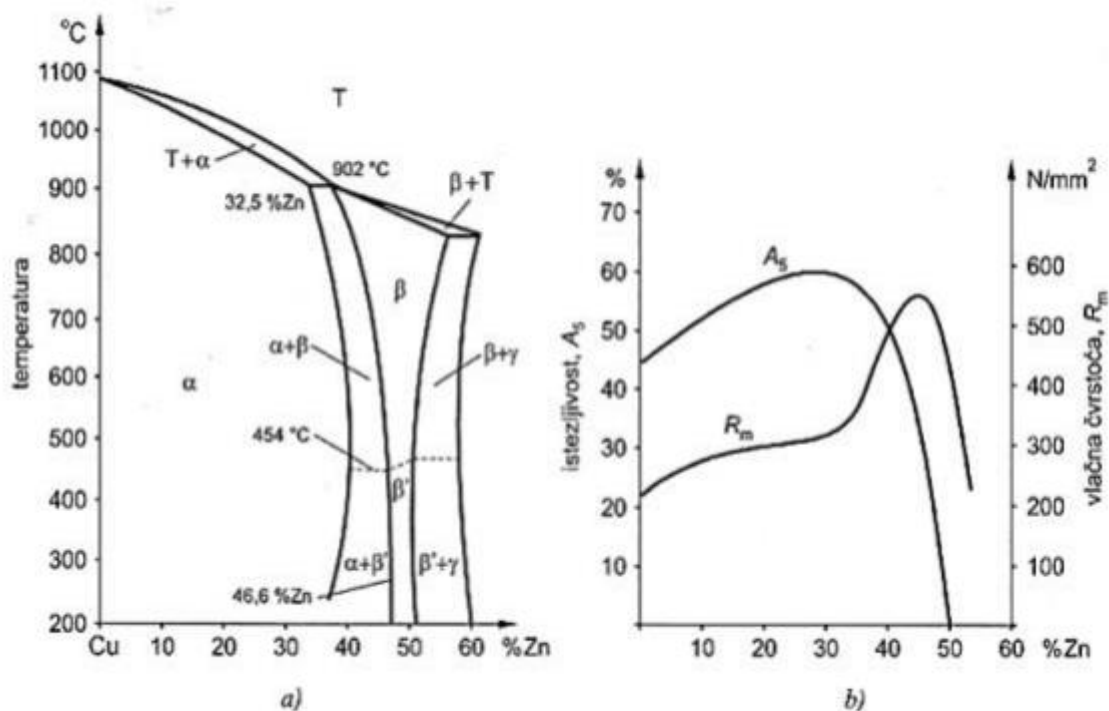
- dobra toplinska i električna vodljivost,
- dobra mehanička svojstva,
- moguće ih je prerađivati u toplom i hladnom stanju,
- korozijska postojanost.

Tablica 2.4 prikazuje sastav pojedine vrste mjedi s njihovom primjenom.

*Tablica 2.4. Sastav i primjena najvažnijih vrsta mesinga [6]*

Naziv	Oznaka	Legure bakra s	Primjena
Crvena mjed	CuZn10	9...11 % Zn	Elektrotehnika, ukrasni predmeti
Svjetlocrvena mjed	CuZn20	19...22 % Zn	Elektrotehnika, ukrasni predmeti, metalna crijeva
Žuta mjed	CuZn30	31...28 % Zn	Kondenzatorske i druge cijevi za izmjenjivače topline
Mjed za obradu gnječenjem	CuZn37	35...28 % Zn	Osnovna legura za deformaciju u hladnom stanju: cijevi, limovi, opruge
Mjed za kovanje	CuZn40	38...41 % Zn	Za deformaciju u toplom i hladnom stanju: žice, zakovice
Tvrda mjed	CuZn40Pb2	40...44 % Zn + 2 % Pb	Osnovna legura za obradu odvajanjem čestica: mjed za graviranje, za zupčanike satova, vijci

Ako se usporede dijagram ravnotežnog stanja Cu – Zn i dijagram gdje je prikazana ovisnost vlačne čvrstoće i istežljivosti o udjelu cinka (slika 2.3.), može se pratiti veza između mikrostrukture i mehaničkih svojstava mjedi.



Slika 2.3 Dijagramski prikaz stanja Cu – Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b) [6]

Pri temperaturi od 902 °C (peritektička temperatura), bakar otapa do 32,5 % Zn. Prilikom snižavanja temperature topljivost raste, pa tako na temperaturi od 454 °C bakar ima udio cinka u iznosu 39 %. Vrlo sporim hlađenjem postiže se ravnoteža, pa je tako pri 250 ° iznos topljivosti cinka 35,2 %. Uslijed vrlo spore difuzije cinka, na sobnoj temperaturi topljivost cinka iznosi 37 % u kristalima mješancima bakra uz industrijske brzine ohlađivanja. Navedena čvrsta otopina ima oznaku  $\alpha$ .

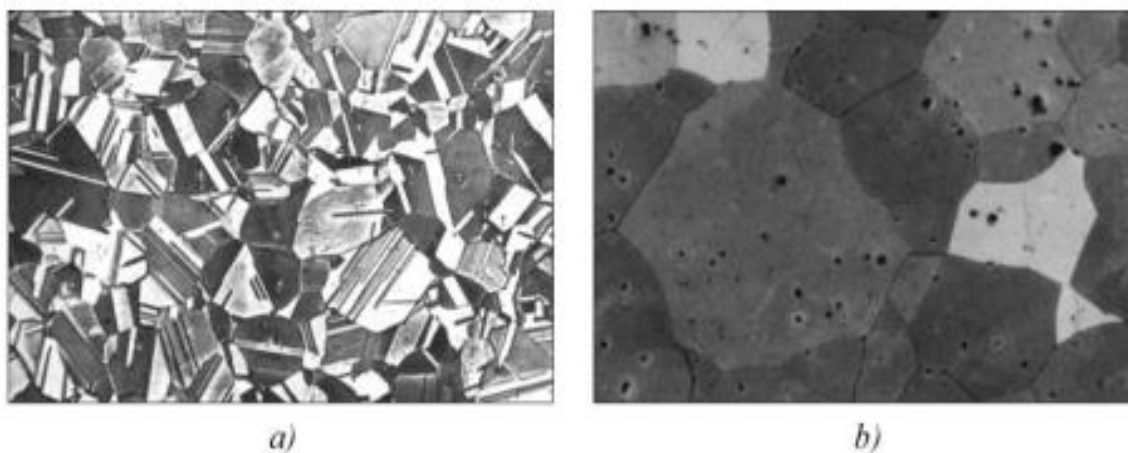
Ako se udio cinka u leguri povisi iznad 37 % u mikrostrukтури se pojavljuje intermetalna faza  $\beta'$  (sređena struktura), koja je vrlo tvrda i žilava pri sobnoj temperaturi. Ova faza prelazi u  $\beta$  oblik (nesređena struktura) prilikom zagrijavanja iznad 454 °C, pa se kao takva može prerađivati deformiranjem.

Između 45 i 50 % Zn mikrostruktura se sastoji samo od faze  $\beta'$  i ta je legure monofazna. Ako je u leguri udio cinka preko 50 %, javlja se  $\gamma$ - faza koja je vrlo krhka i nije povoljna za primjenu u području inženjerstva. Iz toga razloga, tehničke legure ne sadrže više od 44 % Zn [1,2].



### 2.4.1. Hladno gnječene $\alpha$ -mjedi

To su mjedi koje imaju mikrostrukturu jednofazne homogene legure (slika 2.4. (a)). Zbog svoje vrlo dobre duktilnosti koja ima maksimalan iznos kod 30 % Zn često se primjenjuju. Da bi se postigao maksimalan iznos duktilnosti, mjed mora biti visoke čistoće jer bilo kakva prisutnost uključaka može znatno sniziti željenu duktilnost. Pošto su za ovu leguru potrebni bakar i cink visoke čistoće, sama cijena proizvodnje može biti poprilično skupa. Prilikom žarenja  $\alpha$  - mjedi potrebno je obratiti pozornost na temperaturu jer postoji opasnost od naglog porasta zrna. Pošto je ova legura osjetljiva na temperaturna žarenja, vrlo se lako može „spaliti“. Žarenje se provodi na temperaturama do 600 °C. Pregrijavanjem legure javlja se brz porast zrna koje se prilikom sljedećeg procesa prešanja pojavljuje na površini materijala. Ovaj efekt se naziva „narančina kora“ gdje zrno toliko poraste da ga je moguće vidjeti bez optičkih pomagala [2].



Slika 2.4. Mikrostruktura  $\alpha$  - mjedi: a) CuZn30, hladnognječeno stanje,  
b) CuZn20Pb, lijevano i žareno stanje [2]

Ove vrste mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju. Na granicama se zrna prilikom oblikovanja nakupljaju dislokacije zbog čega se na tim mjestima javljaju stanja s višom energijom. Zbog prisutnosti vlage i amonijaka javlja se korozija te time slabe veze po granicama zrna. Ovime se javljaju napukline koje se mogu ukloniti žarenjem za redukciju napetosti na temperaturi od oko 250 °C nakon prerade [2].

### 2.4.2. Toplo gnječene ( $\alpha+\beta$ ) – mjedi

Ove se mjedi gotovo potpuno oblikovljive toplom preradom i sadrže više od 37 % Zn i do 60 % Cu. U pravilu se oblikuju u toplom stanju tijekom početnih faza prerade, dok se hladno oblikovanje primjenjuje za dobivanje korektnog stupnja očvrnuća i završnih dimenzija. Topla prerada izvodi se u  $\beta$  - mikrostrukturnom području. Pošto je u  $\beta$  - fazi potpuno apsorbirana  $\alpha$  - faza, temperaturno područje koje je idealno za toplu preradu je između 650 °C do 750 °C. Na ovom temperaturnom intervalu dolazi do precipitacije  $\alpha$  - faze prilikom hlađenja u obliku sitnih čestica, čemu doprinosi mehanička prerada.

Dodavanjem olova u iznosu od 1 % do 3 % poboljšava se obradljivost odvajanjem čestica kod postupaka glodanja, tokarenja, bušenja i blanjanja. Olovo je netopljivo u mjedi i uzrokuje lokalni lom za vrijeme rezanja pošto je raspoređeno u obliku malih kuglica [2].

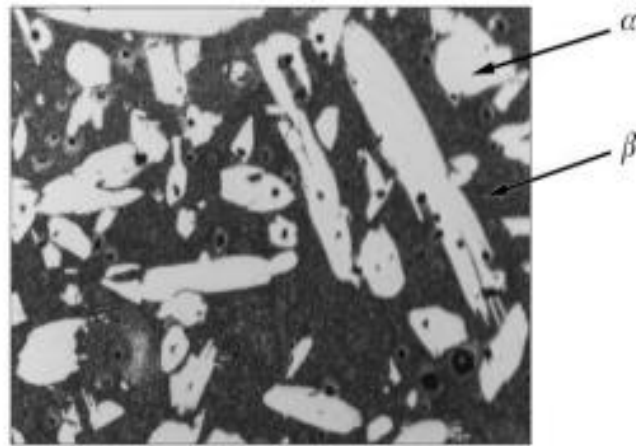
### 2.4.3. Posebne mjedi

Kao što je već spomenuto, ove mjedi čini 54 % do 62 % Cu, do 7 % drugih elemenata i ostatak je cink. Posebne mjedi su toplo oblikovljive, međutim mogu se primjenjivati i u lijevanom stanju. U lijevanom ili kovanom stanju iznos vlačne čvrstoće je viši od 700 MPa. Korozijska postojanost legure može se povećati dodavanjem do 2 % nikla, željeza, aluminijskog, mangana i silicija pojedinačno i do 1 % kositra. Kako pojedini legirni element utječe na leguru, prikazano je u nastavku [1,2]:

- Nikal (Ni) – povećava otpornost na koroziju, čvrstoću i usitnjuje zrno;
- Željezo (Fe) – usitnjuje zrno i time povećava čvrstoću;
- Aluminij (Al) – povećava čvrstoću i pritom istezljivost ostaje nepromjenjena, na površini stvara oksidni sloj koji štiti mjed od oksidacije i na povišenim temperaturama (iznad 2 % Al);
- Mangan (Mn) – znatno povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi, solima i kiselinama, vodenoj pari, nema utjecaja na udarni rad loma sve do 4 % Mn;
- Silicij (Si) – smanjuje zaostala naprezanja i stvaranjem topive troske povećava udarni rad loma prilikom zavarivanja;
- Kositar (Sn) – povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi, međutim zbog smanjenja istezljivosti ograničava se na 1 %.

#### 2.4.4. Lijeване mjedi

U pravilu imaju od 36 % do 43 % Zn i 1 % do 3 % Pb, međutim posebne mjedi još sadrže i aluminij, željezo, nikal, kositar i mangan. Kod ovih mjedi ne dolazi do segregacija u zrnju zbog toga što posjeduju uski interval skrućivanja. Zbog heterogene ( $\alpha + \beta$ ) mikrostrukture, koja je prikazana na slici 2.5., nisu pogodne za oblikovanje u hladnom stanju. Međutim, zbog povišene čvrstoće primjenjuju se u lijevanom stanju [2].



Slika 2.5. Mikrostruktura ( $\alpha + \beta$ ) mjedi (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [2]

U tablici 2.5. prikazani su neki primjeri lijevanih i posebno lijevanih mjedi s pripadajućim oznakama, mehaničkim svojstvima, kemijskim sastavom i smjericama za primjenu.

Tablica 2.5. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s cinkom i olovom i višekomponentnih legura bakra s cinkom – izvod iz DIN 1709 [2]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	
G-CuZn33Pb	P.CuZn33Pb2.01	Cu 63,0...67,0 Pb 1,0...3,0 Zn ostatak	70	180	25	Legura za konstrukcije, otporna na koroziju, postojana u pitkoj vodi do 90 °C, za kućišta i armature za plin i vodu, dijelove konstrukcija i okova u strojogradnji, elektroindustriji, preciznoj mehanici, optici i sl.
GK-CuZn37Pb	K.CuZn40Pb.01	Cu 59,0...63,0 Al 0,2...0,8 Pb 0,5...2,5 Zn ostatak	90	280	20	Legura pogodna za okov i dijelove svih vrsta konstrukcija; armature, u tlačno lijevanom stanju za elemente u strojogradnji, elektroindustriji, preciznoj mehanici, optici i sl.
G-CuZn25Al5	P.CuZn25Al6Fe3Mn3.01	Cu 60,0...67,0 Al 3,0...7,0 Fe 1,5...4,0 Mn 2,5...5,0 Zn ostatak	450	750	8	Legure za statički jako opterećene dijelove konstrukcija; za statički jako opterećene ležaje i s malom brzinom vrtnje, vijence pužnih kola s malom brzinom vrtnje, unutrašnje dijelove visokotlačnih armatura i slično.
G-CuZn35Al1	P.CuZn35AlFeMn.01	Cu 56,0...65,0 Al 0,5...2,0 Fe 0,5...2,0 Mn 0,3...3,0 Zn ostatak	170	450	20	Legura s osrednjim kliznim i mehaničkim svojstvima; za tlačno opterećene matice kod valjaoničkih naprava i vretenastih preša, kućišta i tuljce mazalica pod tlakom, brodske propelere i drugo.

#### **2.4.5. Legure bakra s cinkom i niklom**

Ako legurama s 55 % do 63 % bakra dodamo od 10 % do 30 % nikla (ostatak je cink), dobiva se legura koja je srebrnaste boje i ima više naziva: novo srebro, bijeli bakar, argentan, alpaka itd. Kako bi legura bila nešto jeftinija dodaje se cink koji ujedno i poboljšava livljivost, međutim potrebno je pripaziti na dodanu količinu cinka jer u većim iznosima smanjuje čvrstoću i otpornost na koroziju. U pogledu mikrostrukture, ove legure su u potpunosti čvrste otopine i po mehaničkim svojstvima su usporedive sa sličnim mjedima. Ove se legure mogu hladno oblikovati pošto su vrlo duktilne. Pošto ove mjedi posjeduju bolju početnu otpornost u odnosu na ostale, vrlo su prikladne za izradu posrebnog pribora i relejnih opruga. U optici, finoj mehanici i graditeljstvu koriste se legure koje sadrže olovo jer su mehaničkim svojstvima bolje u odnosu na ostale mjedi [2].

Kao i ostale vrste mjedi, tako je i ova osjetljiva na napetosnu koroziju. U tablici 2.6. navedeno je nekoliko vrsta legura bakra s cinkom i niklom uz njihova svojstva i primjenu.

Tablica 2.6. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s niklom i cinkom [2]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva				Smjernice za primjenu
DIN	stara HRN		$R_{p0,2}$ , MPa, min.	$R_m$ , MPa, min.	A, %, min.	HB ≈	
CuNi12Zn24	CuNi12Zn24	Cu 63,0...66,0 Ni 11,0...13,0 Zn ostatak	290...540	340...640	40...8	85...195	Legura dobro hladno oblikovljiva; za duboko vučenje, stolni pribor, ukrasne predmete u graditeljstvu, unutarnju arhitekturu, opruge itd.
CuNi18Zn20	CuNi18Zn20	Cu 60,0...63,0 Ni 17,0...19,0 Zn ostatak	340...570	390...640	40...5	95...190	Kao i prethodna legura, još postojanja; prvenstveno za opruge.
CuNi12Zn30Pb1	CuNi12Zn30Pb1	Cu 56,0...58,0 Ni 11,0...13,0 Pb 0,3...1,5 Zn ostatak	240...370	410...490	25...8	120...150	Za obradu odvajanjem čestica; fina mehanika, optika, ključevi i drugo.
CuNi18Zn19Pb1	CuNi18Zn19Pb1	Cu 59,0...63,0 Ni 17,0...19,0 Pb 0,3...1,5 Zn ostatak	290...420	430...530	25...6	135...160	Kao i prethodna legura, međutim još postojana.

## 2.5. Legure bakra bez cinka

Jedna od prvih legura koju su razvili antički metalurzi bila je bronca. U Europi, brončano doba trajalo je od 2200. do 700. godine prije nove ere. Ovom legurom izrađivali su se razni vrhovi oštrica za strijele i koplja, noževe i mačeve (slika 2.6.); ali bronca se također koristila za izradu posuđa i umjetničkih predmeta (slika 2.7.). Sami izraz „bronca“ upotrebljava se za razne legure bakra u kojima ima malo ili nimalo kositra, ali posjeduju sličnu boju (npr. silicijska bronca, manganska bronca, aluminijska bronca). Kao što je već navedeno, legure bakra bez cinka dijele se na kositrene, aluminijeve, olovno kositrene, olovne, berilijeve, manganove i silicijeve bronce i legure bakra s niklom [1].



*Slika 2.6 Rimsko brončano koplje [7]*

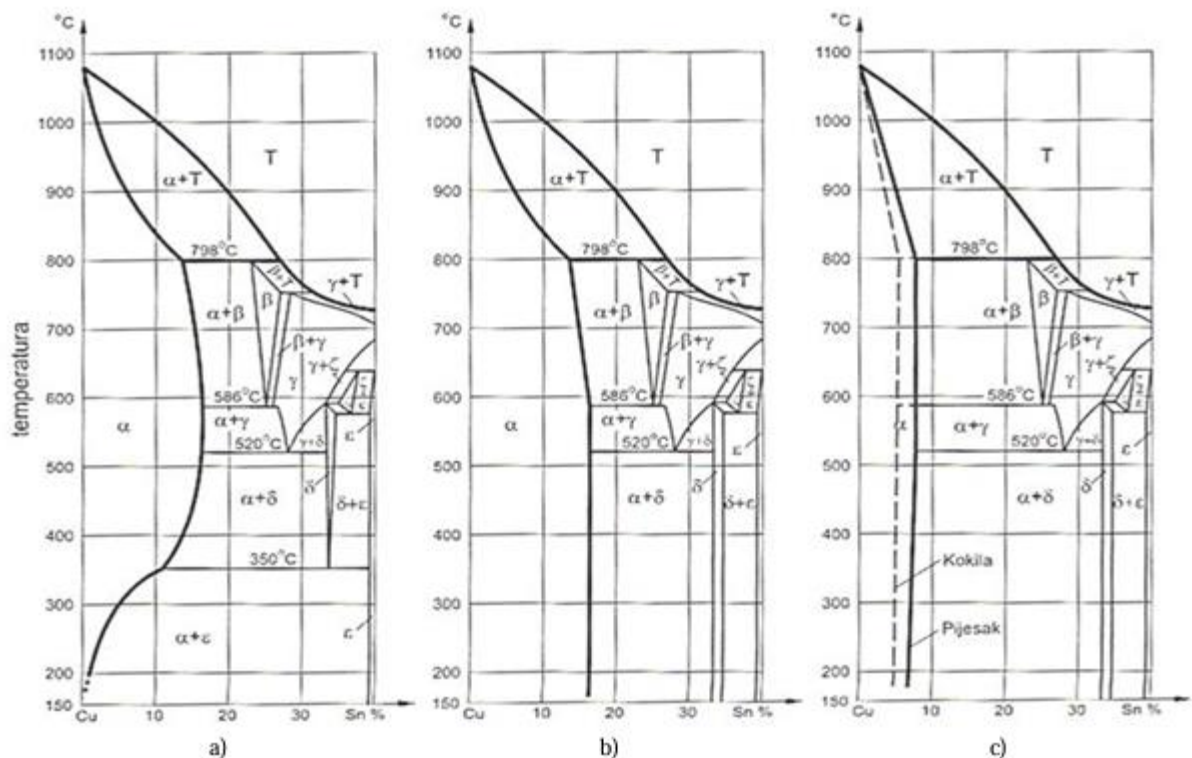


*Slika 2.7 Brončano posuđe [8]*

## 2.5.1. Kositrena bronca

Prava ili kositrena bronca ima udio bakra viši od 80 %. Ova vrsta legure tvrđa je od čistog bakra i time je pogodnija za izradu lijevanjem ili poliranje kao završnu obradu. Kositrena bronca je otporna na koroziju i dobro provodi električnu struju [9].

Ravnotežnim dijagramom stanja (slika 2.8. (a)) mogu se objasniti svojstva ove legure koja su nastala kao posljedica njezine mikrostrukture. Uslijed velikog razmaka između solidus i likvidus linije javlja se značajna razlika u kemijskom sastavu između skrućenog dijela legure i taljevine, ovo vrijedi na bilo kojoj temperaturi. Zbog sporije brzine difuzije bakra i kositra u odnosu na međudifuziju bakra i cinka, tijekom skrućivanja dolazi do jakih mikrosegregacija. Kod Cu-Sn legura ispod približno 400 °C mikrostrukturne promjene protječu vrlo sporo. Time lijevane bronce koje su u industrijskim uvjetima hlađene do sobne temperature, postići će mikrostrukturno stanje koje se ne nalazi na ravnotežnom dijagramu. Zbog toga se dio dijagrama ispod 400 °C zanemaruje za praktične svrhe će mikrostruktura nastala hlađenjem ostati nepromijenjena (slika 2.8. (b i c)) [2].



Slika 2.8. Dijagram stanja Cu-Sn: a) ravnotežno stanje, b) žareno stanje, c) lijevano stanje [2]

S  $\alpha$  - mikrostrukturom, ova bronca može se hladno oblikovati obradom deformiranjem pošto je  $\alpha$  - faza čvrsta, duktilna i žilava otopina. Uslijed prisutnosti  $\delta$  - faze koja je intermetalni spoj i



javlja se u leguri s više od 8 % Sn, legure postaje tvrda i krhka te ne smije biti prisutna u leguru koju želimo preraditi hladnom deformacijom.

Djelići  $\delta$  - faze mogu biti prisutni u lijevanim legurama i s manje od 6 % Sn uslijed jake mikrosegregacije. Kako bi ovu leguru učinili prikladnijom za preradu hladnom deformacijom,  $\delta$  - fazu je moguće ukloniti produljenim žarenjem na 700 °C čime se ubrzava difuzija. Ovim žarenjem postiže se ravnotežno stanje u skladu s dijagramom i time preostaje samo jednolična  $\alpha$  - faza. Nakon žarenja, hlađenje na zraku ili u pećima normalnim industrijskim brzinama može biti prebrzo da bi se omogućila precipitacija faze.

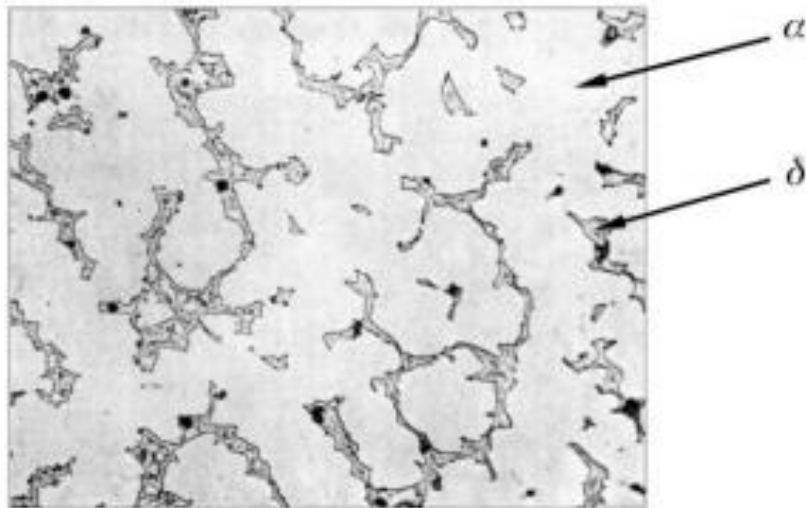
Na ovaj način, hladno oblikovati se mogu bronce s do 14 % Sn. Međutim u praksi se bronce s do 7 % Sn hladno oblikuju, dok se legure koje sadrže do oko 15 % Sn lijevaju [2].

Tablica 2.7. prikazuje primjere gnječenih kositrenih bronci.

Tablica 2.7. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih Cu-Sn legura [2]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas. %, $\approx$	Mehanička svojstva				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$ , MPa, min.	$R_m$ , MPa, min.	A, %, min.	HB $\approx$	
CuSn6	Sn 5,5...7,5 Cu ostatak	200...590	340...640	55...5	85...195	Legura za opruge, cijevi, spiralne cijevi, tlakomjere, dijelove u kemijskoj industriji i drugo.
CuSn8	Sn 7,5... 9,0 Cu ostatak	250...640	390...690	60...10	90...220	Slično kao i prethodna legura, ali uz veću čvrstoću i povećanu otpornost na trošenje i koroziju, i za klizne ležajeve.

Za izradu kliznih ležajeva prvenstveno se koriste lijevane kositrene bronce, pošto im njihova mikrostruktura to omogućuje (slika 2.9.). Čestice  $\delta$  - faze su tvrde i uložene u matricu, čini ju  $\alpha$  - faza koja je otporna na udarce. Kositrene bronce većinom sadrže niski dio fosfora iznosa do 0,05 % koji je nastao kemijskom redukcijom provedenom prije lijevanja kako bi se uklonio kisik. Lijeivane kositrene bronce se često nazivaju fosfornim broncama, međutim prave fosforne bronce imaju namjerno dodan fosfor u iznosu od 0,1 % do 1 % [2].



*Slika 2.9. Mikrostruktura kositrene bronce P.CuSn14. (Povećanje 250:1) [2]*

Fosforne bronce koje su oblikovljive gnječenjem sadrže do 8 % Sn i do 0,3 % P i dolaze u obliku šipki i žica kao i kositrene bronce. Dodavanjem fosfora povećava se čvrstoća, poboljšava se otpornost na koroziju i smanjuje se faktor trenja. Za izradu ležajeva, koji zahtijevaju mali faktor trenja uz veliki udarni rad loma i čvrstoću, koriste se lijevane fosforne bronce koje sadržavaju do 13 % Sn i do 1 % P. Dodani fosfor povezuje se s bakrom u bakrov fosfid, koji je tvrdi spoj i stvara trojni eutektoid s  $\alpha$  i  $\delta$  fazom [2].

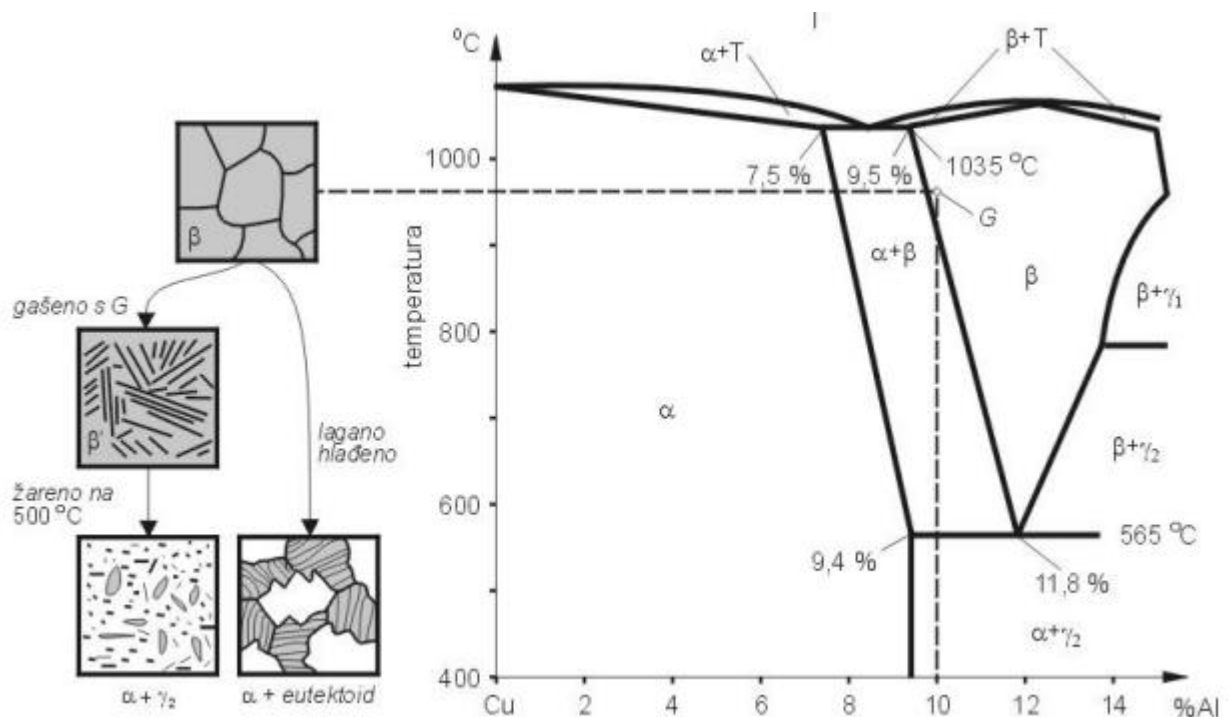
Tablica 2.8. prikazuje nekoliko primjera lijevanih kositrenih bronci uz pripadajuća svojstva i smjernica za primjenu.

Tablica 2.8. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s kositrom bakra i bakra s kositrom i cinkom (DIN 1705) [2]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A$ , %	
G-CuSn12	P.CuSn12.01	Cu 84,0...88,5 Sn 11,0...13,0	140	260	12	Legura otporna na trošenje, koroziju i morsku vodu; spojke i dijelove spojki, matice vretena opterećene okretanjem vijenaca pužnih kotača i sl., konstr. dijelovi u obliku cijevi kao dugački profili, npr. vijenci pužnih kotača, visoko opterećene stojeće i klizne letve, ulošci cilindara itd.
G-CuSn12Ni	P.CuSn12Ni2.01	Cu 84,0...87,0 Sn 11,0...13,0 Ni 1,5...2,5	160	280	14	Legura vrlo dobro otporna na trošenje i morsku vodu; za visoko opterećene spojke i dijelove spojki, visoko opterećene armature i kućišta crpki, lopatice za crpke i vodne turbine.
G-CuSn12Pb	P.CuSn12Pb2.01	Cu 84,0...87,0 Sn 11,0...13,0 Pb 1,0...2,0	140	260	10	Legure za ležajeve s dobrim mehaničkim svojstvima pri prisilnom kotrljanju i dobrom otpornošću na trošenje i morsku vodu; za udarno opterećene klizne ležajeve do 60 MPa, klizne letve i ploče itd.
G-CuSn10	P.CuSn10.01	Cu 88,0...89,0 Sn 9,0...11,0	130	270	18	Legure visokog udarnog rada loma; otporna na koroziju i morsku vodu; za armature i kućišta crpki, turbinska kola i crpke, dijelove u obliku cijevi za klizne otvore, ležajeve, letve, matice opterećene okretanjem i sl.
G-CuSn5ZnPb	P.CuPb5Sn5Zn5.0 1	Cu 84,0...86,0 Sn, Zn, Pb 4,0...6,0	90	220	16	Legura s dobrom livljivošću, dobro se meko i tvrdo lemi, korozijski otporna u morskoj vodi; za armature za vodu i paru do 225 °C, tankostjene složene odljevke i dr.

## 2.5.2. Aluminijska bronca

Ova vrsta bronca može se podijeliti na hladno i toplo oblikovljive, te isto tako hladno i toplo livljive legure. Zbog spore difuzije kao i kod kositrene bronca, mikrostrukturne promjene uvjetovane industrijskim uvjetima hlađenja do 400 °C mogu se zanemariti. Na dijagramu stanja Cu-Al (slika 2.10.) može se vidjeti da do 9,4 % Al pri sobnoj temperaturi postoji prisutnost  $\alpha$  čvrste otopine koja ima dobru oblikovljivost. Ako je prisutnost aluminijska veća od 9,4 %, javlja se intermetalna faza sastava  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  ( $\gamma_2$  - faza). Kao i sve druge faze, krhka je i tvrda zbog čega su legure u kojima je prisutna  $\gamma_2$  - faza isto tako krhke. Ako se Cu-Al dijagram stanja usporedi s Fe-C dijagramom, može se vidjeti kako su u oba prisutne  $\alpha$  - faze, dok  $\beta$  - faza iz Cu-Al dijagrama po položaju odgovara  $\gamma$  - fazi. Isto je tako prisutan ( $\alpha + \gamma_2$ ) eutektoid kod Fe-C legura. Zbog ovih sličnosti u položaju faznih polja u dijagramima, aluminijska bronca je toplinski obradiva ako pri tome sadržava oko 10 % Al kako bi mogla postići martenzitna transformacija [2].



Slika 2.10. Dijagram stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10 % Al [2]

Na sobnoj temperaturi nastala mikrostruktura sastoji se od  $\alpha$  i  $\gamma_2$  - faze u slučaju da se bronca s 10% Al lagano hladi. Ako se ( $\alpha + \gamma_2$ ) eutektoid ponovno zagrije, on prekrizalizira u čvrstu otopinu  $\beta$  na temperaturi iznad 565 °C (eutektoidna temperatura). Ako se legura i dalje zagrijava do oko 900 °C,  $\alpha$  - faza se potpuno otapa u  $\beta$  - fazi i time se dobiva monofazna čvrsta otopina  $\beta$ . Postupkom gašenja u vodi temperature 900 °C, dobiva se mikrostruktura koja ima sastav od  $\beta'$  - faze. U

dijagramu nije prikazana jer ne predstavlja ravnotežnu fazu, isto kao i martenzit kod čelika. Poput martenzita,  $\beta'$  - faza je krhka i tvrda pa je time mikrostrukturno dosta slična samom martenzitu. Provođenjem toplinske obrade popuštanja na oko 500 °C, javlja se precipitacija finih nakupina  $\alpha$  i  $\gamma_2$  - faze. Na vrlo sličan način se toplinski obrađuje i popušteni martenzit čelika. Ako se aluminijske bronce s 10 % Al hlade na zraku, iz  $\beta$  - faznog područja javlja se mikrostruktura poput martenzita  $\beta'$  ili bainitnog tipa koji posjeduje fino polirani  $\gamma_2$ . Ako se želi postići ( $\alpha + \gamma_2$ ) mikrostruktura, potrebno je provesti žarenje i potom hlađenje u peći do temperature okoline [2].

Glavna industrijska primjena aluminijske bronce temelji se na sljedećim značajkama [1]:

- čvrstoća se zadržava pri povišenim temperaturama, posebice ako su prisutni određeni legirni elementi,
- pri povišenim temperaturama pruža veliku otpornost na oksidaciju,
- pri uobičajenim temperaturama pruža dobru otpornost,
- dobra otpornost na trošenje,
- dosta se koristi u dekorativne svrhe jer posjeduje zlatnu boju koja je dosta dopadljiva.

Uslijed poteškoćama prilikom lijevanja ova vrsta bronce nema široko područje primjene. Prilikom lijevanja iznad 1100 °C počinje se stvarati oksidna kožica i troska. Ovo se javlja zbog lake oksidacije aluminijske na visokim temperaturama lijevanja i kao rješenje primjenjuju se neturbulentni postupci lijevanja koji dodatno poskupljuju proizvod [2].

Hladno gnječene  $\alpha$  - legure posjeduju od 4 % do 8 % Al uz do 4 % Ni zbog kojeg se povećava korozivna postojanost. Zbog navedenog sastava, ove legure su pogodne za proizvodnju kondenzatorskih izmjenjivača topline i cijevi, to jest kada se traži visoka korozivna postojanost i čvrstoća do temperatura oko 300 °C. Prilagođavanjem sastava  $\alpha$  - faznih legura može se dobiti boja koja je vrlo slična boji 18 - karatnog zlata. Time rečenim, u proizvodnji dekorativnih predmeta često se koriste tanko valjani limovi od ove legure [1,2].

Lijevane i toplo gnječene legure sadrže od 8 % do 12 % Al, dok pritom posjeduju  $\alpha + \gamma_2$  mikrostrukturnu. Uz navedeni aluminij, još se dodaju željezo, mangan i nikal. Legure koja sadrže od 8 % do 10 % Al toplo su oblikovljive i oblikuju se valjanjem ili kovanjem. Nikal i željezo dodaju se po svaki u iznosu do 5 %, pritom željezo ima učinak na usitnjenje zrna. Ove legure primjenjuju se u kemijskoj industriji, većinom za komponente koje su izložene visokim temperaturama, međutim mogu se primjenjivati i za druge potrebe kao što su otkovci otporni na

koroziju. U tablici 2.9. prikazani su primjeri legura za gnječenje s pripadajućim mehaničkim svojstvima i smjernicama za primjenu [1,2].

Tablica 2.9. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s aluminijem (aluminijska bronca) – DIN 17665 i 17672 [2]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$ , MPa, min.	$R_m$ , MPa, min.	A, %, min.	HB ≈	
CuAl8	Al 7,0...9,0; Cu ostatak	120...270	370...490	35...15	90...130	Kemijska industrija; otporna prvenstveno na sumpornu i octenu kiselinu i drugo.
CzAl8Fe3	Al 6,5...8,5; Fe 1,5...3,5; Cu ostatak	200...270	470...590	25...10	110...150	Hladno oblikovljiva legura; dna kondenzatora, limovi za kemijske aparate i sl.
CuAl10Fe3Mn2	Al 8,5...11,0; Fe 2,0...4,0; Mn 1,5...3,5; Cu ostatak	250...340	590...690	12...7	150...180	Konstruktivski dijelovi za kemijske aparate, dijelovi otporni na ogorinu; osovine, vijci, blazinice ležaja.
CuAl10Ni5Fe4	Al 8,5...11,0; Ni 4,0...6,0; Fe 2,0...5,0; Cu ostatak	270...390	640...740	15...10	180...185	Dna kondenzatora, osovine, vijci, dijelovi koji se troše, blazinice ležajeva, upravljački dijelovi za hidrauliku, usisni valjci (ind. papira) i sl.

Legure koje se koriste za lijevanje u pješčane kalupe ili kokilu posjeduju od 9,5 % do 12 % Al. Uz navedeni aluminij dodaju se nikal i željezo u iznosu od 5 % po svakog, te mangan do 1,5 % (tablica 2.10.). Ove legure imaju područje primjene u pomorskoj tehnici, npr. dijelovi ventila, brodski vijci, osovine pumpi, osovine za vijke itd. Također se koriste za nosače četkica u

generatorima, za sjedišta ventila, zupčanike, izradu alata (kliješta, dijetlo, čekić) koji ne proizvode iskru u industriji sa zapaljivim sredstvima kao što su benzin, eksploziv, boja i plin [1,2].

Tablica 2.10. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s aluminijem – DIN 1714 [2]

Oznaka legure prema DIN-u		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
			$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	
DIN	HRN					
G-CuAl10Fe	P.CuAl10Fe3.01	Cu min. 83,0; Al 8,0...11,0; Fe 2,0...4,0	180	500	15	Legura postojana na temp. -200 °C i +200°C, odljevci velike čvrstoće, otporni na kiseline; za mehanički opterećene dijelove u strojogradnji, elektroindustriji, automobilnoj i tekstilnoj industriji (mazalice, konusni zupčanici).
G-CuAl10Ni	P.CuAl10Ni5	Cu min. 76,0; Al 8,5...11,0; Ni 4,0...6,5; Fe 3,5...5,5	270	600	12	Legura postojana u hladnoj i toploj morskoj vodi pri trajnom kretanju, otporna na kiseline; za vrlo opterećene dijelove; parne armature, povratne ploče, dijelove aparata u petrokemiji, brodske propelere, zupčanike, kućišta crpki, pužne vijke, pužna kola i drugo.

### 2.5.3. Olovna i olovnokositrena bronca

Legure bakra koje sadrže olovo nazivaju se olovne bronce, dok legure koje dodatno sadrže kositar se nazivaju olovnokositrene bronce. Kao i mjedima, broncama se obično dodaje do 3 % Pb čime se povećava rezljivost. Za neke specijalne namjene (npr. klizni ležajevi) dodaju se veće količine do oko 25 % Pb. Navedene vrste bronci mogu podnijeti za 20 % veća opterećenja u odnosu na „bijele kovine“ koje su na bazi olova i kositra. Također imaju višu toplinsku provodljivost pa se mogu koristiti pri većim brzinama pošto brzo odvede toplinu. Ove legure su izuzetno otporne na trošenje ako se koristi normalno podmazivanje. Međutim, vrlo je važna i otpornost na zaribavanje pošto olovo privremeno djeluje kao sredstvo za podmazivanje u slučaju izostanka normalnog podmazivanja [2].

U tablici 2.11. prikazani su osnovni podaci o sastavu, mehaničkim svojstvima i primjeni navedenih legura.



Tablica 2.11. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s olovom i kositrom – DIN 1716 (izvod) [2]

Oznaka legure prema DIN-u		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
			$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	
DIN	HRN					
G-CuPb5Sn	P.CuPb9Sn5.01	Cu 84,0...87,0 Pb 4,0...6,0	130	240	15	Legura otporna na koroziju, pare sumporne i solne kiseline; za klizne ležajeve s većim specifičnim opterećenjem, za armature otporne na kiseline i sl.
G-CuPb10Sn	P.CuPb10Sn10.01	Cu 78,0...82,0 Pb 8,0...11,0 Sn 9,0...11,0	80	180	8	Legure s dobrim kliznim svojstvima, otporna na trošenje i koroziju; za ležajeve s većim površinskim opterećenjem, za ležaje vozila, valjačkih strojeva i sl.
G-CuPb15Sn	P.CuPb15Sn8.01	Cu 75,0...79,0 Pb 13,0...17,0 Sn 7,0...9,0	170	180	8	Legura za ležaje s dobrim kliznim svojstvima i pri povremenom nedovoljnom podmazivanju i podmazivanju vodom, otporna na sumpornu kiselinu; za ležaje s velikim specifičnim opterećenjem pri dobrom podmazivanju, za armature otporne na solnu kiselinu itd.
G-CuPb20Sn	P.CuPb20Sn5	Cu 69,0...76,0 Pb 18,0...23,0 Sn 4,0...6,0	90	180	8	Legura za ležaje s najboljim kliznim svojstvima, za najveća specifična opterećenja i male brzine pri privremeno nedovoljnom podmazivanju i podmazivanju vodom, otporna na sumpornu kiselinu, slabije livljivosti od CuPb15Sn; za ležajeve mlinova, crpki i valjaonica za hladno valjanje lima i folija itd.

#### **2.5.4. Manganska i silicijska bronca**

Manganska bronca ima dobru korozivsku otpornost u morskoj vodi i izuzetno dobro prigušuje vibracije. Ova vrsta bronce je namijenjena za lijevanje, makar se može i hladno i toplo oblikovati. Zbog visokog udarnog rada loma, ova legura ima lošu rezljivost i time joj je cijena veća pošto ju je teže obrađivati.

Silicijska bronca je legura koja se rijetko sastoji od dvije komponente. Uz silicij koji je prevladavajući legirni element, ova vrsta bronce još sadrži nikal, mangan, cink ili željezo što ovisi o samom podrijetlu legure. Ova legura ima izuzetnu podobnost za toplu i hladnu preradbu, dobru korozivsku postojanost, visoki udarni rad loma i osrednju čvrstoću [2].

#### **2.5.5. Legure bakra s niklom**

Bakar i nikal imaju istu kristalnu strukturu, malu razliku u gustoći te približno jednako velike atome. Zbog prethodno navedenih sličnosti, međusobno su topljivi u svim omjerima koji stvaraju niz čvrstih otopina. Postoji mogućnost javljanja mikrosegregacija u lijevanom stanju koje ipak ne dovode precipitacije krhke sekundarne faze, što se može vidjeti kod drugih legura bakra.

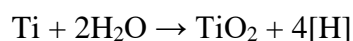
Stanje jednolične čvrste otopine moguće je postići žarenjem. Visoka korozivska postojanost i vrlo dobra oblikovljivost postiže se ako u mikrostrukturi postoji odsutnost bilo koje sekundarne faze. Čvrstoća se povećava istovremeno, pa se čvrstoća ovih legura može mjeriti sa čvrstoćom nehrđajućih čelika. Kako se mijenja sama tehnika obrade ovih legure, tako ih je moguće prilagođavati tim tehnikama. Mogu se oblikovati u toplom ili hladnom stanju: kovanjem, valjanjem, prešanjem, vučenjem, natiskivanjem, utiskivanjem itd. Korozivska postojanost se može i povećati dodavanjem 1,5 % Fe i 2 % Mn. Stvaranjem pasivnog sloja gdje je prisutan kisik postiže se otpornost na koroziju. Pošto su ove legure postojane u morskoj vodi i boćatnim vodama, pretežito se koriste kod postrojenja za demineralizaciju morske vode i izradu dijelova kondenzatora za brodove. Mnoge zemlje koriste leguru CuNi25 koja ima posebnu namjenu za izradu kovanica u mnogim zemljama [2].

Tablica 2.12. prikazuje primjere, smjernice i svojstva gnječanih legura bakra s niklom.

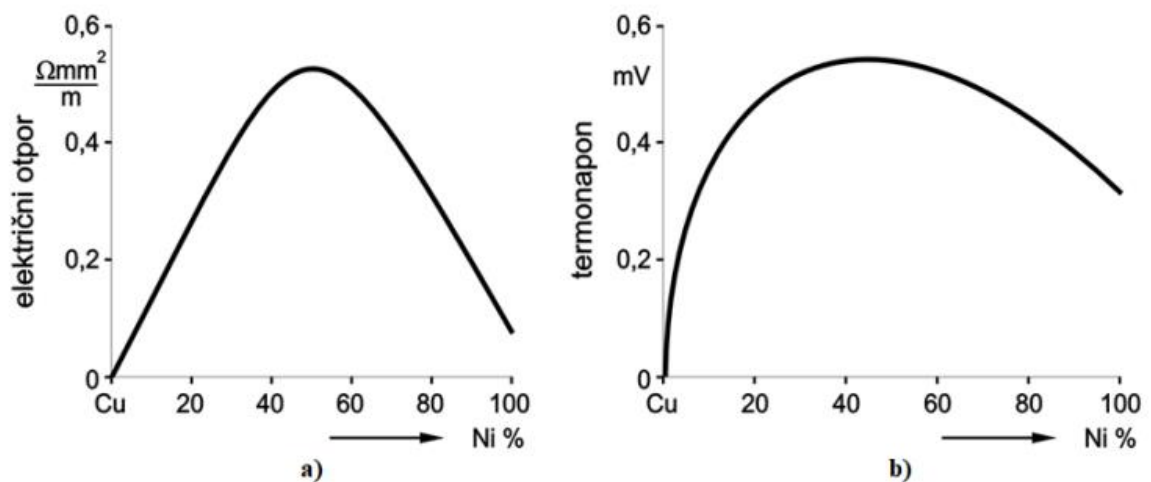
Tablica 2.12. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječanih legura bakra s niklom – DIN 17664 i 17672 (izvod) [2]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$ , MPa, min.	$R_m$ , MPa, min.	A, %, min.	HB ≈	
CuNi10Fe1Mn	Ni 9,0...11,0 Fe 1,0...2,0 Mn 0,5...1,0	100...250	280...350	30...10	80...110	Izuzetno otporna na eroziju, kavitaciju i koroziju (posebno u morskoj vodi), dobro zavarljiva; cijevi za vodovode s morskom vodom; cijevi, ploče i podnice za kondenzatore i izmjenjivače topline kao i za pregrijače vode (niski tlak), priprema slatke vode, klima uređaji, vodovi za kočnice, rebraste cijevi i drugo
CuNi30Mn1Fe	Ni 30,0...32,0 Mn 0,5...1,5 Fe 0,4...1,0 Cu ostatak	120...300	340...420	35...14	90...120	Izuzetno otporna na eroziju, kavitaciju i koroziju (posebno na morsku vodu), dobro zavarljiva; cjevovodi u brodogradnji, cijevi, podnice i ploče za kondenzatore i izmjenjivače topline rashladnika ulja, proizvodnja pitke vode iz morske vode, klima uređaji, rebraste cijevi i drugo.

Do znatnih poteškoća pri zavarivanju može doći uslijed velike topljivosti vodika u bakru i niklu (i njihovim legurama). Vodena para ili voda se rastavlja na vodik u prisutnosti vlage okside zbog dezoksidacijskih elemenata iz dodatnog materijala prema reakciji:



U rastaljenom materijalu otapa se atomarni vodik sve do granice topljivosti. Prilikom hlađenja taljevine, pri temperaturi skrućivanja dolazi do eksponencijalnog smanjenja topljivosti, topljiva količina vodika u metalu ostaje u čvrstom stanju. Preostala količina vodika izlučena je u molekularnom obliku. Ova pojava potiče stvaranje pora u zavaru i potrebno je ukloniti vlagu kao osnovan uzrok kako bi se izbjegla. S porastom količine legiranih elemenata kod kristala mješanaca dolazi do kontinuiranog rasta i električnog otpora. Upravo kod bakra i nikla, ako se polazi od čistih metala, javlja stalni rast električnog otpora i doseže iznos od oko 50 % Ni, što je maksimalna vrijednost (slika 2.11.) [2].



Slika 2.11. Promjena električnog otpora Cu-Ni legura pri 0 °C (a) i termonapon Cu-Ni legura u odnosu na željezo pri 816 °C (b) [2]

### 3. Zavarljivost bakra i legura bakra

Zbog svoje vrlo visoke električne provodljivosti, bakar često služi kao referentna vrijednost za uspoređivanje provodljivosti ostalih metala i legura. Njegova električna provodljivost smanjuje se prilikom legiranja, dok mehanička svojstva ovise o stanju istog. Bakar je poznat po tome što je veoma plastičan i moguće ga je očvrstnuti hladnom deformacijom ako njegova čvrstoća ima isti iznos kao i opći konstrukcijski čelik.

Neke od osnovnih nečistoća u bakru su: O, Fe, P, Pb, Te, S i Se. Postoji mogućnost od stvaranja  $\text{Cu}_2\text{O}$  ukoliko bakar sadrži od 0,015 do 0,04 % kisika. Na visokim temperaturama moguće je razvijanje vodene pare (zarobljavanje u strukturi) zbog koje nastaje poroznost i krhkost. Većina su bakrenih legura koje se koriste u komercijalne svrhe monofazne (tijekom hlađenja ili zagrijavanja nemaju alotropskih modifikacija), ali neke mogu biti toplinski obradive i precipitacijski očvrstnute.

Obična mjed ima sastav Cu-Zn-Pb što ju čini trokomponentnom legurom, dok specijalna pored cinka još sadrži Al, Mn, Ni, Fe i time ima veću tvrdoću, čvrstoću i korozivnu otpornost. Bronce sadrže najmanje 60 % bakra i postoji prisutnost od jednog ili više legiranih elemenata, osim cinka.

Kod zavarivanja bakra i bakrenih legura na željeni unos topline bitno utječu toplinsko istežanje, toplinska i električna provodljivost (imaju bitan utjecaj na unos topline - tablica 3.1.). Zbog velike toplinske provodljivosti nužno je prije zavarivanja provesti predgrijavanje (oko  $100\text{ }^\circ\text{C}$  / mm debljine osnovnog materijala – maksimalno  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ). Također problem stvaraju pojava velikog afiniteta prema plinovima iz atmosfere (vodik, kisik), velika toplinska dilatacija ako se zavaruje u prisilnim položajima, velika toplinska dilatacija gdje se javljaju zaostala naprezanja i deformacije, te sklonost poroznosti (u zavarenim spojevima). Pošto je bakar izuzetan vodič topline, održavanje zagrijanosti materijala je složeno. Moguće je predgrijavanje područja oko zavara (zbog visoke toplinske provodljivosti) , što može dovesti do omekšavanja zone taljenja precipitacijski očvrstnutih bakrenih legura, otapanja precipitata, pa čak i do pukotina uzrokovanih toplinom (iznimni slučajevi). Upotrebom prašaka koji imaju dezoksidirajuće djelovanje sprječava se oksidacija. Kod elektrootpornog zavarivanja bakra probleme stvara njegova velika električna provodljivost. U odnosu na čisti bakar, bakrene legure imaju višu korozivnu otpornost, čvrstoću i otpornost na trošenje [10].

Tablica 3.1. Temperaturno područje taljenja i toplinska provodljivost nekih bakrenih legura [10]

Oznaka Cu – legura	Temperaturno područje taljenja, °C	Toplinska provodljivost, W/mK
Bakar bez kisika	1072 – 1097	390
Be - bronca	870 – 970	107 – 129
Komercijalna bronca, 90 %	1030 – 1050	188
Mjed 85 %	995 – 1035	160
Mjed 70 %	930 – 960	120
P – bronca, 10 %	850 – 1000	50
Al – bronca	1050 – 1150	67
Si – bronca	980 – 1035	36
Mg – bronca	870 – 900	105
Cu – 10 % Ni	1100 – 1160	45
Cu – 30 % Ni	1180 – 1250	29

Dodatni materijal koji se koristi za zavarivanje bakra sadrži male količine Sn, Ag, Ni, Si, Mn i dr. Elektroda EL-CuMn2 koristi se kod zavarivanja čistog bakra, a elektrode EL-CuSn7 i EL-CuSn13 koriste se za zavarivanje kositrenih bronci. Aluminijska bronca zavaruje se EL-CuMn14Al, EL-CuAl9 i EL-CuAl9Ni2Fe elektrodama. Kada se bakar zavaruje s čelikom, koriste se specijalne bazične elektrode (EZ-Bakar 1 elektroda), dok se EZ-Bakar 2 elektroda koristi za zavarivanje bakrenih legura s čelikom, broncama i sivim lijevom. Dodatni materijali koji se koriste za zavarivanje mjedi su legirani sa Si, Zn, Sn ili Zn, Mn, Si, Ni, Ag, Sn.

Cu – Al legure koje imaju niži sadržaj aluminijske su monofazne, a dvofazne su ukoliko sadrže od 9 – 15 % Al (eutektoidna ili martenzitna transformacija). Za zavarivanje aluminijskih bronci nije potrebno predgrijavanje (naročito kod TIG i MIG postupaka), međutim postoji opasnost od pojave toplinskih pukotina ako je sadržaj aluminijske manji od 8,5 %.

Kositrena bronca kojoj je udio kositra manji od 2 % jest monofazna, ako se brzo ohladi s temperature otapajućeg žarenja. Cu – Sn bronce su sklone oksidaciji kositra i imaju osjetljivost na tople pukotine prilikom zavarivanja. Ovim broncama opada tvrdoća, čvrstoća i istežanje već pri 200 °C. Zbog vlastite mase, postoji mogućnost od loma komada pri povišenim temperaturama koje su iznad 500 °C. Ako bakrena legura sadrži od 2,5 – 9,0 % Sn dobro je zavarljiva, dok bilo što ispod ili iznad ove vrijednosti smanjuje zavarljivost. Plinski postupak zavarivanja nije preporučljiv (makar je moguć), najbolje se zavaruje TIG postupkom, ali je REL postupak isto zadovoljavajuć. Pojava poroznosti moguća je prilikom MIG zavarivanja pa je potrebno predgrijavanje. Radni komadi bi se nakon zavarivanja trebali lagano hladiti.

Cu – Zn legura (mjed) dobro je zavarljiva plinskim, MIG i TIG postupcima, dok je REL postupkom zavarljivost nešto manja. Mjed koja sadrži veći udio cinka je sklonija nastanku pukotina, posebno uz prisutnost olova (pukotine u zoni taljenja). Prilikom zavarivanja mjedi isparava cink što je vrlo opasno za ljudsko zdravlje. Cink isparava na 906 °C, dok je talište bakra na temperaturi od 1084 °C. Time cink izlazi iz mjedi i može nastati poroznost. Plinskim zavarivanjem (korištenje umjereno oksidirajućeg plamena) može se djelomično ublažiti isparavanje cinka (stvaranje Zn - oksid filma na površini). Isparavanje cinka također se može ublažiti pravilnim odabirom dodatnog materijala (koji sadrži dezoksidanse – Si). Oksidaciju mjedi i isparavanje cinka otežava prisutnost fosfora u manjim količinama. Za zavarivanje mjedi debljine do 1,5 mm ne koristi se dodatni materijal.

Silicijeve bronce (Cu-Si legure) posjeduju dobru zavarljivost, ali je moguća osjetljivost na tople pukotine zbog čega je poželjno ubrzano hladiti zavar. Dobra zavarljivost je posljedica niske toplinske provodljivosti. Međuslojna temperatura se ograničava na oko 100 °C i nije potrebno provesti predgrijavanje. Dodatan materijal može biti isti kao i osnovni (ili Al-bronca).

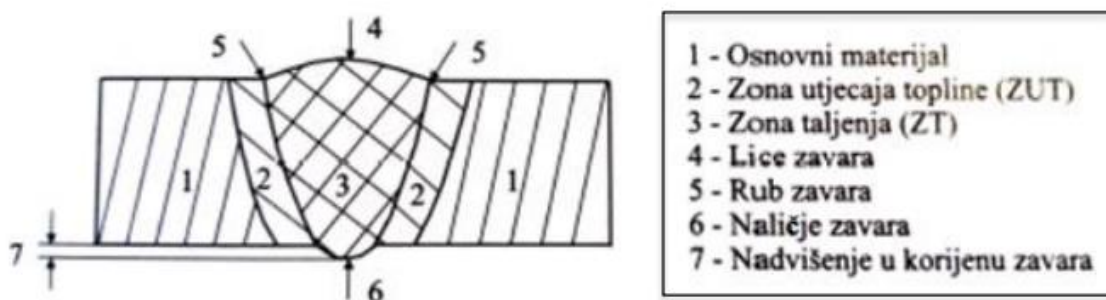
Rubovi zavara berilijevih bronci moraju biti čisti jer se berilijem stvaraju površinski oksidi kojima se otežava provarivanje i taljenje korijena. Za zavarivanje se preporučuje korištenje inertnih plinova. Debljine veće od 4 mm je potrebno predgrijavati na temperaturu od 150 – 200 °C, dok tanje od 3 - 4 mm nije potrebno.

Pošto Cu-Ni legure imaju slabiju toplinsku provodljivost, potrebno je pripaziti da tijekom zavarivanja ne dođe do predgrijavanja čime plinsko zavarivanje nije poželjno. Osjetljivost na krhkost zavara i tople pukotine povećava prisutnost nečistoća. Dodatni materijal je istog sastava kao i osnovni uz prisutnost desulfuranata i dezoksidanata (Zn ili Mg).

Kod zavarivanja bakra i bakrenih legura, debljine iznad 6 mm preporučljivo je postaviti u okomiti položaj zbog odvođenja topline. Potrebno je predgrijavanje i materijal zavaruju dva zavarivača (sa svake strane jedan). Ovom tehnikom dovodi se velika količina topline i može se izvesti TIG ili plinskim postupkom. Uz pregrijavanje, TIG postupak se može koristiti za limove debljina do 5 mm, dok je za veće debljine bolji MIG postupak (uz upotrebu žice 0,02 do 0,1 % P) [10].

## 4. Zavarivanje

Postupkom zavarivanja spajaju se dva ili više dijelova i može se vršiti s ili bez dodatnog materijala. Ovime se dobiva nerastavljiv spoj kontinuiranog poprečnog presjeka koji sadrži jednolična svojstva kao što su udarni rad loma, mehanička svojstva, otpornost na trošenje itd. Zona spoja je tijekom zavarivanja dovedena u plastično ili tekuće stanje. Postupkom zavarivanja moguće je spajati metalne (čelici, Cu, Ni, Al i njihove legure) i nemetalne materijale kao što su termoplastični dijelovi i dr. Na slici 4.1. je prikazan poprečni presjek zavara na kojem su označeni njegovi osnovni elementi [10].



Slika 4.1. Presjek i elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [11]

Glavni dijelovi zavarenog spoja su zona taljenja (ZT) i zona utjecaja topline (ZUT). Zona taljena je nastala uslijed pojave kristalizacije i skrućivanja tijekom procesa zavarivanja. Ova zona može biti sastavljena od mješavine osnovnog i dodatnog materijala ili samo osnovnog materijala. Zona utjecaja topline nalazi se neposredno uz rastaljenu zonu gdje se javlja promjena kristalne strukture. Širina ZUT-a je najčešće 2 – 8 mm i ovisi o unosu topline.

Na temelju ostvarenog zavarenog spoja, postupci se dijele na zavarivanje taljenjem (toplinska energija) i zavarivanje pritiskom (mehanička ili toplinsko mehanička energija) [10].

Navedene tehnike zahtijevaju [12]:

- korištenje suvremenih alata tj. opreme za zavarivanje,
- visoku ponovljivost zavarivanja,
- korištenje modernih metoda i oprema za kontrolu metodama s ili bez razaranja,
- primjenu odgovarajućih materijala koji će pružiti ekonomičnost i pouzdanost.

U današnje vrijeme, zavarivanje je najčešće primjenjivana metoda spajanja metalnih konstrukcija zbog svoje kvalitete i učinkovitosti. U sljedećim tablicama prikazana je podjela zavarivanja prema normi HR EN ISO 4063 [10].



Tablica 4.1. Podjela elektrolučnog zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063 [13]

Oznaka	Vrsta zavarivanja
1	Elektrolučno zavarivanje
101	Zavarivanje metalnom elektrodom
11	Zavarivanje metalnom elektrodom bez zaštitnog plina
111	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama – REL
112	Gravitacijsko zavarivanje obloženim elektrodama
114	Zavarivanje praškom punjenim žicama
12	Zavarivanje pod zaštitom praška
121	Zavarivanje sa žicom pod zaštitom praška
122	Zavarivanje trakom pod zaštitom praška
123	Zavarivanje s više žica pod zaštitom praška
124	Zavarivanje pod zaštitom praška s dodatkom metalnog praška
125	Zavarivanje pod zaštitom praška s praškom punjenim žicama

Tablica 4.2. Podjela elektrolučnog zavarivanja sa zaštitnim plinom (HRN EN ISO 4063) [13]

Oznaka	Vrsta zavarivanja
13	Elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim plinom
131	Zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (MIG)
135	Zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom aktivnog plina (MAG)
136	Zavarivanje praškom punjenim žicama pod zaštitom aktivnog plina
137	Zavarivanje praškom punjenim žicama pod zaštitom inertnog plina
14	Zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom plina
141	Zavarivanje volframovom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG)

Tablica 4.3. Podjela elektrootpornog zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063 [13]

Oznaka	Vrsta zavarivanja
2	Elektrootporno zavarivanje
21	Točkasto zavarivanje
211	Indirektno točkasto zavarivanje
212	Direktno točkasto zavarivanje
22	Šavno zavarivanje
221	Preklopno šavno zavarivanje
222	Šavno zavarivanje pritiskom
225	Sučeljno šavno zavarivanje folija
226	Šavno zavarivanje s trakom

## 4.1. Izvori energije za zavarivanje

Kao izvor, toplinska se energija najčešće koristi za spajanje materijala procesom zavarivanja. Glavne karakteristike izvora energije su koncentriranost gustoće snage, snaga izvora i brzina kretanja izvora. Svaki izvor energije koji se koristi za zavarivanje mora zadovoljavati sljedeće zahtjeve [10]:

1. Lokalno djelovanje na površinu ili volumen zavarivanog komada,
2. Dovoljna snaga izvora ( $P$ ) kako bi se ostvarilo lokalno zagrijavanje do željene temperature i za kompenzaciju toplinskih gubitaka,
3. Komad koji se zavaruje ovisi o dimenzijama, obliku i fizikalnim svojstvima te gustoća snage na komadu koji se zavaruje mora prijeći određenu vrijednost.

Kako bi se materijal doveo u stanje za zavarivanje nije bitan oblik energije koji se koristi za zavarivanje (električna, mehanička, kemijska, optička i difuzijska), već je bitna gustoća snage. Izvori energije s obzirom na gustoću snage za zavarivanje mogu biti [10]:

1. Visoke gustoće – tale i isparavaju materijal:  $q_2 > 10^2 - 10^4 \text{ W/mm}^2$ ,
2. Uobičajene gustoće – tale materijal:  $q_2 = 10^{-1} - 10^2 \text{ W/mm}^2$ ,
3. Niske gustoće – ne tale materijal:  $q_2 < 10^{-1} \text{ W/mm}^2$ .

Ovisno o fizikalnom obilježju izvora energije, poznati su sljedeći izvori energije [10]:

1. Mlaz vrućih plinova – plinski plamen i mlaz mlaznice; izmjena energije ostvaruje se konvekcijom,
2. Električni luk – između radnog komada i elektrode; izmjena energije ostvaruje se konvekcijom, izravnim udarom elektrona, radijacijom topline te kapljicama materijala,
3. Tijek nabijenih čestica koje su ubrzane u električnom polju – mlaz elektrona ili iona u vakuumu,
4. Tijek zračenja – optički izvori: laser, zračenje visokotemperaturnog tijela,
5. Električna struja – zagrijavanje kontaktnih površina (elektrootporno, visokofrekventno i elektrolučno pod troskom).

U tablici 4.4. prikazani su iznosi minimalnih površina zagrijavanja i maksimalne gustoće snage za pojedine izvore energije.

Tablica 4.4. Maksimalne gustoće snage i minimalne površine zagrijavanja za pojedine izvore energije [10]









Izvori energije	Temperatura izvora, K	Min. površina zagrijavanja, mm <sup>2</sup>	Max. gustoća snage, W/mm <sup>2</sup>
Plinski plamen	3000 – 3500	1	5*10 <sup>2</sup>
Mlaz plazme	4000 – 5000	1	5*10 <sup>2</sup>
Električni luk u parama - osnovnih materijala - željeza	4500 – 5000 5000 – 6000	1	10 <sup>2</sup>
Električni luk u plinovima - vodik, dušik - argon, helij	5000 – 8000 10000 - 20000	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>3</sup>
Električni luk mikroplazme	-	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>6</sup>
Snop elektrona	-	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>7</sup>
Laserski snop	-	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>8</sup>

## 4.2. Vrste zavarenih spojeva












Na temelju međusobnog položaja dijelova koji se zavaruju, zavareni spojevi dijele se na kutne (rubni spoj, T-spoj), sučeljene, preklopne i naliježuće spojeve. Najčešće korišteni spojevi su sučeljeni i kutni. Kako bi se dobio kvalitetan zavar, rubne dijelove komada koji se zavaruju potrebno je oblikovati u određeni oblik pripreme za zavarivanje. Obično se pripremaju za neki oblik žlijeba i to strojnom obradom, toplinskim rezanjem ili ukošavanjem rubova na posebnim strojevima. Oblikom spojevi mogu biti: I - spoj, X - spoj, V - spoj, U - spoj, dvostruki U - spoj, J - spoj, K - spoj, dvostruki J - spoj,  $\frac{1}{2}$  V - spoj itd [10].

U sljedećim tablicama prikazuje se označavanje ovih spojeva na nacrtima u skladu s nacionalnim standardima.




Tablica 4.5. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva – 1. dio [11]

Naziv spoja	Prikaz i oznaka	Primjena
Rubni spoj		Za vrlo tanke limove. Rub se pretaljuje, najčešće bez dodatnog materijala.
Sučeljeni I-spoj		Za tanke stijenke (2-5 mm). Kod EPP zavarivanja 4-12 mm. Zavaruju se s jedne ili s obje strane.
Sučeljeni V-spoj		Za debljine stijenke 4-18 mm. Zavaruju se samo s jedne strane s provarom.
Sučeljeni polu V-spoj		Kao kod V-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće ili ne treba uskošenje, ili za zidni položaj
Sučeljeni Y-spoj		Kao kod V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni polu Y-spoj		Kao kod polu V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni U-spoj		Za vrlo debele materijale (>30 mm). U nekim slučajevima i kod tanjih materijala uz TIG zavarivanje korijena.
Sučeljeni J-spoj		Za vrlo debele materijale, tamo gdje drugu stranu nije moguće obraditi.

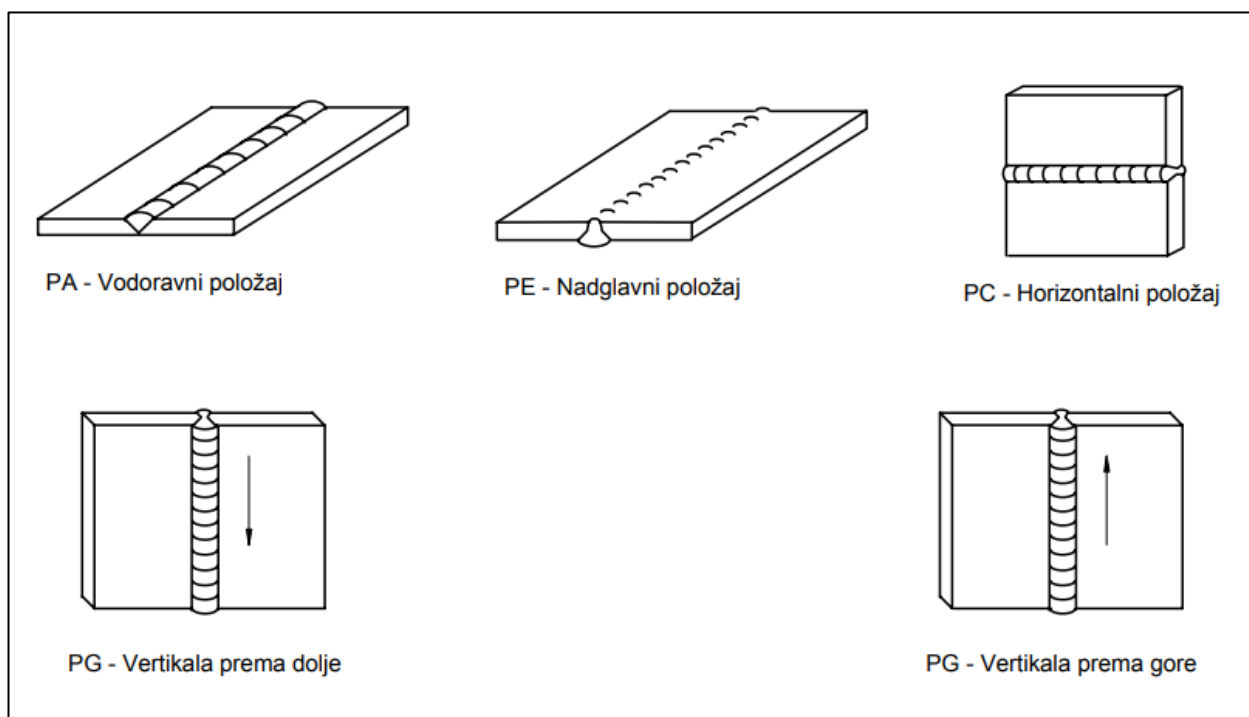
Tablica 4.6. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva – 2. dio [11]

Sučeljeni V-spoj zavaren i s druge strane		Kao kod V-spoja, s time da se zavaruje i s korijenske strane.
Sučeljeni X-spoj		Za debljine stijenke 15-40 mm, a za bakar već od 8 mm. Zavaruje se s obje strane.
Sučeljeni K-spoj		Kao kod X-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće iskositi rub ili u pripremi za zidni položaj. Može biti i kutni spoj.
Sučeljeni dvostruki Y-spoj		Kao kod X-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje ili u pripremi za EPP zavarivanje.
Dvostruki polu Y-spoj		Kao kod K-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje. Može biti i kutni spoj.
Sučeljeni dvostruki U-spoj		Za materijale neograničenih debljina, gdje je pristup moguć s obje strane.
Sučeljeni V-spoj većeg razmaka u grlu žlijeba		Za deblje materijale s velikim razmakom u korijenu, obično uz pomoć podloške. Strme stranice žlijeba.
Kutni spoj obostrano zavaren		Za debele materijale, gdje se zavarivanje zahtijeva s obje strane.
Kutni spoj jednostrano zavaren		Za materijale manjih debljina i zavarivanje samo s jedne strane.
Preklopni spoj-zavar u prorezu		Gornji materijal je obično tanji. Zavarivanje se izvodi u pripremljenom prorezu.
Preklopni spoj-točkasti zavar		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi elektrootporno, točkasto ili točkasto protaljivanjem.

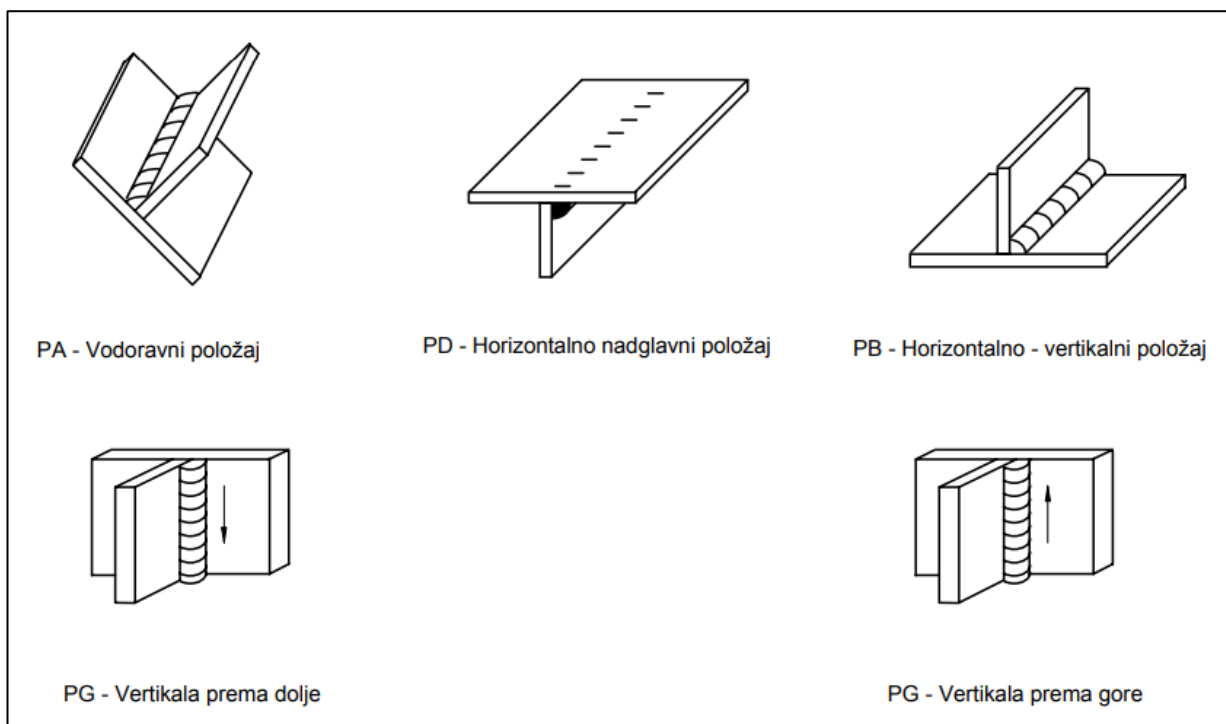
Tablica 4.7. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva – 3. dio [11]

Preklopni spoj-šavni zavar		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi elektrootporno ili protaljivanjem.
Rubni spoj		Za materijale malih debljina. Zavarivanje se izvodi s ili bez dodatnog materijala.
Navar		Navarena površina. Obično radi poboljšanja svojstava površine osnovnog materijala. "Platiranje" navarivanjem.

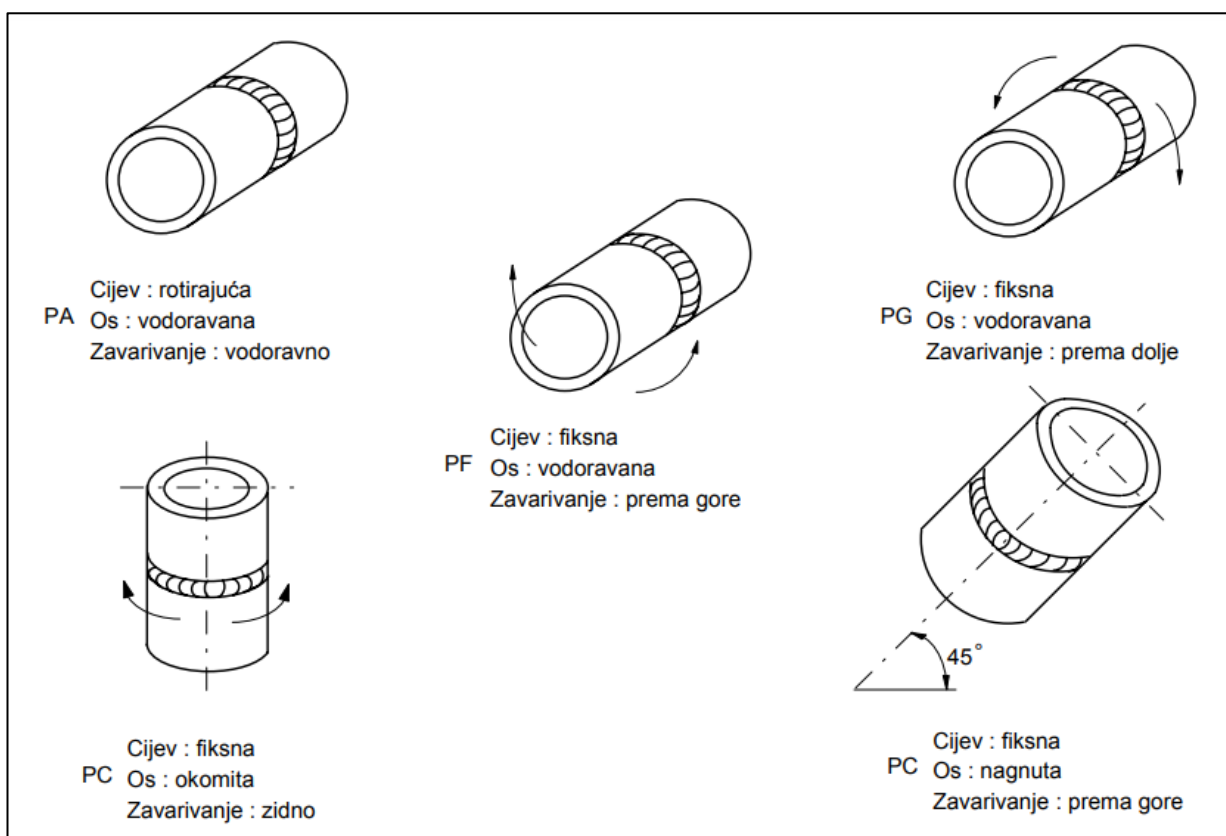
Osim već navedenih, zavareni spojevi se mogu podijeliti na još nekoliko načina, npr. prema broju prolaza (jedan prolaz, više prolaza, višeslojni zavar), funkciji (nosivi, brtveni, kombinirani), položaju zavarivanja (okomiti, vodoravni, vodoravno – okomiti, nadglavni), kontinuiranosti (neprekidni, točkasti i isprekidani). Na sljedećim slikama prikazani su položaji zavarivanja za limove i cijevi [10].



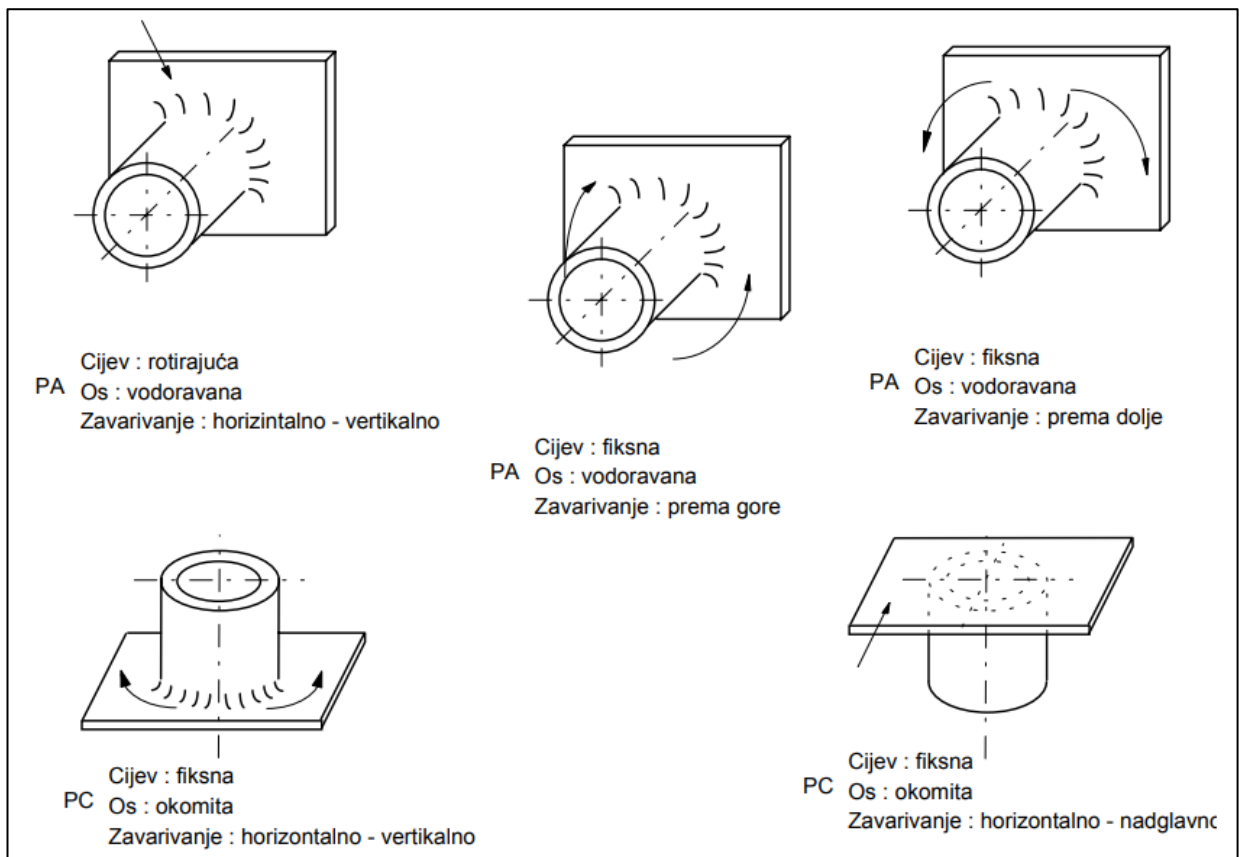
Slika 4.3. Položaji zavarivanja za limove – sučeljeni spojevi [14]



Slika 4.4. Položaji zavarivanja za limove – kutni spojevi [14]



Slika 4.5. Položaji zavarivanja za cijevi (cijev - cijev) [14]



Slika 4.6. Položaji zavarivanja za cijevi (cijev - lim) [14]



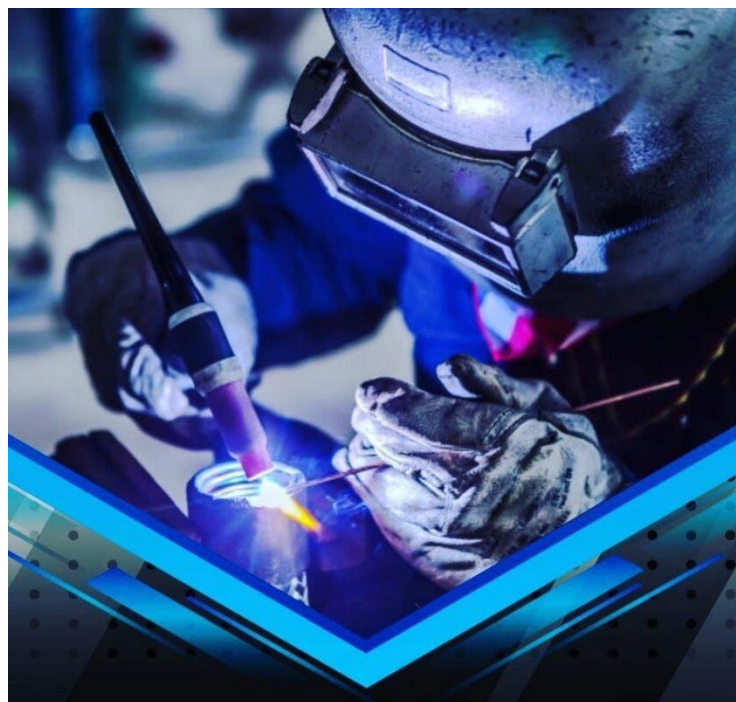
## 5. Postupak TIG zavarivanja

Sami naziv TIG zavarivanja je skraćenica od „Tungsten Inert Gas“. Još se koriste skraćenice GTAW (skraćeno od „Gas Tungst Arc Welding“) i WIG (skraćeno od „Wolfram Inert Gas schwiessen“) koja se koristi u njemačkoj stručnoj literaturi. Ovo je elektrolučni postupak zavarivanja pri kojem se između netaljive volfram elektrode i osnovnog materijala uspostavlja i održava električni luk [15].

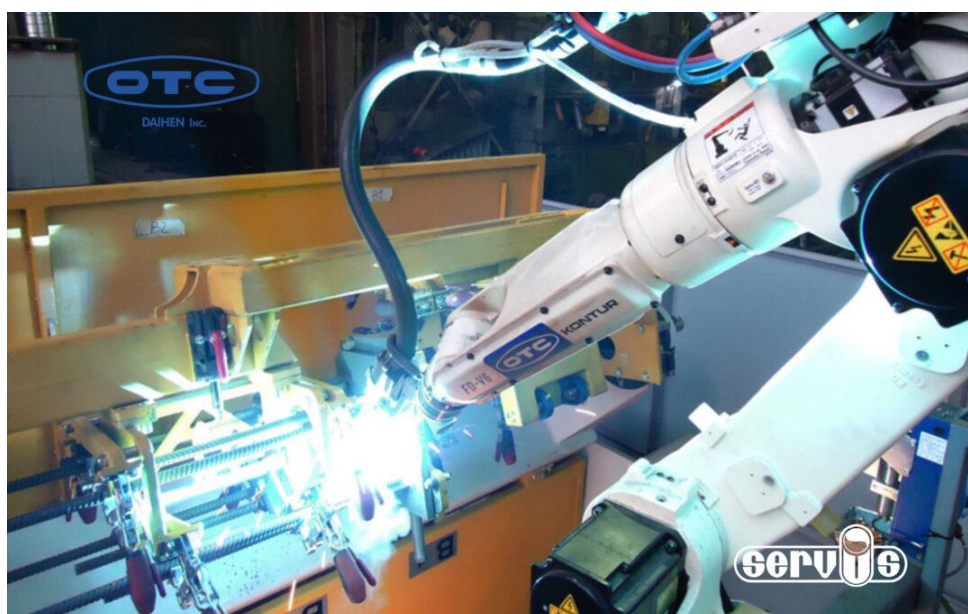
Postupak TIG zavarivanja razvijen je kako bi se aluminij i njegove legure mogli zavarivati u zrakoplovnoj industriji. Kako je porasla potražnja, ovaj postupak se proširio u procesnoj i kemijskoj industriji gdje se zavaruju bakar i njegove legure, aluminij te nehrđajući čelici. Kako bi se tijekom procesa zavarivanja zaštitio zavareni spoj od utjecaja okolne atmosfere upuhuju se inertni (neaktivni) plinovi. Oni prolaze kroz keramičku sapnicu koja je koaksijalno smještena oko netaljive elektrode i najčešće su to helij (He), argon (Ar) i njihove mješavine.

TIG zavarivanje je specifično po tome da se prijenos kapljice metala ne ostvaruje kroz električni luk, već se u prednji rub taline dodaje dodatni materijal koji se potom tali električnim lukom i sjedinjuje se s talinom zavara.

Kako se ovim postupkom najčešće zavaruje ručno (slika 5.1.), kvaliteta zavarenih spojeva uveliko ovisi o sposobnosti i vještini zavarivača. Međutim, kako se tehnologija stalno razvija sve više se uvodi poluautomatizacija i potpuna automatizacija (robotizacija) ovog procesa (slika 5.2.). Prilikom ručnog zavarivanja, zavarivač pravilnim vremenskim intervalima pomicanjem pištolja dodaje dodatni materijal. Jedina razlika između ručnog i poluautomatiziranog postupka jest što se u poluautomatiziranom žica dodaje uz pomoć elektromotora. Automatizirani TIG postupak se primjenjuje u serijskoj proizvodnji. Pištolj poluautomata postavlja se na robotsku ruku koja je numerički programirana i upravljana CAD/CAM sučeljem s upravljačkog računala. Tijekom procesa zavarivanja parametri se mogu mijenjati preko upravljačkog računala kojim se isto tako može vršiti nadzor [16].



*Slika 5.1. Ručno TIG zavarivanje [17]*



*Slika 5.2. Automatizirano TIG zavarivanje [18]*

TIG zavarivanje se u današnje vrijeme koristi za zavarivanje magnezija i Mg-legura, aluminija i Al-legura, Cu-legura, titana i Ti-legura, nelegiranih i niskolegiranih čelika, nehrđajućih čelika, itd. Kako su navedeni inertni plinovi skupi, ovim postupkom se zavaruju metali koji se nekim drugim postupcima teže zavaruju [16].

Prednosti TIG zavarivanja [10, 19]:

- Moguća primjena za sve vrste metala,
- Nema pojave rasprskavanja kapljica,
- Moguće zavarivanje u svim položajima,
- Postupak je moguće provoditi u radionici i na terenu,
- Vrlo dobra kontrola korijenskog prolaza,
- Nema dima, isparavanja i troske,
- Moguće je zavarivati komade debljina 1 do 6 mm, pa čak i veće debljine,
- Brzina kojom se dodaje dodatni materijal nije ovisna o energiji električnog luka,
- Relativno niska cijena izvora energije,
- Moguća je automatizacija procesa,
- Zadovoljavajuć estetski izgled zavara,
- Zavarivanje kompliciranih oblika,
- Minimalna količina štetnih plinova.

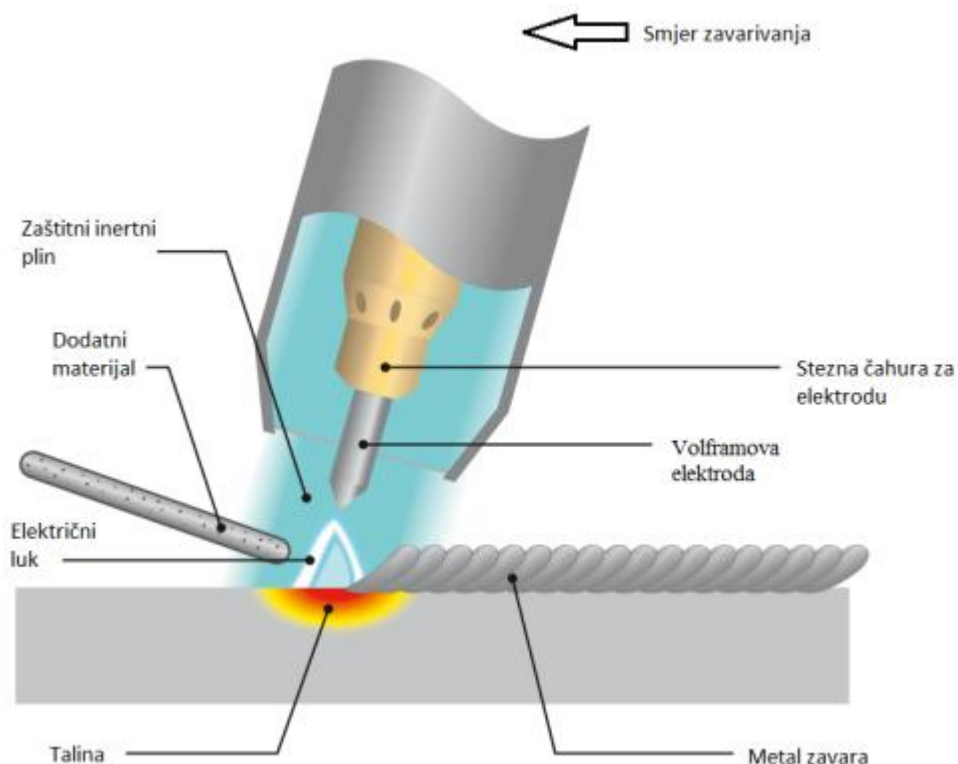
Nedostaci TIG zavarivanja [11, 19]:

- Mala brzina zavarivanja,
- Mali depoziti dodatnog materijala,
- Zahtijeva preciznu pripremu zavarenog spoja,
- Nema ekonomičnost za iznimno veće debljine serije (mala proizvodnost),
- Uslijed utjecaja vjetra, otežan je rad na otvorenom,
- Osposobljavanje zavarivača kod ručnog zavarivanja.

Ručno TIG zavarivanje omogućuje vrlo dobru kontrolu procesa te se može provoditi lijevom ili desnom tehnikom rada. Za ovu vrstu zavarivanja gotovo da i nema nepovoljnog položaja. Automatizirani ili ručni TIG postupak često se koriste za zavarivanje korijenskog prolaza cijevi, dok se za potpuni koristi ručni REL postupak [19].

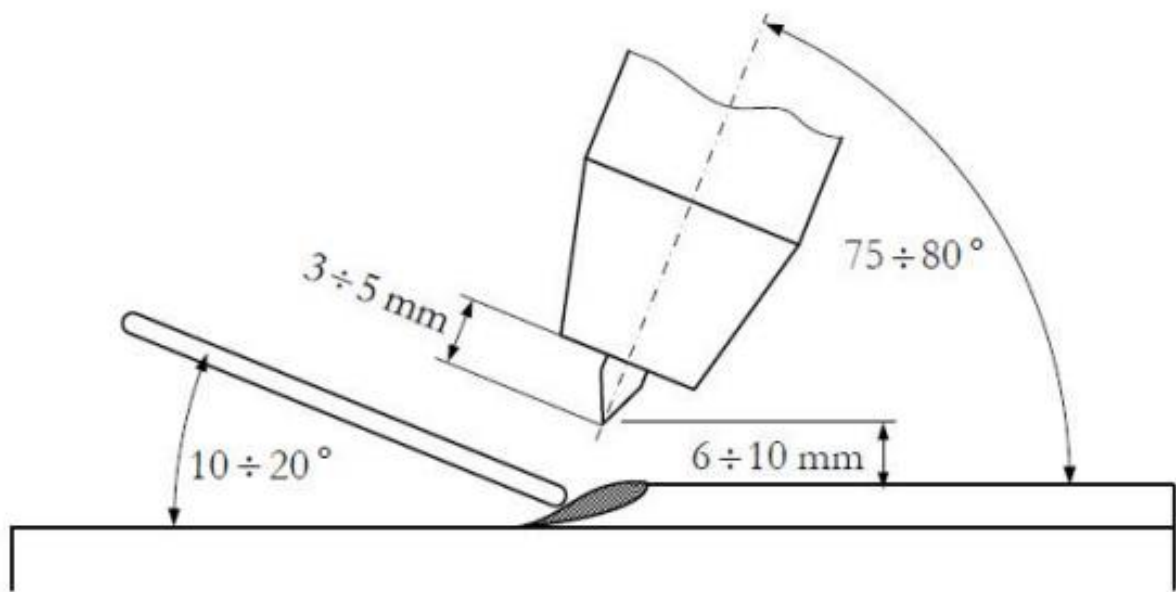
## 5.1. Princip rada TIG zavarivanja

Električnim lukom koji se održava između radnog komada i volframove elektrode pod zaštitom inertnog plina, dovodi se energija koja je potrebna za taljenje metala (slika 5.3.). Pritiskom na prekidač uspostavlja se električni luk kada se pištolj pozicionira na određeni razmak od osnovnog materijala (2 – 5 mm). Tada se upravljačkom elektronikom s pomoću visokofrekventnog generatora šalje visokofrekventna struja koja lako ionizira u inertnoj struji plinova. Time se na jednostavan način omogućuje uspostava električnog luka koji doseže temperature od 3000 do 10000 °C i njome tali osnovni materijal. Istosmjernom strujom zavaruju se nehrđajući čelici i ostali materijali (osim aluminija i magnezija te njihovih legura), pri tome elektroda mora biti postavljena na minus pol. U ovim je uvjetima elektroda od volframa otporna na trošenje. Za ručno TIG zavarivanje dodatni materijal najčešće dolazi u obliku šipke, dok za automatizirane postupke dolazi u obliku namotane žice. Stabilan se električni luk omogućuje inertnim plinom koji štiti zonu utjecaja topline od utjecaja atmosfere. Prekid električnog luka postiže se prestankom pritiska na prekidač, a zaštitni plin još neko vrijeme ostaje istjecati kako bi se vrh elektrode i talina zaštitili od naglog hlađenja [20].



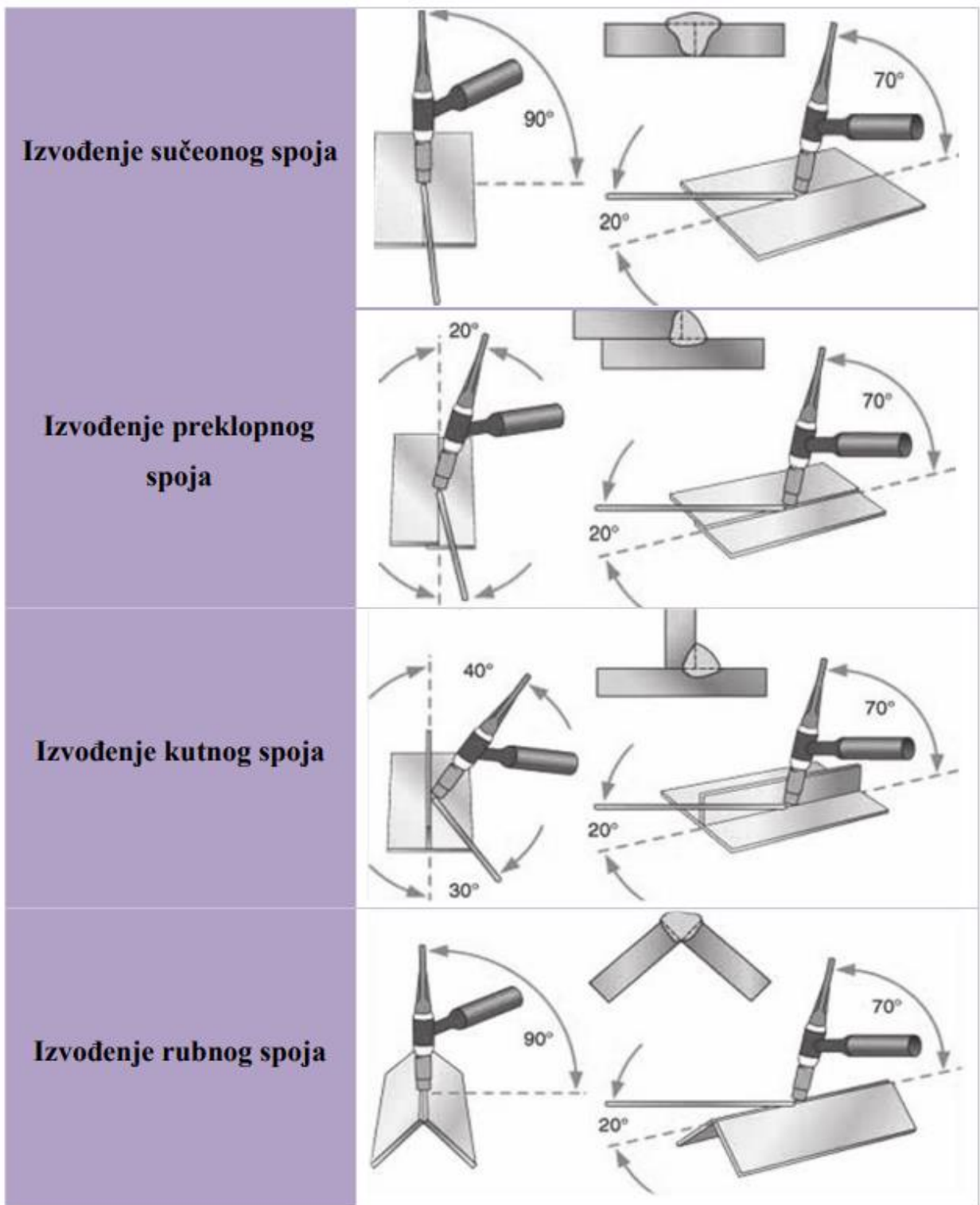
Slika 5.3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [20]

Na slici 5.4. prikazan je pravilan položaj elektrode u odnosu na dodatan materijal koji je karakterističan za lijevu tehniku zavarivanja. Ako se zavaruje lijevom tehnikom rada pištolj je potrebno držati desnom rukom, dok se dodatni materijal drži lijevom i time se zavaruje s desna u lijevo. Potreban je kut pištolja od  $75^\circ$  do  $80^\circ$  i kut dodatnog materijala od  $10^\circ$  do  $20^\circ$  kako bi se vršilo optimalno zavarivanje. U odnosu na ostale elektrolučne postupke zavarivanja, kod TIG zavarivanja se prijenos kapljica metala ne vrši kroz električni luk. Vrši se zbog mehanizma površinske napetosti gdje se dodavanjem dodatnog materijala u prednji rub taline, tali u električnom luku i sjedinjuje s talinom zavara. Vrh volframove elektrode nalazi se 3 do 5 mm iznad keramičke sapnice, dok je razmak između radnog komada i vrha elektrode propisan u iznosu od 6 do 10 mm [20,21].



*Slika 5.4. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [21]*

Tehnike izvođenja TIG zavarivanja prikazane su na slici 5.5. gdje je navedeno izvođenje sučeonog, preklopnog, kutnog i rubnog spoja. Vrlo je važno obratiti pozornost na kuteve pištolja i dodatnog materijala u odnosu na radni komad.

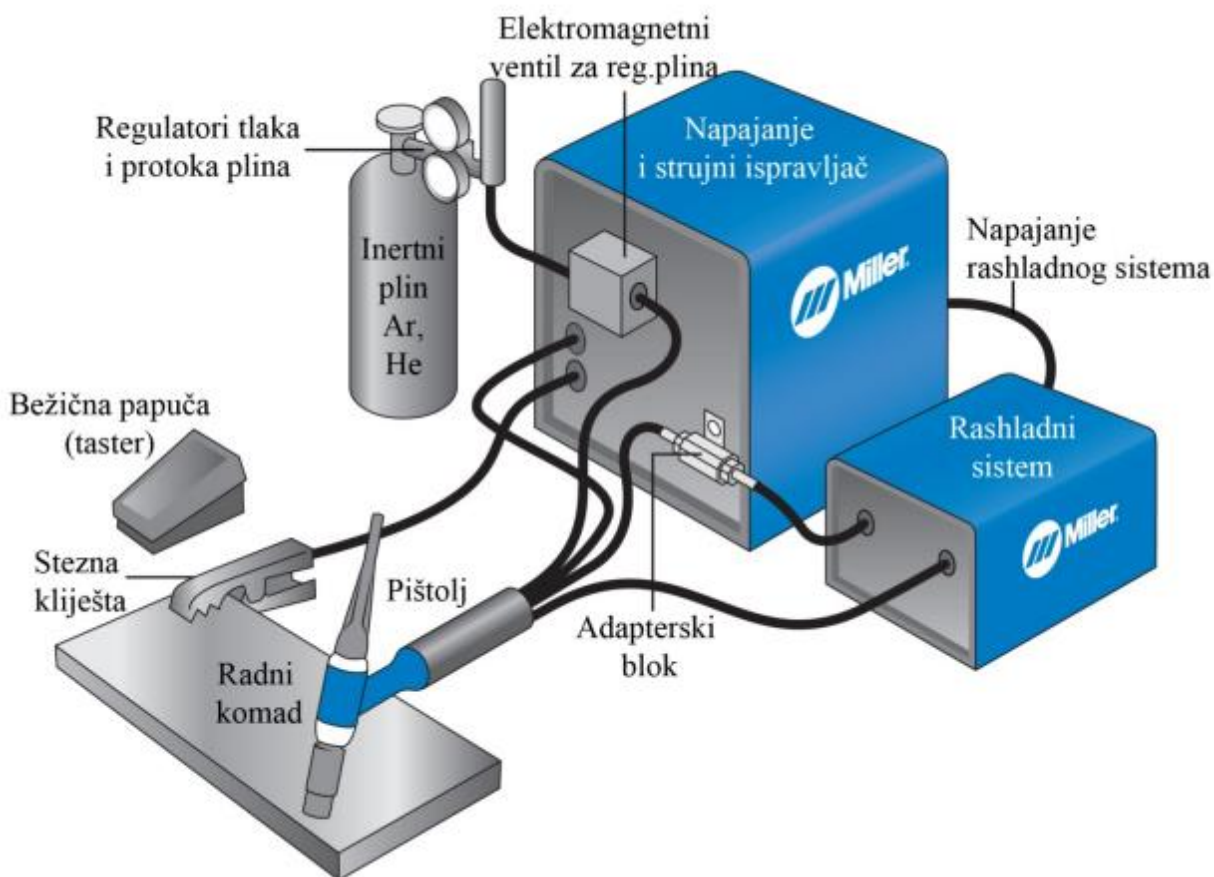


Slika 5.5. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [11]



## 5.2. Oprema za TIG zavarivanje

Svi osnovni dijelovi potrebni za TIG zavarivanje prikazani su na slici 5.6. i njihov princip rada je sljedeći: transformatorsko napajanje koje se nalazi u kontrolnom ormariću, upravljačka elektronika, strujni ispravljač i sistem za rashlađivanje pištolja su priključeni na električnu mrežu. Prekidač za paljenje nalazi se na kontrolnom ormariću. Odabir pola na koji se spaja pištolj ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje. Zatim se s pomoću steznih kliješta spaja radni komad u svrhu zatvaranja strujnog kruga. Kako bi se lakše uspostavio električni krug, između pištolja za zavarivanje i radnog komada paralelno se spaja visokofrekventni modul. Time se zavarivača štiti od strujnog udara uslijed „skin“ efekta. Inertni plin nalazi se u čeličnoj boci koja je atestirana i na vrhu te boce nalazi se redukcijski ventil na koji se dalje nadovezuju regulatori tlaka i protoka te mjerni instrumenti. Inertni plin propušta se gumenim crijevom s pomoću elektromagnetskih ventila sve do pištolja. Plin onemogućava kontaminaciju okolnim nečistim medijima te time štiti volframovu elektrodu i područje zavara [21].

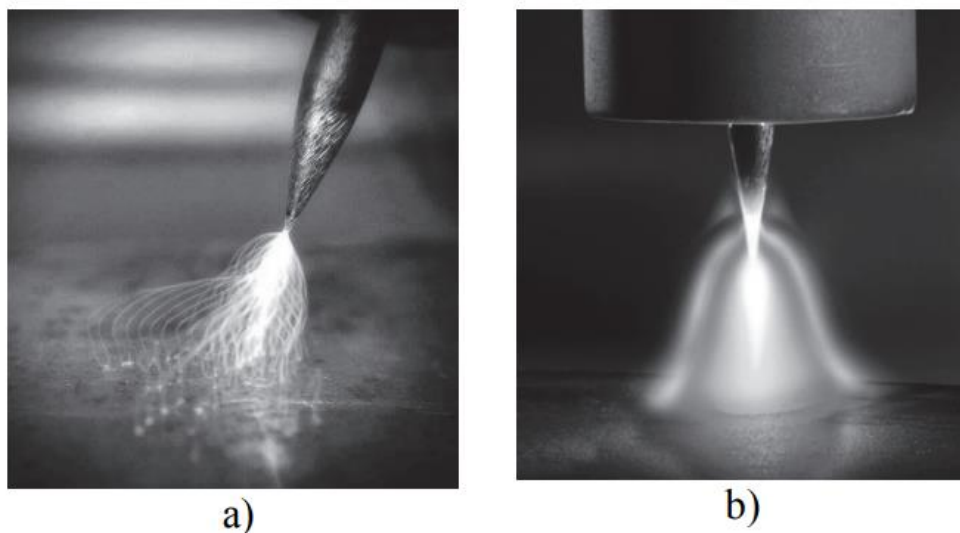


Slika 5.6. Osnovni dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [21]

### 5.2.1. Izvori električne energije

Kao izvor struje za TIG zavarivanje koriste se ispravljači, transformatori i inverteri i imaju nepromjenjivu strujnu karakteristiku. Tako se prilikom zavarivanja bakra i čelika može koristiti običan ispravljač ili inverter. Na njega se priključuje pištolj i zavaruje dodirnom vrha elektrode s radnim komadom (slika 5.7.). Transformator se koristi kao izvor energije kod zavarivanja magnezija i aluminijsa. Važno je još dodati uređaj koji će proizvoditi visokofrekventnu električnu struju. U principu za TIG zavarivanje se grade posebni izvori električne struje koji kao takvi mogu biti kombinirani. Ovakvi izvori struje osmišljeni su da se koriste kao transformatori i ispravljači na princip prebacivanja sklopa na izvoru. Za impulsno TIG zavarivanje izrađuju se suvremeni izvori koji kao takvi pružaju potrebne karakteristike za ovakvu vrstu zavarivanja.

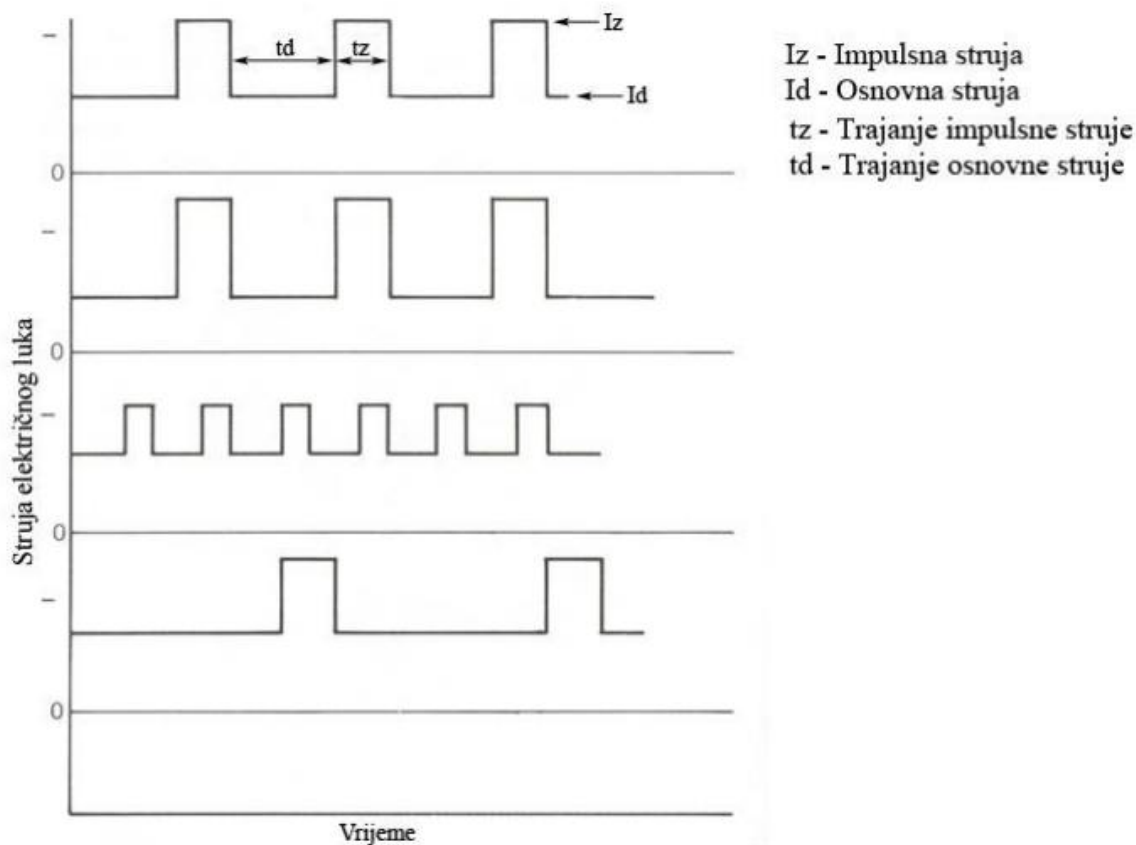
Za proizvodnju visokofrekventne struje dodatno se koristi mali transformator koji može biti smješten izvan izvora struje (u ormariću) ili u samom izvoru struje. Ovaj mali transformator proizvodi visokonaponsku struju (nekoliko tisuća volti). Uslijed visoke frekvencije struje ne postoji opasnost od pojave „skin“ efekta. Visokofrekventnom električnom strujom uspostavlja se električni luk u kojem nije potreban dodir između vrha elektrode i radnog komada. Kod zavarivanja gdje se koristi izmjenična električna struja važna je za stabilnost električnog luka. Ugradnja uređaja se vrši na izvoru istosmjerne i izmjenične struje zavarivanja [21].



Slika 5.7. a) Uspostava el. luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk [22]

Impulsno TIG zavarivanje koristi se kod zavarivanja tankih limova, osjetljivih materijala i ako je područje zavarivanja u nepovoljnom položaju. Kod ovog se postupka zavarivanja ritmički mijenjaju dvije razine jakosti električne struje (slika 5.8.) [11].



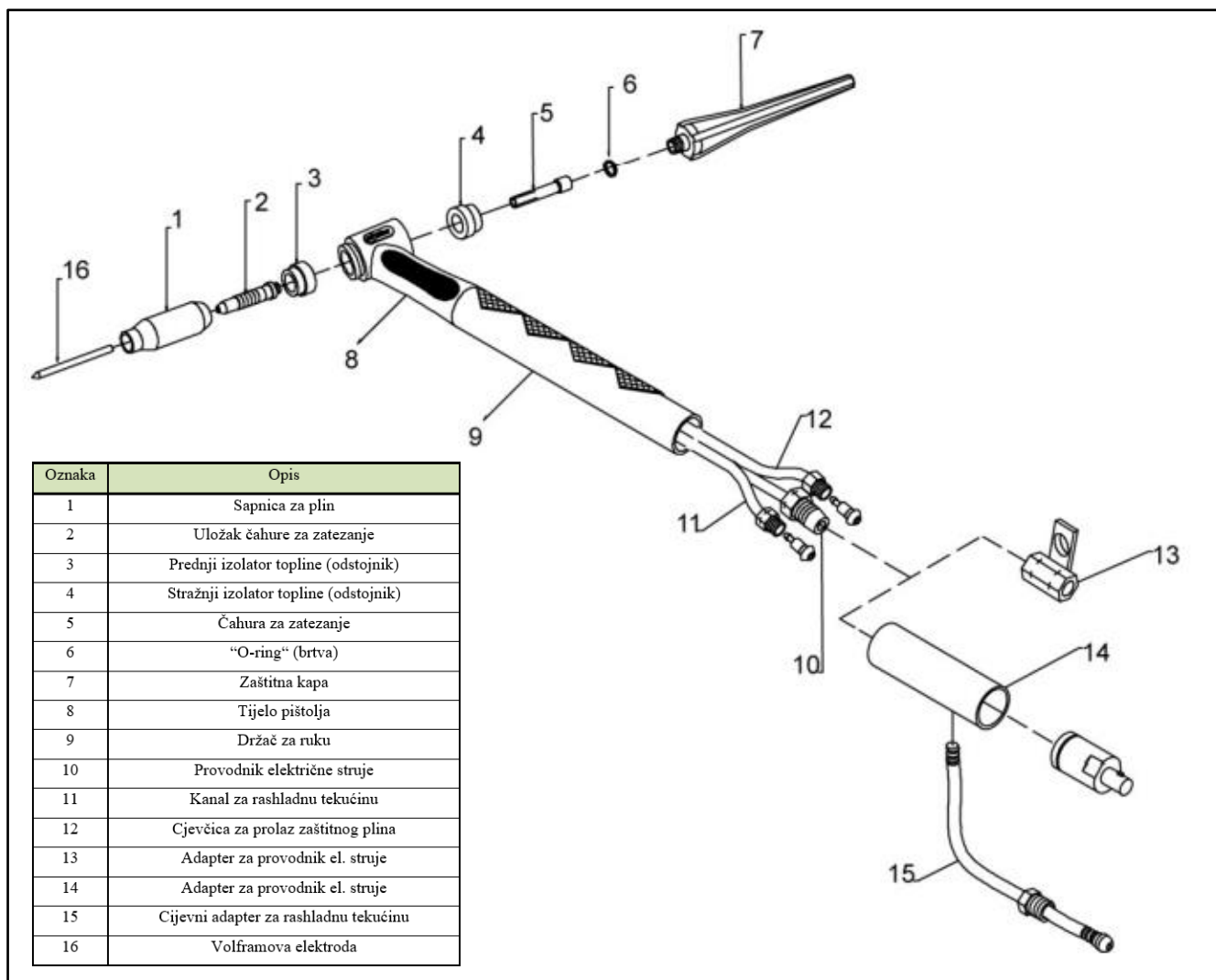


Slika 5.8. Osnovne karakteristike pravokutnih impulsnih oblika [11]

### 5.2.2. Pištolj za ručno TIG zavarivanje

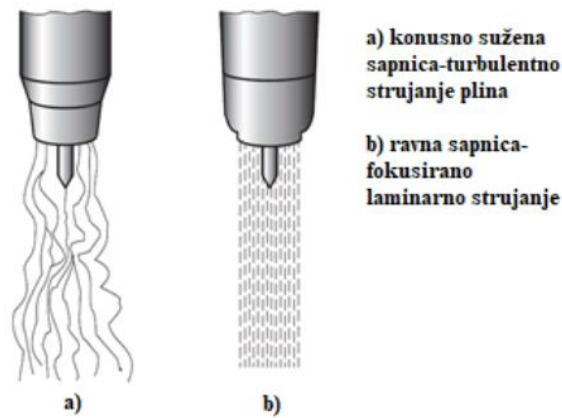
Pištolji dolaze u različitim oblicima i veličinama te se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine: sa hlađenjem rashladnom tekućinom (voda ili antifriz) i bez. Pištolji koji se hlade samo zrakom imaju područje primjene kod slučajeva manje jakosti struje pri zavarivanju (150 – 200 A) i kraćih vremenskih opterećenja. Pištolji oblikom mogu biti manji ili veći, međutim mogu se izraditi posebni oblici i veličine ako se zavarivanje provodi na teško dostupnim mjestima. Još i postoje pištolji u obliku olovke i posebno savitljivi koje zavarivač rukom proizvoljno deformira u željeni oblik. Na slici 5.9. prikazana je tipična vrsta pištolja koja se najčešće koristi i njegovi osnovni dijelovi. Glavni dijelovi tog pištolja su: držač za ruku, sapnica za plin, stezač elektrode sa steznom kontaktnom cijevćicom, volframova elektroda i zaštitna kapa koja se nalazi na volframovoj elektrodi.

Svi provodnici se smještaju u držač za ruku (struja za zavarivanje, struja za komande, dovod i odvod za vodu, dovod za plin). Prekidač koji služi za ukapčanje električnih komandi nalazi se na držaču. Snop provodnika je spojen na sami pištolj (dužine 5 – 8 m) i priključen je na sami izvor električne struje zavarivanja ili na komandni ormarić [21].



Slika 5.9. Dijelovi pištolja za ručno TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem [21]

Sapnica služi kako bi se usmjerio protok zaštitnog plina te može biti različitih veličina i oblika. Izrađuju se od metala keramike i kvarcnog stakla. Keramička sapnica je najjeftinija i najčešće korištena, ali može vrlo lahko puknuti zbog svoje krhkosti. Primjenjuje se kod zavarivanja visokofrekventnom strujom. Najčešće se koristi cilindrični, konusni i profilirani oblik sapnice. Sapnice za plin odabiru se ovisno o obliku mjesta zavarivanja i vrlo je bitan njezin unutarnji promjer otvora. Veličina i oblik sapnice definiraju kvalitetu i količinu protoka zaštitnog plina. Turbulentno strujanje plina uzrokovano je sužavanjem gornje konusne sapnice, dok je laminarno strujanje izraženo donjom ravnom sapnicom (slika 5.10. i 5.11.) [23].



Slika 5.10. Utjecaj oblika sapnice na protok zaštitnog plina [11]



Slika 5.11. Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [23]

### 5.2.3. Netaljive elektrode

Ova vrsta elektrode služi za uspostavljanje električnog luka između radnog komada i gorionika, tj. provodi električnu struju. U teoriji se ne tali, međutim moguća su trošenja prilikom oblikovanja brušenjem i raznim oštećenjima prilikom nepravilnog rukovanja u procesu zavarivanja. Elektroda dužine 200 mm u prosjeku ima vijek trajanja od 30 sati. Izrađuje se od volframa koji ima veliku gustoću i talište koje iznosi 3422 °C. Kako se TIG zavarivanje kroz godine razvijalo, danas se koriste elektrode koje nisu od čistog volframa pošto postoje veći zahtjevi za uspostavom i stabilnošću električnog luka. Time rečenim, volfram se legira kako bi poboljšali radne karakteristike elektroda [22].

U tablici 5.1. prikazana je usporedba tipa elektrode s pripadajućim bojama i primjenom.

Tablica 5.1. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]

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

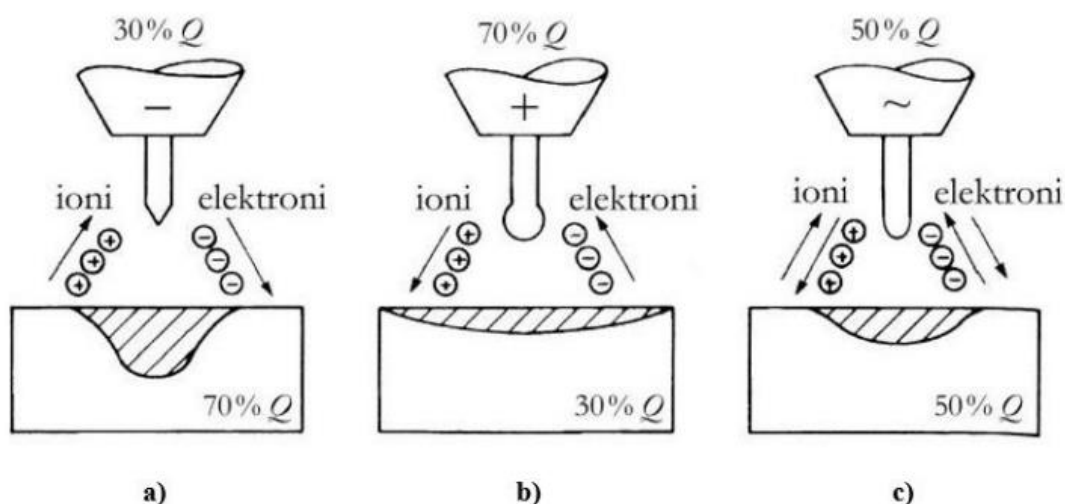
Elektrode se izrađuju u različitim promjerima (0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4; 8,0 mm), dok duljine najčešće iznose 150 mm, makar postoje i manje duljine koje se koriste i također su standardne. Priprema legirane elektrode jednako je bitna kao i pravilan izbor iste. Pravilna priprema sastoji se od izrade šiljastog ili zaobljenog vrha gdje je bitno napomenuti da geometrija elektrode ima direktan utjecaj na geometriju el. luka. Kod zavarivanja aluminija i magnezija (i njihovih legura) uglavnom se koristi zaobljeni vrh elektrode, dok se šiljata geometrija vrha zahtijeva kod svih ostalih materijala. Nestabilnost luka ili kontaminacija s drugim metalima moguće je izbjeći pravilnim brušenjem vrha elektrode [22].

### 5.3. Glavni parametri kod TIG zavarivanja

Na samu kvalitetu zavara značajan utjecaj imaju parametri poput: vrsta i jakost električne struje, vrsta i protok zaštitnog plina, napon struje zavarivanja, dodatni materijal i brzina zavarivanja [11].

#### 5.3.1. Vrsta i jakost struje zavarivanja

Moguća su tri slučaja što se tiče vrste struje zavarivanja gdje značajan utjecaj ima raspodjela topline koja se javlja u električnom luku. Ovi slučajevi su definirani ovisno o polaritetu elektrode i vrsti struje koja je primijenjena prilikom zavarivanja, a to su: DCEN (istosmjerna struja – elektroda na "-" polu), DCEP (istosmjerna struja – elektroda na "+" polu) i AC (izmjenična struja) (slika 5.12.) [22].



Slika 5.12. Prikaz smjera gibanja nosilaca naboja i intenzitet zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu el. struje [11]

Na primjeru a) prikazan je DCEN slučaj koji kao takav nudi najčešću kombinaciju struje/polariteta za TIG zavarivanje. Na pozitivan osnovni materijal elektroni se kreću s elektrode koja je spojena na negativan pol, pritom ubrzavaju kroz el. luk, dok se pozitivni elektroni gibaju u suprotnome smjeru. U ovom slučaju dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada jer kinetička energija iona ima znatno manji iznos od energije elektrona. Time je DCEN slučaj pogodan za rad s elektrodama manjeg promjera, tj. za rad s većim strujama. Koristi se za zavarivanje svih metala osim magnezija, aluminija i njihovih legura [11, 22].

Primjer b) pokazuje DCEP slučaj koji ima suprotan smjer elektrona pa je samim time drugačija raspodjela topline. Zbog toga dolazi do velikih toplinskih opterećenja elektrode. Time je ovaj slučaj pogodan za zavarivanje manjim strujama uz korištenje netaljive elektrode većeg promjera.

Za razliku od DCEN slučaja, ovdje je penetracija manja i rezultat zaobljenosti vrha elektrode je nestabilnost el. luka. Smjer pozitivnih iona razara tanke površinske okside pa je moguće zavarivati magnezij, aluminij i njihove legure [22].

Postupak AC zavarivanja prikazan je na slici c) i njime se ostvaruje dobra penetracija, dok je termičko opterećenje približno podjednako na radnom komadu i elektrodi. Ovime dolazi do promjene kretanja čestica, a time i „gašenja i paljenja“ el. luka što rezultira nestabilnošću istog. Koristi se kod metala čije je talište manje od tališta oksidnih slojeva [11, 22].

Jakost struje ima najveći utjecaj na oblik zavarenog spoja i njome je moguća kontrola dubine penetracije i depozita. Određena je sljedećim faktorima [11]:

- Vrsti električne struje,
- Rasponu jakosti struje uređaja,
- Promjeru i vrsti elektrode,
- Položaju zavarivanja,
- Debljini osnovnog materijala,
- Pripremi spoja.

### **5.3.2. Brzina zavarivanja**

U općem smislu, brzinu zavarivanja određuje jačina struje i položaj zavarivanja. Ovom brzinom se podrazumijeva kojom brzinom električni luk prođe po liniji spajanja, tj. koliko vremena treba električnom luku da prođe po radnom komadu. Brzina zavarivanja određuje unos topline u radni komad i znatno utječe na dubinu penetracije i oblik zavara. Prilikom povećanja brzine zavarivanja smanjit će se dubina penetracije i depozita. [11, 22, 24].

### **5.3.3. Protok i vrsta zaštitnog plina**

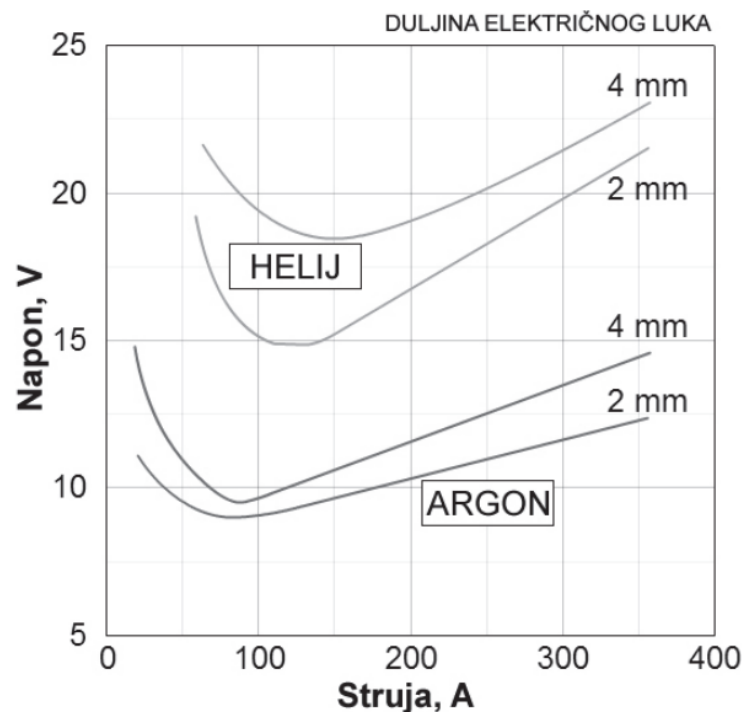
Plinovi koji se najčešće koriste su plemeniti plinovi argon i helij. Pošto su oba plina inertna, stvara se zaštitna atmosfera u kojoj nema kemijskih reakcija između osnovnog materijala i zaštitnog plina. Primarna funkcija zaštitnog plina je zaštititi rastaljeni materijal od atmosferskih utjecaja. Međutim, važno je napomenuti da zaštitni plin ima direktan utjecaj na stabilnost i kvalitetu električnog luka, estetiku i geometriju zavara te na količinu oslobođenih para tijekom zavarivanja.

Najjeftiniji inertni plin kod TIG zavarivanja je argon. Osim što je jeftin, posjeduje niski ionizacijski potencijal (15,7 eV) kojim se olakšava uspostava i stabilnost el. luka. Teži je od zraka

1,4 puta čime izlaskom iz sapnice gura zrak i time štiti rastaljeni materijal. Ovom karakteristikom postoji manja potreba za protok plina tijekom zavarivanja. U odnosu na helij, argon posjeduje nižu toplinsku vodljivost čime se dobiva kompatibilniji električni luk i time je manje protaljšivanje i penetracija. Minimalni iznos čistoće argona je 99,95 %, a u iznimnim slučajevima 99,997 %.

Helij ima viši ionizacijski potencijal u odnosu na argon (24,5 eV) čime se otežava uspostava električnog luka. Ima 10 puta manju masu od argona uslijed čega je potreban i do tri puta veći protok. Posjeduje dobru toplinsku vodljivost i daje širi el. luk. Ostvaruje se brži prijenos topline iz el. luka, veća penetracija i toplinski input. Ovo ima poseban utjecaj na zavarivanje bakra koji ima veliku toplinsku vodljivost. Minimalna zahtijevana čistoća iznosi 99,99 % [22].

Slika 5.13. prikazuje utjecaj vrste zaštitnog plina u odnosu na duljinu električnog luka.



Slika 5.13. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [23]

Kako se primjenom različitih zaštitnih plinova mijenjaju karakteristike zavarivanja, u tablici 5.2. prikazana je njihova međusobna usporedba.

Tablica 5.2. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	Smanjena	Veća nego kod 100 % Ar	Veća
Penetracija	Smanjena	Veća nego kod 100 % Ar	Povećana
Čišćenje oksida	Dobro	Slično kao kod 100 % Ar	Loše
Uspostava luka	Laka	Bolja nego kod 100 % He	Otežana
Stabilnost luka	Dobra	Bolja nego kod 100 % He	Niža kod manjih struja
Oblik luka	Uži, fokusiran	Uži nego kod 100 % He	Širi
Napon luka	Manji	Srednja	Veći
Protok	Manji	Veći nego kod 100 % Ar	Povećan
Cijena	Niža	Veća nego 100 % Ar	Veća nego 100 % Ar



## 6. Eksperimentalni dio

Cilj ovog rada jest zavarivanje bakrenih ploča TIG postupkom kako bi se pri tome utvrdili optimalni parametri. Također je potrebno provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva na zavarenim uzorcima i odrediti koliko je prihvatljiva geometrija zavarenog spoja. Nakon toga se na temelju uzoraka pripremljenih iz izvedenih zavarenih spojeva provodi savijanje u tri točke te makro analiza.

### 6.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal koristio se bakar oznake Cu-ETP u obliku lima debljine 3 mm i dimenzija 50 x 150 mm. Ovaj bakar je elektrolitički pročišćen i njegove su karakteristike prikazane u tablici 6.1. [25].

Ova vrsta bakra visoko je provodljiva i sadrži kisik. Koristi se za izradu sklopki, prekidača, električnih sabirnica i tiskarskih valjaka; također se često koristi u građevinarstvu za izradu bakrenih pokrova [26].

Prije zavarivanja su se limene bakrene ploče pripojile kako bi se spriječilo njihovo pomicanje. Nakon toga je mjesto spoja pobrušeno s ciljem uklanjanja nečistoća i nepravilnosti te kako bi zavar bio što kvalitetniji (slika 6.1.).



*Slika 6.1. Osnovni materijal [27]*

Tablica 6.1. Karakteristike Cu-ETP bakra prema normi EN 13599 [26]

Karakteristike	Mjerna jedinica	Min.	Max.	Rezultat
Udio bakra (Cu)	%	99,90	-	99,90
Vlačna čvrstoća	MPa	240,0	300,0	248,9
Istezanje	%	15,0	-	39,8
Granica tečenja	MPa	180,0	-	216,8
Električna vodljivost	m/( $\Omega$ mm <sup>2</sup> )	57,0	-	57,1

## 6.2. Oprema za zavarivanje

U ovom dijelu rada navesti će se i opisati sva oprema koja je korištena za izradu ovog eksperimenta s potrebnim karakteristikama.

### 6.2.1. Izvor struje

Kao izvor struje za proces TIG zavarivanja korišten je uređaj TRANSTEEL 3000c Pulse proizvođača Fronius (slika 6.2.). Ovaj uređaj ima integrirani dodavač žice kojim se osigurava ušteda prostora, kao i fleksibilnost te mobilnost uslijed inverterske tehnologije. Za zavarivanje koristila se istosmjerna struja (DC) i pri tome je elektroda bila spojena na negativan pol, dok je osnovni materijal bio spojen na pozitivan pol. Karakteristike uređaja prikazane su u tablici 6.1. [28].



Slika 6.2. Uređaj za zavarivanje [27]

Tablica 6.2. Karakteristike uređaja za zavarivanje [28]

Maksimalna struja zavarivanja	300 A
Minimalna struja zavarivanje	10 A
Radni napon	14,5 – 29 V
Napon praznog hoda	59 V
Mrežna frekvencija	50 – 60 Hz
Dimenzije (širina x duljina)	300 x 747 mm
Masa	36 kg
Stupanj zaštite	IP23

### 6.2.2. Zaštitni plin

Za proces zavarivanja koristio se plin oznake Aluline He50 proizvođača Messer i sastav mu je 50 % Ar i 50 % He (slika 6.3.). Protok ovog plina tijekom zavarivanja iznosio je 14 L / min.



Slika 6.3. Boca sa zaštitnim plinom [27]

### 6.2.3. Oprema za automatizaciju postupka zavarivanja

Kako bi se tijekom zavarivanja održavala konstantna brzina, korišten je uređaj kojim se vodio pištolj. Uređaj je proizvođača Promotech i oznake RAIL BULL (slika 6.4.). Osim održavanja konstantne brzine, ovaj uređaj omogućuje stezanje pištolja na željenu poziciju i time se uklanjaju moguća odstupanja u kvaliteti zavara koje bi se mogle javiti tijekom ručnog zavarivanja (slika 6.5. i 6.6.).



Slika 6.4. Uređaj za automatizirano zavarivanje – RAIL BULL [27]

### 6.2.4. Pištolj za TIG zavarivanje

Kao što je već spomenuto, pištolj za zavarivanje pričvrstio se za RAIL BULL uređaj i time se omogućila željena pozicija pištolja i elektrode u odnosu na osnovni materijal (slika 6.5. i 6.6.). U ovom eksperimentu visina je iznosila 3 mm, dok promjer sapnice pištolja iznosi 9 mm.

Elektroda koja se koristila u ovom eksperimentu dolazi pod oznakom Wla15 gold (slika 6.7.). To je netaljiva volframova elektroda u koju su dodani lantanovi oksidi.





*Slika 6.5. Položaj pištolja za zavarivanje – pozicija 1 [27]*



*Slika 6.6. Položaj pištolja za zavarivanje – pozicija 2 [27]*



*Slika 6.7. Wla15 gold elektroda [27]*

### **6.2.5. Uredaj za mjerenje temperature**

Kako bi se mjerila i kontrolirala temperatura pregrijavanja radnog komada, koristio se termometar oznake SKF TKLT 20 (slika 6.8.). Ovaj termometar nudi mogućnost mjerenja sondom pa se upravo njome vršilo kontaktno mjerenje. U tablici 6.3. prikazane su osnovne karakteristike termometra.



*Slika 6.8. Termometar SKF TKLT 20 [27]*

Tablica 6.3. Karakteristike termometra SKF TKLT 20 [29]

Karakteristika	Opis
Raspon mjerenja	od - 64 °C do 1400 °C
Raspon mjerenja priložene sonde	do 900 °C
Tip sonde	K - tip termopara

### 6.3. Postupak zavarivanja

Kao što je već navedeno, prije samog postupka zavarivanja bilo je potrebno pripremiti bakrene limene ploče u „I“ sučeljeni spoj koje su se pripojile kako ne bi došlo do njihovog pomicanja. Mjesto spoja je brušeno kako bi se uklonile neželjene nepravilnosti i nečistoće. Volframova elektroda je našiljena kako bi se postigao što stabilniji električni luk. Zatim se volframova elektroda postavlja u pištolj i zajedno se stavljaju u željeni položaj na uređaju za automatizaciju. Ploče za centriranje osnovnog materijala predgrijavaju se na električnom grijaču kako bi se tijekom zavarivanja odvodilo čim manje topline. Kada ploče završe s predgrijavanjem i postavljanjem na stol, vrši se predgrijavanje osnovnog materijala na temperaturu od 320 °C. Kako bakar ima visoku toplinsku provodljivost, temperatura mu naglo pada i prilikom postavljanja osnovnog materijala u željeni položaj iznosi 130 °C, što je ujedno i konačna temperatura osnovnog materijala prije zavarivanja. Nakon zavarivanja uzorak se čisti od troske i vrši se vizualna kontrola zavara.

#### 6.3.1. Parametri za zavarivanje

Parametri koji se tijekom eksperimenta nisu mijenjali su: temperatura predgrijavanja, promjer sapnice, vrsta zaštitnog plina, protok zaštitnog plina, vrsta elektrode, udaljenost vrha elektrode u odnosu na radni komad i vrsta struje. Brzina i snaga struje su se mijenjali pa se time mijenjala količina unosa topline. Za svaki pojedini uzorak, iznosi parametara prikazani su tablici 6.4.

Pošto se unos topline mijenja tijekom promjene parametara, može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{U * I * k * 60}{v * 1000}$$

gdje je:

$Q$  – unos topline, kJ/mm;

$U$  – napon, V;

$I$  – jakost struje, A;

$v$  – brzina zavarivanja, mm/min;

$k$  - koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja ( $k = 0,6$  za TIG).

*Tablica 6.4. Parametri za zavarivanje pojedinog uzorka [27]*









Uzorak	Temperatura predgrijavanja, °C	Brzina zavarivanja, cm/min	Jakost struje, A	Unos topline, kJ/mm
1	130	10	190	1,026
2	130	12	170	0,765
3	130	12	180	0,81
4	130	12	176	0,792
5	130	15	176	0,634
6	130	15	180	0,648
7	130	18	180	0,54
8	130	16	180	0,61

### 6.3.2. Vizualna kontrola zavara

Nakon što su se uzorci ohladili, potrebno je izvršiti vizualnu kontrolu kako bi se utvrdila kvaliteta samog procesa zavarivanja. Tablica 6.5. prikazuje lice i korijen svakog pojedinog zavara.








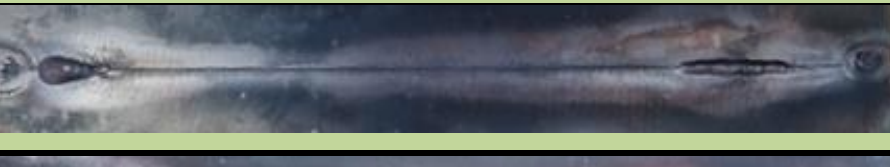
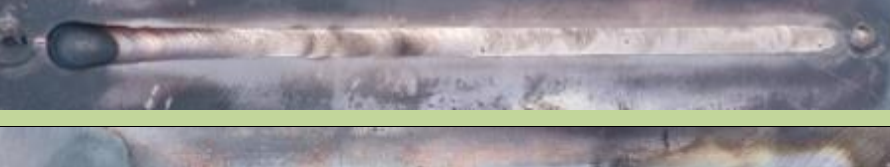

Tablica 6.5. Prikaz zavara uzoraka 1, 2, 3 i 4 [27]

Uzorak	Unos topline, kJ/mm	Dio zavara	Slika
1	1,026	Lice	
		Korijen	
2	0,765	Lice	
		Korijen	
3	0,81	Lice	
		Korijen	
4	0,792	Lice	
		Korijen	

Kao što se vidi u tablici 6.5., uzorak 1 nije ispravno zavaren pošto je došlo do progorijevanja materijala uslijed prejake struje ili premale brzine. Ovo je posljedica prevelikog unosa topline tijekom zavarivanja. Za zavarivanje uzorka 2 povećala se brzina zavarivanja i smanjila jakost struje. Ovo je rezultiralo nedovoljnom penetracijom i uzorak nije dobro zavaren. Za razliku od uzorka 1, prilikom zavarivanja uzorka 2 unos topline je bio premali. Tek pri kraju zavara je došlo do dovoljne penetracije pošto se tijekom zavarivanja stvorila dovoljna količina topline, ali unatoč tome uzorak 2 također nije zadovoljavajuć. Pošto je dovedena toplina za uzorak 1 bila prevelika, a za uzorak 2 premala, ovdje se mogu odrediti granične vrijednosti u kojima će se sljedeći uzorci zavarivati. Za uzorak 3 brzina zavarivanja ostala je ista dok se jakost struje povećala. Ovo je opet rezultiralo prevelikim unosom topline i ponovno se javilo progorijevanje materijala te time uzorak 3 nije zadovoljavajuć. Za uzorak 4 jakost struje ponovno se smanjuje što također rezultira progorijevanjem materijala, ali ovog puta pri samome kraju. Zaključak je da nijedan od prvih 4 uzorka nije zadovoljavajuć.

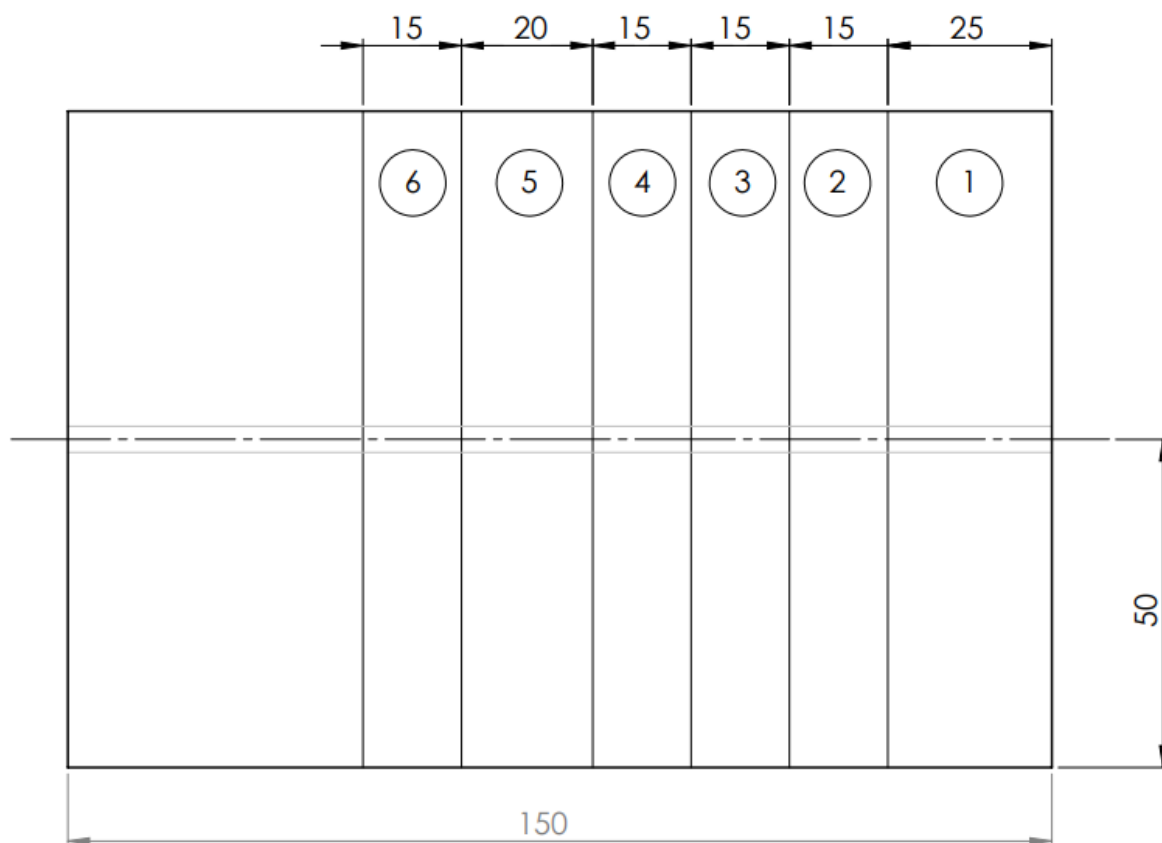
Za uzorak 5 jakost struje je ostala ista, a brzina zavarivanja se povećala. Rezultat je nedovoljna penetracija i nepotpun zavar te time uzorak nije zadovoljavajuć. Kao što se vidi u tablici 6.6., uzorak nije zavaren s korijenske strane sve do samog kraja gdje se javila dovoljna količina topline da se postigne potpuna penetracija. Za uzorak 6 jakost struje je povećan s ciljem postizanja potpune penetracije. Međutim, ishod je progorijevanje materijala pri samome kraju pa time zavar ne zadovoljava uvjete. Za zavarivanje uzorka 7 povećala se brzina zavarivanja, ali se time opet nije postigla potpuna penetracija i zavar nije zadovoljavajuć. Brzina se ponovno smanjila za zavarivanje uzorka 8 što je rezultiralo potpunom penetracijom, ali tek na drugoj polovici zavara. Uzorak 8 također ne zadovoljava uvjete.

Tablica 6.6. Prikaz zavara uzoraka 5, 6, 7 i 8 [27]

Uzorak	Unos topline, kJ/mm	Dio zavara	Slika
5	0,634	Lice	
		Korijen	
6	0,648	Lice	
		Korijen	
7	0,54	Lice	
		Korijen	
8	0,61	Lice	
		Korijen	

### 6.3.3. Priprema uzoraka za savijanje i makro analizu

Nakon što se izvršila vizualna kontrola svih uzoraka, oni se čiste od troske i oksida. Cilj ovog eksperimenta je ispitati zavar savijanjem u 3 točke i provesti makro analizu, stoga je potrebno pripremiti ispitne komade kojima će se utvrditi kvaliteta zavora. Pošto se vizualnom kontrolom utvrdilo da niti jedan ispitni uzorak nije pravilno zavaren, uzimaju se uzorci 5, 7 i 8 jer su upotrebljivi za daljnja ispitivanja. Od navedenih ispitnih uzoraka izrezuju se ispitni komadi i plan rezanja je prikazan na slici 6.9.

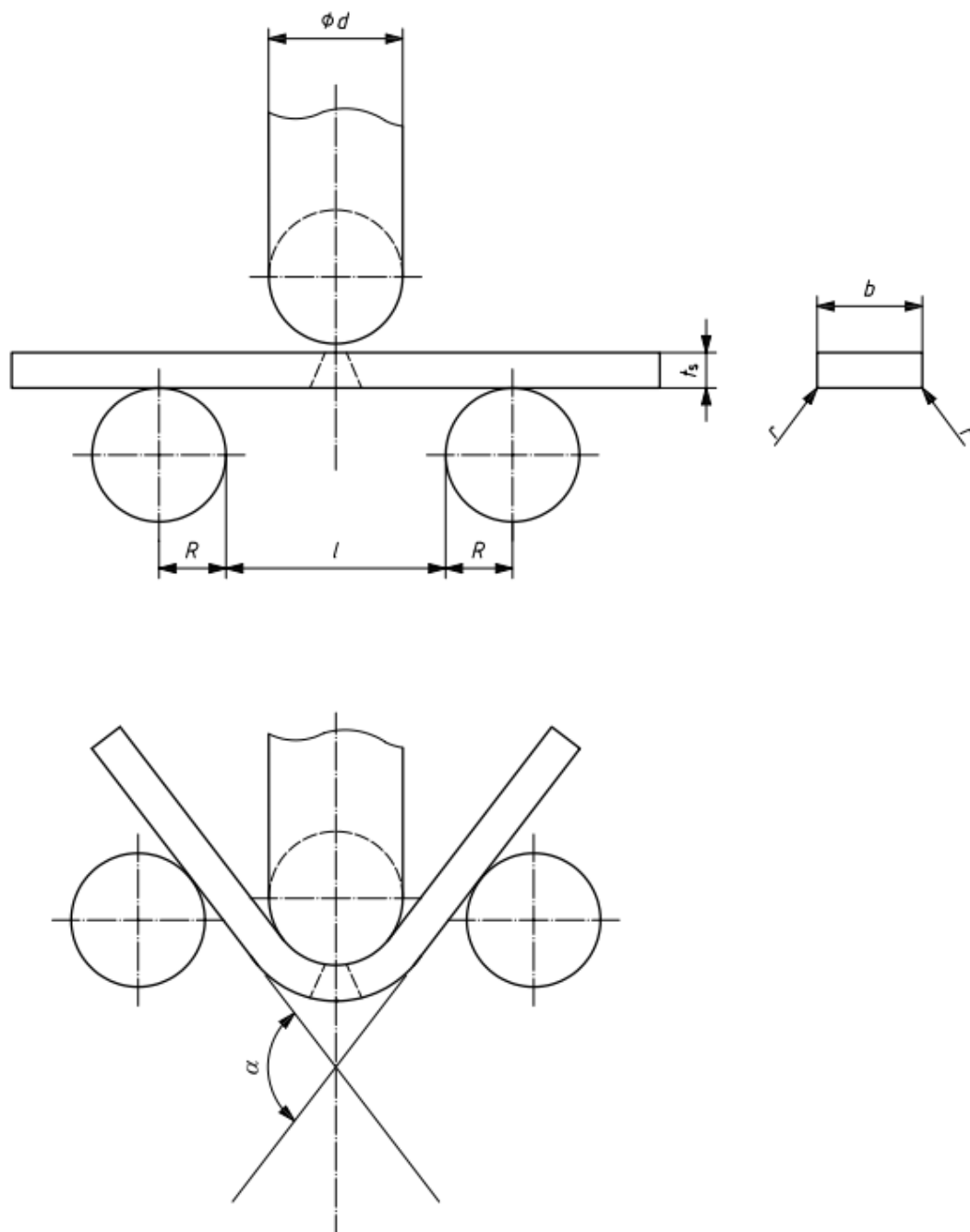


Slika 6.9. Plan rezanja ispitnih komada [27]

Pošto se zavarivanje nije vršilo od samog početka uzorka, prvi komad pod brojem 1 na slici 6.9. izrezuje se na širinu od 25 mm i odbacuje se. Nakon toga se izrezuju tri ispitna komada širine 15 mm (oznaka 2, 3 i 4), jedan od 20 mm (oznaka 5) te ponovno jedan od 15 mm (oznaka 6). Četiri komada širine 15 mm koristit će se za ispitivanje savijanjem u tri točke, dok će komad širine 20 mm ići na pripremu brušenjem i nagrivanjem te će se koristiti za makro analizu zavora. Ovaj postupak primjenjuje se za sva tri ispitna uzorka.

### 6.3.4. Savijanje uzoraka u tri točke prema BS EN ISO 5173:2009

Ovo ispitivanje se provodi kako bi se odredila čvrstoća i duktilnost zavora. Princip savijanja je da se uzorci postave na dva valjka, dok se trećim uzorak opterećuje i savija pod određenim kutem (slika 6.10.). Uvjet je da se ni na jednome uzorku ne jave pukotine, u suprotnome zavar ne zadovoljava pokus [30].



Slika 6.10. Princip savijanja u tri točke prema normi BS EN ISO 5173:2009 [30]





*Slika 6.11. Rezultat savijanja uzorka 5 [27]*

Kao što se vidi na slici 6.11., uzorak 5 nije zadovoljio pokus savijanja pošto je samo jedan od četiri ispitna komada izdržao opterećenje.



*Slika 6.12. Rezultat savijanja uzorka 7 [27]*

Uzorak 7 također nije zadovoljio pokus, ali za razliku od uzorka 5 savijanje nije izdržao niti jedan ispitni komad (slika 6.12.).



*Slika 6.13. Rezultat savijanja uzorka 8 [27]*

Što se tiče uzorka 8, od ispitnih komada samo je jedan izdržao opterećenje i to onaj koji je savijan po korijenskoj strani. S tim rečenim, uzorak 8 nije zadovoljio uvjete pokusa (slika 6.13.).

### **6.3.5. Makro analiza zavarenog spoja**

Kao što je navedeno, iz svakog ispitnog uzorka izrezuje se ispitni komad širine 20 mm čiji će se presjeci analizirati na svjetlosnom mikroskopu. Kako bi se dobila jasna slika na mikroskopu, ispitne komade je potrebno pripremiti uz pomoć brušenja, poliranja i nagrivanja.

Brušenje se izvodilo na brusilici Forcipol 1V, marke Metkon (slika 6.14.) i koristili su se brusni papiri granulacije P120, P240 i P600. Brušenje se koristi kako bi se otklonili slojevi prljavštine, adsorbiranih plinova i oksida. Uz brusni papir, potrebno je koristiti vodu kako bi se ispitni komad hladio, ispirale i uklanjale odvojene čestice, smanjilo trenje i time poboljšala kvaliteta površine.

Nakon brušenja provodi se poliranje na istoj brusilici brusnim papirom granulacije P1000 kako bi se postigla sjajna površina poprečnog presjeka. Poliranom površinom jasno su prikazani nemetalni uključci, pukotine te porozitet.



Slika 6.14. Brusilica Metkon FORCIPOL IV [31]

Nakon poliranja provodi se kemijsko nagrivanje natrijevim persulfatom kemijske formule  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  (slika 6.15.). Ovo se nagrivanje provodi kako bi se uslijed djelovanja sredstva razvila reljefna struktura i time bi granice zrna, faze i precipitati bili jasno uočljivi.

Proces nagrivanja započinje rastapanjem 20 grama nagrivajućeg sredstva u 100 ml vode. Zatim se prethodno ispolirani ispitni komadi uranjaju u tekućinu i lagano pomiču dvije minute. Zatim se reakcija prekida uranjanjem u vodu i ispiru se solnom kiselinom pošto su presjeci bili zamućeni nakon nagrivanja.



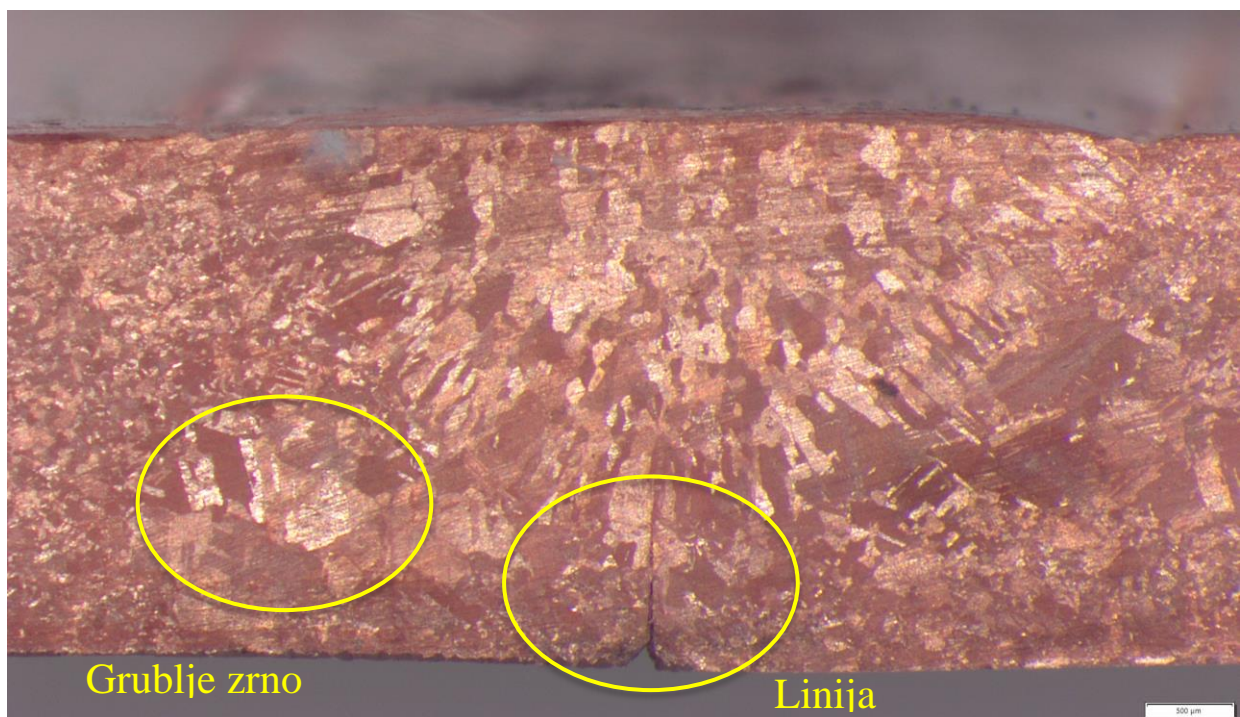
Slika 6.15. Natrijev persulfat -  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  [32]



Nakon što su se presjeci ispitnih komada pravilno pripremili, potrebno je provesti njihovu analizu na svjetlosnom mikroskopu SZX10, marke OLYMPUS (slika 6.16.). Povećanje koje se koristilo za analizu uzoraka iznosilo je 25 puta.

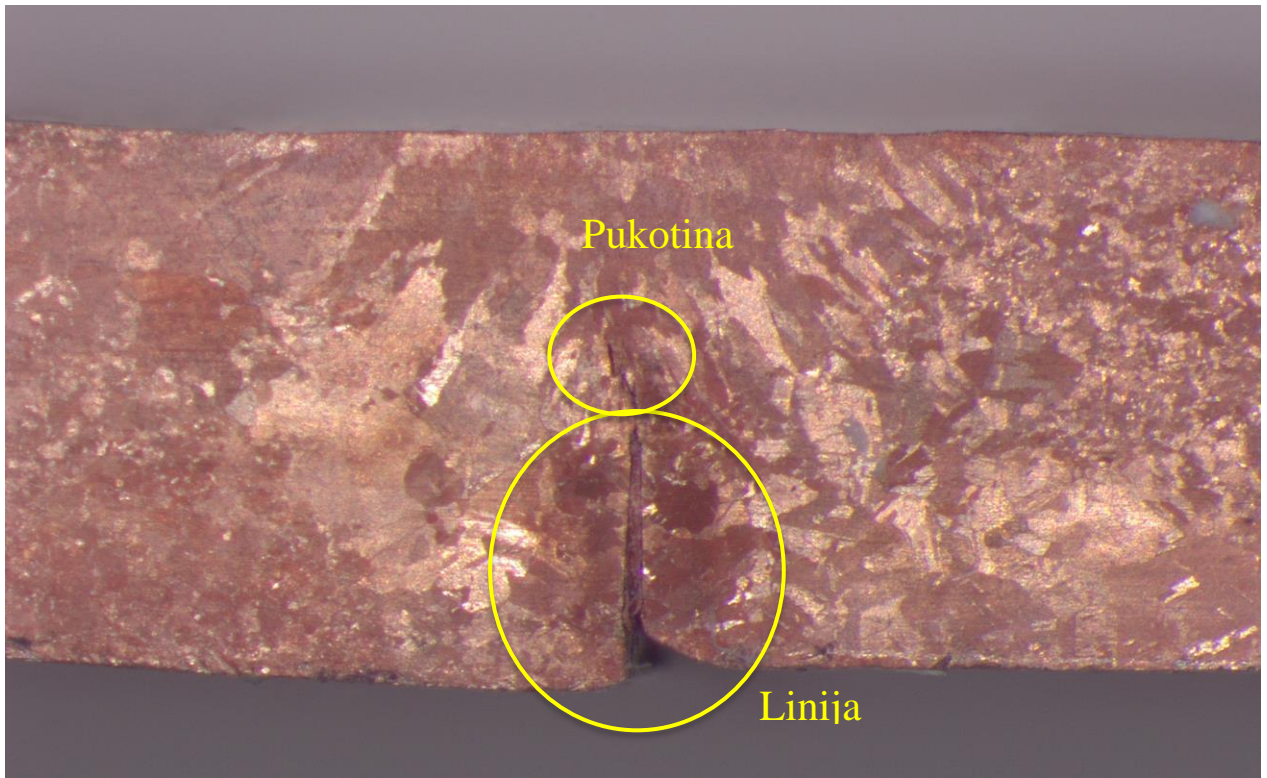


Slika 6.16. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS SZX10 [33]



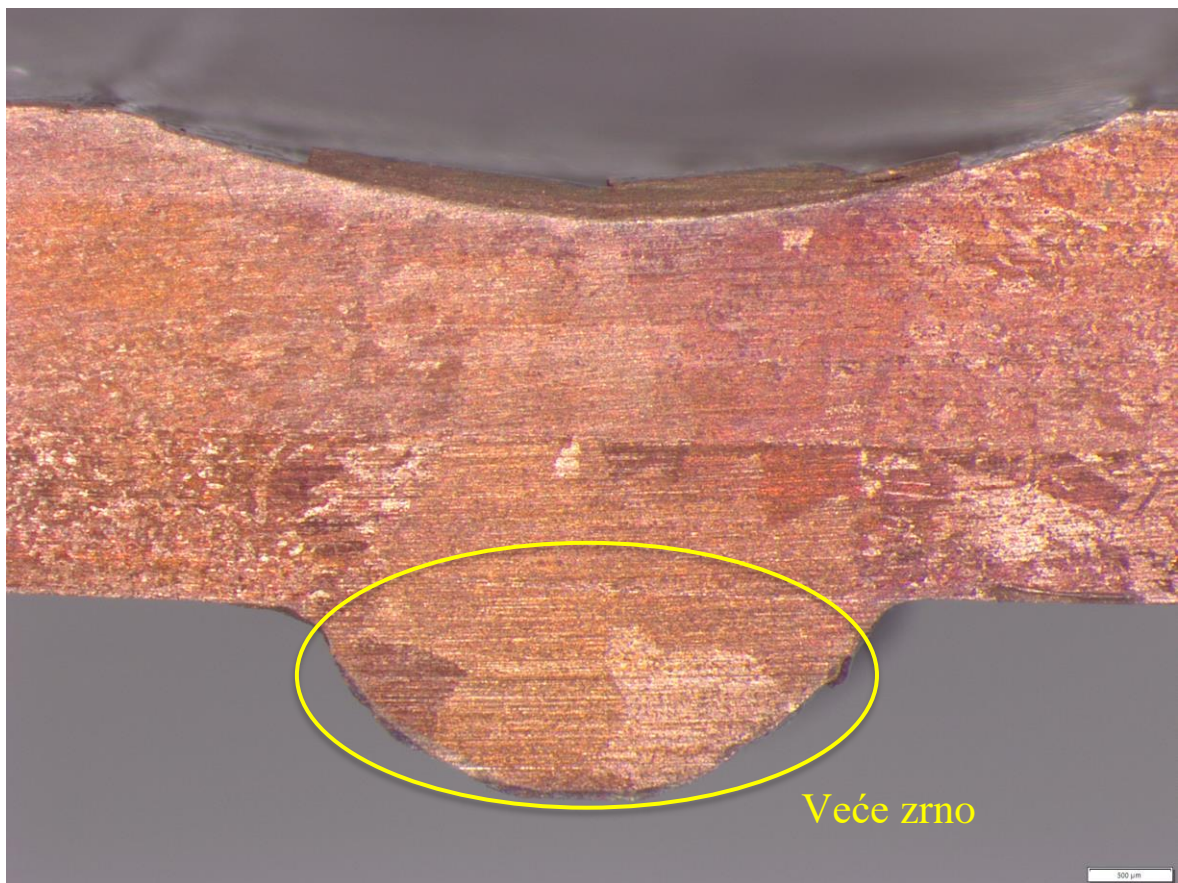
Slika 6.17. Grubozrnata mikrostruktura zavara uzorka 5 [27]

Na slici 6.17. vidljivo je kako nije postignuta potpuna penetracija i time uzorak nije pravilno zavaren. Nepotpuna penetracija uočava se linijom između limova u donjem dijelu grubozrnate mikrostrukture (linija kreće iz mjehura). Na slici je također vidljiv rast zrna prema licu zavara u zoni taljena i pojava grubljeg zrna u zoni utjecaja topline.



*Slika 6.18. Grubozrnata mikrostruktura zavara uzorka 7 [27]*

Slika 6.18. također prikazuje nepotpunu penetraciju pojavom linije. Također je izražen rast zrna prema licu zavara, kao i pogrubljenje zrna. Također je vidljiva pukotina koja se nalazi odmah iznad linije i javila se uslijed brzog skrućivanja materijala.



*Slika 6.19. Grubozrnata mikrostruktura zavara uzorka 8 [27]*

Kao što je vidljivo na slici 6.19., ispitni uzorak 8 je potpuno provaren jer nije vidljiva linija između limova. Na korijenu zavara uočljivo je veće zrno zbog brzog skrućivanja. Pošto je lim hladno valjan jasno se vidi razlika u strukturi materijala.



## 7. Zaključak

Zavarivanje bakra i legura bakra TIG postupkom zahtjevan je proces koji zahtjeva izvrsno poznavanje materijala i vještinu u manipulaciji opremom. Glavna prednost ove vrste zavarivanja je stvaranje izuzetno kvalitetnih spojeva s visokom preciznošću, što znači da se često primjenjuje u granama industrije gdje se zavaruju skupi materijali. Zbog svoje visoke toplinske provodljivosti, zavarivanje bakra zahtijeva pravilnu pripremu materijala, korištenje odgovarajućih zaštitnih plinova, pravilnu tehniku zavarivanja te hlađenja. Legure bakra, kao što su bronce i mjedi također donose specifične izazove. Zavarivanje legura može zahtijevati različite dodatne materijale i tehnike uslijed različitih točaka taljenja i ponašanja na visokim temperaturama.

U eksperimentalnom dijelu rada, zavareno je 8 uzoraka uz pomoć uređaja za automatizirano zavarivanje. Za ovaj postupak vrlo je bitno da parametri tijekom zavarivanja budu konstantni kako bi se postigla jednolika kvaliteta zavara po čitavoj duljini. U ovom eksperimentu, držati osnovni materijal na istoj temperaturi tijekom zavarivanja nije bilo moguće što je rezultiralo nejednolikim zavarom.

Na nekim uzorcima postigla se potpuna penetracija u početnom dijelu zavara, dok je u drugom dijelu materijal progorio. S druge strane, na nekim uzorcima u početnom dijelu zavara nije se postigla potpuna penetracija čime se nije stvorio korijen zavara. Međutim, uslijed zagrijavanja materijala tijekom zavarivanja stvorila se dovoljna toplina da materijal bude provaren u završnom dijelu zavara. Unatoč stalnim korekcijama jakosti struje i brzine zavarivanja nije dobiven niti jedan pravilno zavaren uzorak. Uzorci 5, 7 i 8 odabrani su kao jedini upotrebljivi za daljnja ispitivanja.

Kao što je i očekivano, uzorci nisu zadovoljili ispitivanje savijanjem u tri točke pošto su se javile pukotine na licu i korijenu zavara. Makro analizom prikazana je dubina penetracije, širina zavara, zona utjecaja topline i zona taljenja. Također su uočljive pukotine, rast zrna te prisutnost većih zrna uslijed brzog skrućivanja.

Potencijalno rješenje za dobivanje zadovoljavajućeg zavara je korištenje promjenjive brzine zavarivanja pošto nije moguće napraviti zavara dobrih svojstava s konstantnom brzinom i jednolikim unosom topline. Time bi brzina zavarivanja u početnome dijelu bila manja i postepeno bi se podizala prema kraju zavara. Također se mogu koristiti veći uzorci kako bi se povećalo odvođenje topline s ispitnih uzoraka. U tom slučaju, uzorci koji su progorjeli na samom završetku zavarivanja zadovoljili bi eksperiment pošto neće biti dovoljno topline za progorijevanje materijala.

Zahvaljujući kontinuiranim unaprjeđenju opreme i razvoju tehnologije, postupak TIG zavarivanja ostaje kao ključna tehnika za spajanje bakra.

## 8. Literatura

- [1] S. Golubić: Tehnički materijali 1. dio – Metalni materijali, Bjelovar, 2019.
- [2] <https://miamiminingco.com/hr/2023/12/28/bakar-osnovni-metal-u-na%C5%A1em-svakodnevnom-%C5%BEivotu-i-kolekcijama/> , dostupno 20. 06. 2024.
- [3] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2009.
- [4] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: MATERIJALI 1, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2014.
- [5] <https://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/Obojeni%20metali%20i%20legure.pdf> , dostupno 26. 06. 2024.
- [6] N. Šajatović: Hrapavost površine bakrenih legura dobivena obradom odvajanjem čestica, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [7] <https://www.numizmantika.com/proizvod/veliko-anticko-rimsko-broncano-koplje-45cm/> , dostupno 28.06.2024.
- [8] <https://proleksi.lzmk.hr/13699/> , dostupno 28. 06. 2024.
- [9] L. Tarle: Korozijska zaštita bakra fosfornim kiselinama, Završni rad, FKIT, Zagreb, 2019.
- [10] M. Gojić: TEHNIKE SPAJANJA I RAZDVAJANJA MATERIJALA, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, MF, Sisak, 2008.
- [11] L. Obelić: A-TIG zavarivanje bakra i legura bakra, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.
- [12] T. Mršić: Postupci zavarivanja u automobilskoj industriji, Završni rad, PMF, Split, 2021.
- [13] M. Bušić: Dokumentacija u proizvodnji zavarenih konstrukcija – Predavanje 1, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2023.
- [14] [https://old.unisb.hr/kth/zavar/tii/vr\\_spo.pdf](https://old.unisb.hr/kth/zavar/tii/vr_spo.pdf) , dostupno 17. 07. 2024.
- [15] M. Sermek: Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja, Završni rad, UNIN, Varaždin, 2019.
- [16] Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika Bionda, Filip Diplomski rad Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2018.
- [17] <https://proinstal.hr/moze-li-se-koristiti-argon-co2-mjesavina-za-tig-zavarivanje/> , dostupno 26. 07. 2024.
- [18] <https://servus.hr/strucni-clanci/4-pitanja-koja-si-trebate-postaviti-prije-automatskog-tig-zavarivanja/> , dostupno 26. 07. 2024.
- [19] M. Bušić: Proizvodne tehnologije - Predavanje 1, UNIN, Varaždin, 2022.
- [20] N. Babić: A-TIG ZAVARIVANJE DUPLEX ČELIKA, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.
- [21] L. Čolić: Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [22] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: TEORIJSKE I PRAKTIČNE OSNOVE TIG POSTUPKA ZAVARIVANJA, Technical journal 8, 426-432, 2014.
- [23] F. Bionda: Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2018.
- [24] S. Sivac: Robotizirano MAG zavarivanje, Završni rad, Fakultet politehničkih nauka, Travnik, 2019.
- [25] M. Švogor: A-TIG zavarivanje Cu-ETP bakra, Diplomski rad, UNIN, Varaždin, 2022.

- [26] Copper and copper alloys - Copper plate, sheet and strip for electrical purposes (EN 13599:2014)
- [27] M. Hrastinski: TIG zavarivanje bakra i legura bakra, Osobna arhiva, UNIN, Varaždin, 2024.
- [28] <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/transsteel-3000c-pulse/> , dostupno 20. 09. 2024.
- [29] <https://www.reliabilitydirectstore.com/TKTL-20-ThermoLaser-p/skf-ktl%2020.htm> , dostupno 21. 09. 2024.
- [30] Destructive tests on welds in metallic materials - Bend test (BS EN ISO 5173:2010 + A1:2011)
- [31] <https://faculty.ozyegin.edu.tr/gbbasim/grinder-polisher/> , dostupno 23. 09. 2024.
- [32] <https://termopasty.com/en/products/sodium-persulfate-b327/> , dostupno 25. 09. 2024.
- [33] <https://www.mccrone.com/product/olympus-szx10-zoom-stereo-microscope/> , dostupno 25. 09. 2024.

## Popis slika

Slika 2.1. Bakrena pločica [2] .....	2
Slika 2.2. Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [3] .....	4
Slika 2.3 Dijagramski prikaz stanja Cu – Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b) [6] .....	9
Slika 2.4. Mikrostruktura $\alpha$ -mjedi: a) CuZn30, hladnogiječeno stanje, b) CuZn20Pb, lijevano i žareno stanje [2] .....	10
Slika 2.5. Mikrostruktura ( $\alpha+\beta$ )-mjedi (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [2] ..	12
Slika 2.6 Rimsko brončano koplje [7] .....	16
Slika 2.7. Brončano posuđe [8] .....	16
Slika 2.8. Dijagram stanja Cu-Sn: a) ravnotežno stanje, b) žareno stanje, c) lijevano stanje [2].....	17
Slika 2.9. Mikrostruktura kositrene bronce P.CuSn14. (Povećanje 250:1) [2] .....	19
Slika 2.10. Dijagram stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10 % Al [2] .....	21
Slika 2.11. Promjena električnog otpora Cu-Ni legura pri 0 °C (a) i termonapon Cu-i legura u odnosu na željezo pri 816 °C (b) [2].....	29
Slika 4.1. Presjek i elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [11] .....	33
Slika 4.2. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva [11] .....	37
Slika 4.3. Položaji zavarivanja za limove - sučeljeni spojevi [14] .....	39
Slika 4.4. Položaji zavarivanja za limove – kutni spojevi [14] .....	40
Slika 4.5. Položaji zavarivanja za cijevi (cijev - cijev) [14] .....	40
Slika 4.6. Položaji zavarivanja za cijevi (cijev - lim) [14] .....	41
Slika 5.1. Ručno TIG zavarivanje [17] .....	43
Slika 5.2. Automatizirano TIG zavarivanje [18] .....	43
Slika 5.3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [20].....	45
Slika 5.4. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad .....	46
Slika 5.5. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [11] .....	47
Slika 5.6. Osnovni dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [21].....	48
Slika 5.7. a) Uspostava el. Luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk [22] .....	49
Slika 5.8. Osnovne karakteristike pravokutnih impulsnih oblika [11] .....	50
Slika 5.9. Pištolj za ručno TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem i numeriranim dijelovima [21] .....	51

Slika 5.10. Utjecaj oblika sapnice na protok zaštitnog plina [11].....	52
Slika 5.11. Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [23].....	52
Slika 5.12. Prikaz smjera gibanja nosilaca naboja i intenzitet zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu el. struje [11].....	54
Slika 5.13. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [23].....	56
Slika 6.1. Osnovni materijal [27].....	58
Slika 6.2. Uređaj za zavarivanje [27].....	59
Slika 6.3. Boca sa zaštitnim plinom [27].....	60
Slika 6.4. Uređaj za automatizirano zavarivanje - RAIL BULL [27].....	61
Slika 6.5. Položaj pištolja za zavarivanje - pozicija 1 [27].....	62
Slika 6.6. Položaj pištolja za zavarivanje - pozicija 2 [27].....	62
Slika 6.7. Wla15 gold elektroda [27].....	63
Slika 6.8. Termometar SKF TKLT 20 [27].....	63
Slika 6.9. Plan rezanja ispitnih komada [27].....	69
Slika 6.10. Princip savijanja u tri točke prema normi BS EN ISO 5173:2009 [30].....	70
Slika 6.11. Rezultat savijanja uzorka 5 [27].....	71
Slika 6.12. Rezultat savijanja uzorka 7 [27].....	71
Slika 6.13. Rezultat savijanja uzorka 8 [27].....	72
Slika 6.14. Brusilica Metkon Forcipol 1V [31].....	73
Slika 6.15. Natrijev persulfat - Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> [32].....	73
Slika 6.16. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS SZX10 [33].....	74
Slika 6.17. Grubožrnata mikrostruktura zavara uzorka 5 [27].....	74
Slika 6.18. Grubožrnata mikrostruktura zavara uzorka 7 [27].....	75
Slika 6.19. Grubožrnata mikrostruktura zavara uzorka 8 [27].....	76



## Popis tablica

Tablica 2.1. Mehanička i fizikalna svojstva bakra [1] .....	3
Tablica 2.2. Električna i toplinska vodljivost bakra (izvod iz DIN-a 1708) [3] .....	5
Tablica 2.3. Najznačajnije legure bakra [5] .....	7
Tablica 2.4. Sastav i primjena najvažnijih vrsta mesinga [6] .....	8
Tablica 2.5. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s cinkom i olovom i višekomponentnih legura bakra s cinkom – izvod iz DIN 1709 [2] .....	13
Tablica 2.6. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s niklom i cinkom [2] .....	15
Tablica 2.7. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih Cu-Sn legura [2] .....	18
Tablica 2.8. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s kositrom bakra i bakra s kositrom i cinkom (DIN 1705) [2] .....	20
Tablica 2.9. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s aluminijem (alumijska bronca) – DIN 17665 i 17672 [2] .....	23
Tablica 2.10. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s aluminijem – DIN 1714 [2] .....	24
Tablica 2.11. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s olovom i kositrom – DIN 1716 (izvod) [2] .....	26
Tablica 2.12. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s niklom – DIN 17664 i 17672 (izvod) [2] .....	28
Tablica 3.1. Temperaturno područje taljenja i toplinska provodljivost nekih bakrenih legura [10] .....	31
Tablica 4.1. Podjela elektrolučnog zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063 [13] .....	34
Tablica 4.2. Podjela elektrolučnog zavarivanja sa zaštitnim plinom (HRN EN ISO 4063) [13] .....	34
Tablica 4.3. Podjela elektrotopnog zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063 [13] .....	34
Tablica 4.4. Maksimalne gustoće snage i minimalne površine zagrijavanja za pojedine izvore energije [10] .....	36
Tablica 4.5. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva - 1. dio [11] .....	37
Tablica 4.6. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva - 2. dio [11] .....	38
Tablica 4.7. Označavanje i primjena zavarenih i lemljenih spojeva - 3. dio [11] .....	39

Tablica 5.1. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23] .....	53
Tablica 5.2. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23] .....	57
Tablica 6.1. Karakteristike Cu-ETP bakra prema normi EN 13599 [26].....	59
Tablica 6.2. Karakteristike uređaja za zavarivanje [28].....	60
Tablica 6.3. Karakteristike termometra SKF TKLT 20 [29].....	64
Tablica 6.4. Parametri za zavarivanje pojedinog uzorka [27].....	65
Tablica 6.5. Prikaz zavara uzoraka 1, 2, 3 i 4 [27].....	66
Tablica 6.6. Prikaz zavara uzoraka 5, 6, 7 i 8 [27].....	68