A-TIG zavarivanje bakra i legura bakra

Obelić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:832887

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

DIPLOMSKI RAD br. 023/STR/2020

A-TIG ZAVARIVANJE BAKRA I LEGURA BAKRA

Luka Obelić

Varaždin, listopad 2020.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN

Studij Strojarstva

DIPLOMSKI RAD br. 023/STR/2020

A-TIG ZAVARIVANJE BAKRA I LEGURA BAKRA

Student:
Luka Obelić, 0936/336 D.

Mentor:
dr. sc. Matija Bušić

Varaždin, listopad 2020.

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Luka Obelić | MATIČNI BROJ 0936/336 D

DATUM | KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA A- TIG zavarivanje bakra i legura bakra

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

MENTOR dr.sc. Matija Bušić | ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član
3. prof. dr. sc. Živko Kondić, član
4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član
5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 023/STR/2020

OPIS

U teoretskom 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 obraditi ručno TIG zavarivanje i izvedenicu TIG zavarivanje sa aktivacijskim premazom. Opisati utjecaj aktivacijskog premaza i fizikalne osnove procesa.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima legure bakra provesti A-TIG zavarivanje uz varijaciju sastava aktivacijskog premaza. Na zavarenim uzorcima potrebno je provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva i odrediti prihvatljivost geometrije zavarenog spoja. Na temelju rezultata donijeti zaključke o utjecaju pojedinih komponenti u aktivacijskom premazu na penetraciju pri zavarivanju. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

REPUBLIKA HRVATSKA 4 SVEUČILIŠTE SJEVER

ZADATAK URUČEN 22.10.2020 | POTPIS MENTORA M. Bušić

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Matiji Bušiću, na pruženoj mogućnosti izrade diplomskog rada. Zahvaljujem na pomoći, ustupljenoj literaturi, vodstvu i pruženom znanju koje sam dobio prilikom izrade rada, a ponajviše hvala na strpljenju koje je imao za mene.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i obitelji koji su bili uz mene i pružali mi potporu u svakom obliku te bez njihove potpore ne bih došao do ove stepenice u svom obrazovanju.

Zahvaljujem se prijateljima i kolegama na zajedničkom svladavanju studijskih obaveza te lijepom i nezaboravnom druženju. Hvala profesorima i asistentima na pruženom znanju i poticaju za daljnjim učenjem i usavršavanjem.

I na kraju zahvaljujem se curi koja me je poticala i vjerovala u mene do samoga kraja.

Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada je odrediti utjecaj aktivacijskih premaza na zavarljivost bakra. Za zavarivanje je korišten automatizirani A-TIG postupak zavarivanja tokom kojeg su se mijenjali sastavi aktivacijskih premaza, jačina struje zavarivanja i brzina zavarivanja.

U prvom dijelu diplomskog rada nalazi se teorijski dio vezan uz bakar i bakrene legure. U ovom dijelu opisuju se kemijska i fizikalna svojstva čistog bakra ali isto tako i legure bakra, tj. podjela na legure bakra s cinkom i legure bakra bez cinka. te na kraju opis svojstva zavarljivosti bakra. Nakon toga slijedi uvod u postupak zavarivanja i podjela elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom prema normi HRN EN ISO 4063. U nastavku se detaljnije obrađuje TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja i nakon toga A-TIG zavarivanje koje se koristi u eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada.

U drugom dijelu diplomskog rada ili tzv. eksperimentalnom dijelu opisuje se postupak zavarivanja bakra A-TIG postupkom ovisno o vrsti (sastavu) aktivacijskog premaza i brzini zavarivanja. U početnom dijelu drugog dijela diplomskog rada opisani je uređaj za automatsko A-TIG zavarivanje i korišteni aktivacijski premazi. Nakon toga dolazi se do eksperimentalnog dijela gdje se vrši zavarivanje bakrenih uzoraka i na kraju ispitivanje kvalitete zavara.

Ključne riječi: bakar i legure bakra, TIG zavarivanje, A-TIG zavarivanje, aktivacijski premaz, kvaliteta zavarenog spoja

Summary

The aim of this thesis is to determine the impact of activation coating weldability of copper. For welding was used automated A-TIG welding procedure during which were changed activation coating compositions, welding current strength and the welding speed.

First part of thesis contains theoretical part related to copper and copper alloys. This section describes the chemical and physical properties of pure copper and as well as copper alloys, divided into copper alloys with zinc and copper allyos without zinc and finally a description of the weldability properties of copper. This is followed by and introduction to the welding process and the division of welding according to the standard HRN EN ISO 4063. Furthermore, TIG (*Tungsten Inert Gas)* welding procedure is described more detailed and after that A-TIG welding which is used in experimental part of this thesis.

Second part of thesis, experimental part, describes the A-TIG process of welding copper depending on the type (composition) of the activation coating and the speed of welding. In the initial part of the second part of the thesis, the device for automatic A-TIG welding and used activation coatings are described. Afther that, the experimental part is performed, which include welding of copper samples and finally testing the weld quality.

Key words: copper and copper allyos, TIG welding, A-TIG welding, activation coating, welded joint qualitiy

Popis korištenih kratica

Kratica	Opis
AC	Alternating Current
A-TIG	Activated Tungsten Inert Gas
BCC	Body Centered Cubic
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DC	Direct Current
DIN	Deutsches Institut für Normung
EL	Električni luk
EM	Elektronski mlaz
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
FBTIG	Flux-Bonded Tungsten Inert Gas
FCC	Face Centered Cubic
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HCP	Hexagonal Close Packed
HRN	HRvatska Norma
ISO	International Organization for Standardization
K-TIG	Keyhole Tungsten Inert Gas
L	Laser
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
P	Plazma
PP	Plinski plamen
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
SCC	Stress Corrosion
T	Talina
TIG	Tungsten Inert Gas
TKPN	Toplinski koeficijent površinske napetosti
WIG	Wolfram Inert Gas
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
HB	-	Tvrdoća prema Brinellu
$HV_{0,02}$	-	Tvrdoća prema Vickersu
I	A	Jakost struje
I_d	A	Osnovna struja
I_z	A	Impulsna struja
KV	J	Udarni rad loma
L_0	mm	Početna duljina
Q	kJ/mm	Unesena toplinska energija
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvecionalna granica razvlačenja
S_0	mm^2	Površina poprečnog presjeka
t_d	s	Trajanje osnovne struje
T_t	°C	Temperatura tališta
t_z	s	Trajanje impulsne struje
U	V	Napon
v_z	cm/mm	Brzina zavarivanja
ϑ	K	Temperatura
σ	MPa	Površinska napetost

Sadržaj

Uvod 1

1. Bakar i legure bakra 2

1.1. Nelegirani bakar 4

1.2. Mjere za suzbijanje "vodikove bolesti" 5

1.3. Niskolegirani bakar 6

1.3.1. Postupci povišenja čvrstoće 6

1.4. Klasifikacija bakrovih legura 6

1.5. CuZn legure 7

1.5.1. Hladno gnječene α-mjedi 9

1.5.2. Toplo gnječene (α+β)-mjedi 9

1.5.3. Posebne mjedi 10

1.5.4. Lijevane mjedi 13

1.5.5. Legure bakra s cinkom i niklom ("novo srebro") 14

1.5.6. Legure Cu-Zn-Sn (+Pb) 14

1.6. Legure bakra bez cinka 15

1.6.1. Kositrena bronca 15

1.6.2. Aluminijeva bronca 18

1.6.3. Olovna i olovno-kositrena bronca 22

1.6.4. Manganova i silicijeva bronca 23

1.6.5. Berilijeva bronca 24

1.6.6. Legure bakra s niklom 25

2. Zavarljivost bakra i bakrenih legura 28

3. Zavarivanje 34

3.1. Izvori energije za zavarivanje 35

3.2. Vrste zavarenih spojeva 35

3.3. Vrste postupaka zavarivanja 39

4. TIG zavarivanje 40

4.1. Uvod u TIG zavarivanje 40

4.2. Princip rada ručnog TIG zavarivanja 42

4.3. Oprema za TIG zavarivanje 45

4.3.1. Izvori električne struje 46

4.3.2. Pištolj za ručno TIG zavarivanje i sapnica 47

4.3.3. Netaljiva volframova elektroda 49
4.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod zaštitnog (inertnog) plina 50
4.4. Glavni parametri kod TIG zavarivanja 51
4.4.1. Vrsta i jakost struje zavarivanja 51
4.4.2. Brzina zavarivanja 52
4.4.3. Protok i vrsta zaštitnog plina 53
4.4.4. Dodatni materijal 55
4.5. Greške kod TIG zavarivanja 56
5. Postupak A-TIG zavarivanja 57
5.1. Uvod 57
5.2. Svojstva i sastav aktivacijskog premaza 58
5.3. Princip rada A-TIG zavarivanja 59
5.3.1. Postupci nanošenja aktivacijskog premaza 60
5.4. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavareni spoj 60
5.4.1. Marangonijev efekt 60
5.4.2. Kontrakcija električnog luka 62
5.5. Prednosti A-TIG zavarivanja i svojstva zavarenog spoja 63
6. Eksperimentalni rad 64
6.1. Opis eksperimenta 64
6.2. Osnovni materijal 64
6.3. Oprema za zavarivanje 65
6.3.1. Zaštitni plin 66
6.3.2. Izvor struje 66
6.3.3. Oprema za automatizaciju postupka zavarivanja 68
6.3.4. Pištolj za A-TIG zavarivanje 69
6.4. Aktivacijski premaz 70
6.5. Korišteni parametri 71
6.5.1. Konstantni parametri 71
6.5.2. Promjenjivi parametri 71
6.6. Opis izvođenja procesa zavarivanja 72
7. Analiza rezultata ispitivanja 73
7.1. Rezultati vizualne kontrole zavara 73
7.2. Analiza poprečnih presjeka zavarenih spojeva 76

8. Zaključak....79
Literatura....81
Popis slika....85
Popis tablica....88

Uvod

Bakar i bakrene legure pronašli su široku primjenu u elektrotehnici, zbog odličnih svojstva kao što su električna provodljivost. Dodavanjem primjesa u čisti bakar dolazi do poboljšanja osnovnih svojstva koja su pogodnija za konstrukcijske materijale, ali uz to počinje opadati električna i toplinska vodljivost. Stvaranjem "patine" (oksidnog sloj) na površini doprinosi povećanju otpornosti na koroziju u morskoj vodi i atmosferskim uvjetima. Uz odličnu duktilnost u žarenom stanju i estetske ljepote, glavne mane bakra i njegovih legura su u visokom talištu, zbog kojeg postupci obrade znatno poskupljuju i povećavaju cijenu bakra koja je prilično visoka.

Glavna podjela bakrovih legura su legure bakra s cinkom, tzv. mjedi i legure bakra bez cinka, tzv. bronce. Mjedi su najrasprostranjenije legure bakra s raznovrsnom primjenom zbog svojih odličnih svojstava kao što su: dobra električna i toplinska vodljivost, visoka otpornost na koroziju, dobra mehanička svojstva i moguća prerada u toplom i hladnom stanju. Jedina loša strana im je nikakva ili uvjetna sposobnost da se zavare. Što se tiče bronca, najpoznatija i najstarija bronca je "kositrena" bronca. Neke od njenih karakteristika su: tvrdoća, dobar električni vodič, mali koeficijent trenja i otpornost na koroziju.

TIG zavarivanje je postupak koji spada u elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnih plinova. U većini slučajeva kao zaštitni inertni plin se koriste argon i helij. Postupak TIG zavarivanja se počeo razvijati 40-ih godina prošlog stoljeća, te taj razvoj traje još i danas. U današnje vrijeme sve se više teži ka poluautomatizaciji i robotizaciji (potpunoj automatizaciji) postupaka i procesa, iako se još uvijek najčešće koristi ručni postupak TIG zavarivanja.

A-TIG postupak se počeo razvijati uslijed problema koji su se javljali tijekom zavarivanja, kao što su slaba penetracija i utjecaj malog depozita na produktivnost postupka. Nanošenjem aktivacijskog premaza na zavar spoja glavni problemi su se počeli rješavati i ovaj postupak počinje zauzimati sve veću ulogu u proizvodnji.

Otežano zavarivanje bakra i nasuprot tome razvoj A-TIG zavarivanja, sastvani je dio diplomskog rada, kojemu je cilj doći do zaključka o utjecaju sastava aktivacijskog premaza na svojstva zavarenog spoja temeljem eksperimentalnog dijela, koji će se obavljati u labaratoriju namjenjenom zavarivanju i ispitivanju svojstava zavarenih spojeva.

1. Bakar i legure bakra

Bakar kao materijal poznat je već od davnine (bakreno doba), dok su bakrene legure (bronce i mjedi) otkrivene kasnije (brončano doba) u želji za poboljšanjem oruđa i oružja. U današnje vrijeme bakar se većinom koristi u elektrotehnici, dok se bakrene legure koriste kao konstrukcijski materijali u strojogradnji i brodogradnji.

Kako bi se dobio osjećaj kakav su bakar i njegove legure materijali, potrebno ih je opisati najznačajnijim svojstvima [1, 2]:

- čisti bakar ima bolju vodljivost naspram svih metala osim aluminija (na temelju mase) i srebra (na temelju volumena),
- toplinska vodljivost je vrlo velika, što znatno utječe na zavarljivost,
- mogućnost slijevanja s nizom metala,
- osnovna svojstva čistog bakra se poboljšavaju dodavanjem legirnih elemenata, dok se pri tome smanjuje toplinska i električna vodljivost,
- legure bakra većinom imaju u žarenom stanju odličnu duktilnost, te su pogodne za kovanje, deformiranje (oblikovanje) u toplom stanju, duboko vučenje,
- stvaranje "patine" doprinosi otpornosti na koroziju u morskoj okolini i atmosferskim uvjetima,
- nemaju magnetska svojstva,
- nema alotropskih modifikacija,
- kao nedostatke imaju: visoko talište i cijenu,
- ne smiju se koristiti u dodiru s prehrambenim proizvodima ili za preradu namirnica jer stvaraju otrovnu zelenu prevlaku (bakrov acetat),
- opasnost od vodikove krhkosti kod temperatura većih od 500 °C uz H_2 i CO, dolazi do difuzije (materijal ispuca),
- neotporan prema oksidirajućim kiselinama.

Bakar zauzima vodeće pozicije kao tehnički materijal što se tiče raznovrsnosti primjene, dok njegova potražnja razvojem novih tehnologija i otkrićem novih legura još više raste [3].

Bakar kao čisti element je metal s FCC (plošno centrirana kubična) kristalnom rešetkom. Sadrži 12 kliznih sustava što znači da je bakar duktilniji u odnosu na metale s HCP kristalnom rešetkom koji su manje duktilni [4].



Slika 1. Elementarni bakar [5]

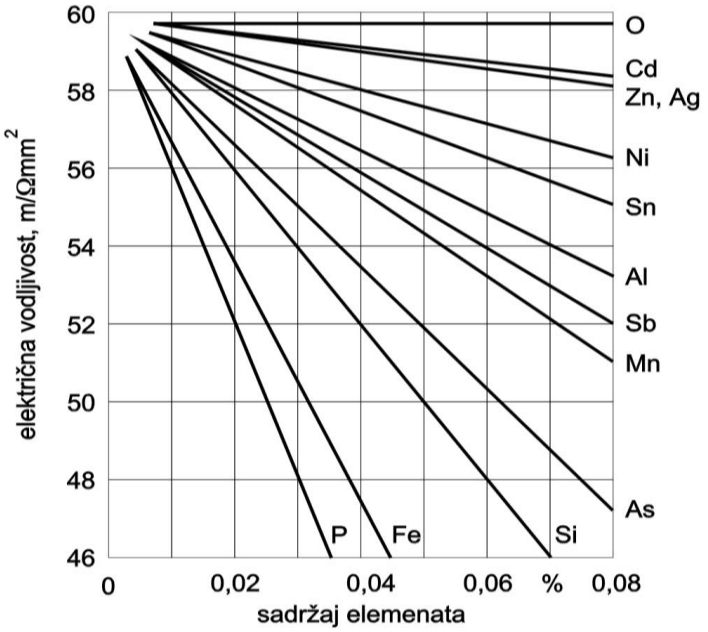
U tablici 1. navedene su karakteristike i vrijednosti za fizikalna i mehanička svojstva bakra, koja variraju ovisno o stanju u kojem se nalazi.

Tablica 1. Karakteristična svojstva bakra [1, 3]

Simbol	**Cu**
Atomski broj	**29**
Atomska masa	**63,57 $\cdot 10^{-27}$ kg**
Gustoća	**8930 kg/m^3**
Talište	**1356 K**
Vrelište	**2573 K**
Električna vodljivost	**35-58 m/Ωmm^2**
Toplinska vodljivost	**240-386 W/mK**
Temperaturni koeficijent istezanja (toplinska rastezljivost)	**$17 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}**
Modul elastičnosti	**125000 MPa**
Vlačna čvrstoća*	**200-360 MPa**
* ovisno o stanju	

1.1. Nelegirani bakar

Električna vodljivost je jedna od najvažnijih tehničkih svojstava bakra. U velikoj mjeri svojstva bakra ovise o čistoći bakra, tako primjese topljive u bakru imaju nepovoljne utjecaje. Nepovoljan utjecaj primjesa mijenja se od malog utjecaja kadmija do vrlo značajnog utjecaja fosfora. Dijagram prikazan na slici 2. prikazuje utjecaj primjesa na električnu vodljivost bakra [1].



Slika 2. Ovisnot električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [2]

Kod izmjenjivača topline bitna je dobra toplinska vodljivost bakra, ali isto tako i električna vodljivost koja se temelje na pokretljivosti slobodnih elektrona metalnih stanja. Dok u velikoj mjeri čvrstoća nelegiranog bakra ovisi o otopljenim primjesama. Povišenjem temperature naglo se smanjuje čvrstoća, te se zaključuje da zbog toga najčišći bakar ima vrlo nisku čvrstoću [1].

Dobra toplinska vodljivost dovodi do otežanog zavarivanja bakra, te su prikladne samo kvalitete bez kisika za plinsko zavarivanje. U HRN EN 1708 normi vrsta oznaka započinje slovom S. Kod nekih vrsta bakra koji sadrže kisik pod djelovanjem vodika iz zaštitnog plina, ili iz plina za zavarivanje, dolazi do opasnosti pojave "vodikove bolesti". Vodik se uvelike otapa u bakru i zbog male veličine atoma lako isparuje kroz rešetku. Ako atomi vodika u mikrostrukturi naiđu na čestice Cu_2O (bakrov(I)-oksid), dolazi do nastajanja vodene pare uzrokovane kemijskom reakcijom [1]:

$$Cu_2O + 2[H] \rightarrow 2Cu + H_2O$$

Pritom se nastala vodena para zbog svoje velike molekularne veličine, ne može više difundirati [6]. Tlak vodene pare previše naraste (100 MPa) te se po primarnim granicama zrna gdje se nalazi Cu-Cu_2O eutektik pojave vidljive pore i odvajanja zbog niske čvrstoće bakra. Nastajanjem "vodikove bolesti" bakru se snizuje čvrstoća i žilavost, što dovodi do krhkosti i neupotrebljivosti tog dijela bakra. Potrebno je baciti taj dio, jer se nastala "vodikova bolest" ne može otkloniti [2]. Ako sadržaj kisika u bakru iznosi vrijednost veću od 0,1%, bakar se više ne može preoblikovati [6].

Tablica 2. Električna i toplinska vodljivost bakra prema DIN HRN 1708 [2]

Oznaka bakra		**Kemijski sastav u mas. %**	**Elek. vodlj, m/Ωmm²**	**Toplin. vodlj, 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.

1.2. Mjere za suzbijanje ''vodikove bolesti''

Proizvođači bakra zaduženi su za povećanje otpornosti bakra na "vodikovu bolest". Korištenjem raznoraznih tehnoloških procesa kojima smanjuju udio kisika u bakru tijekom proizvodnog procesa. Neki od postupaka su [6]:

- "Polarizacija" – uranjanje mokrog drva breze u tekući bakar (postignute vrijednosti kisika u bakru iznose od 0,02 do 0,04%)
- Dezoksidacija s fosforom ili litijem (opadaju sposobnosti električne vodljivosti bakra)
- Pretaljivanje u vakuumu (moguće je postići najvišu razinu čistoće u ppm-području)

1.3. Niskolegirani bakar

Dodavanjem malih količina pravilno odabranih legirnih elemenata povisuje se čvrstoća bakra, dok je svojstvo električne vodljivosti još uvijek zadovoljavajuće. U kristalu mješancu bakra otapaju se elementi kao što su srebro (Ag) i arsen (As), dok precipitacijsko očvrsnuće omogućuju krom (Cr), željezo (Fe), kadmij (Cd), cirkonij (Zr), fosfor (P), berilij (Be). Otapanjem elemenata u kristalu mješancu dolazi do smanjenja električne vodljivosti bakra, te je potrebno precipitacijsko očvrsnuće kako bi se postigla optimalna kombinacija električne vodljivosti i čvrstoće. Ova vrsta bakra koristi se u strojarstvu i elektrotehnici, te osim čvrstoće i električne vodljivosti pokazuje dobru otpornost na popuštanje [1, 2].

1.3.1. Postupci povišenja čvrstoće

Bakrene legure se mogu očvrsnuti istim postupcima kao što se koriste i za očvršćivanje ostalih metala. Načini kojima se povisuje čvrstoća bakrenih legura su [2]:

- Legiranje do granice rastvorljivosti – rastvaranjem legirnih elemenata u čvrstoj otopini (FCC rešetci Cu) nastaje homogena mikrostruktura
- Prisutnost druge faze – kada udio legirajućeg elementa prelazi granicu rastvorljivosti u kristalu mješancu bakra stvara se dvojna (duplex) struktura od kristala mješanca bakra i obične tvrđe sekundarne faze
- Toplinske obrade – preklopnom transformacijom (aluminijeve bronce) i precipitacijskim očvršćivanjem (Cu-Be legure)
- Hladna deformacija

1.4. Klasifikacija bakrovih legura

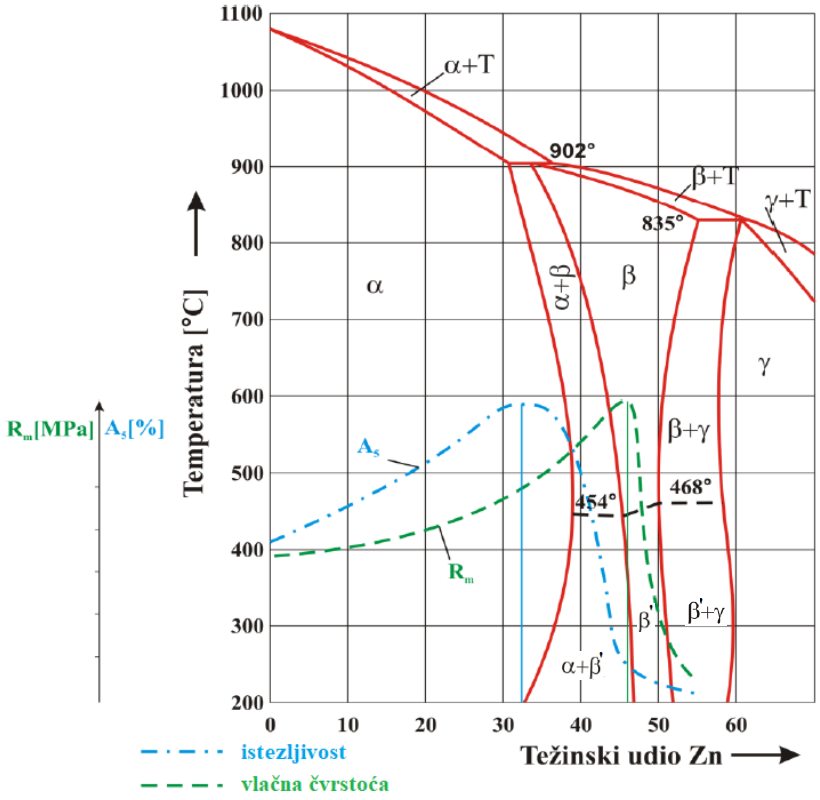
Klasifikacija bakrovih legura se obično temelji na vrsti i udjelu glavnih legirnih elemenata, ali neke vrste mogu sadržavati i druge elemente koji značajno utječu na svojstva. Tako se tradicionalnim imenima označuju glavne vrste legura: mjedi i bronce [1].

Glavne skupine bakrovih legura su [1, 2]:

1. Legure bakra s cinkom (Cu-Zn) :
    - prave mjedi (>50 %Cu i <44 %Zn) – legure bakra s cinkom
    - posebne mjedi (54-62 %Cu, oko 7 % drugih elemenata i ostalo Zn)
    - "novo srebro" (10-30 %Ni) – legure bakra s cinkom i niklom
    - "crveni metal" (Cu-Zn-Sn-Pb, >80 %Cu) – "crveni lijev"
2. Legure bakra bez cinka:
    - prave bronce (<15 %Sn) – legure bakra s kositrom, kositrene bronce
    - aluminijeve bronce (<14 %Al) – legure bakra s aluminijem
    - olovno-kositrene i olovne bronce (<10 %Sn i/ili <25 %Pb)
    - berilijeve bronce (<2 %Be) – legure bakra s berilijem
    - manganove i silicijeve bronce – legure bakra s manganom te silicijom i manganom
    - legure bakra s niklom (<45 %Ni)

1.5. CuZn legure

Mjedi spadaju u glavne legure bakra s cinkom, te su i najrasprostranjenije s raznolikom primjenom na osnovi sljedećih svojstava: dobra mehanička svojstva, dobra električna svojstva, dobra toplinska vodljivost, moguća prerada u hladnom i toplom stanju i visoka otpornost na koroziju [1]. Na slici 3. prikazan je dijagram slijevanja Cu-Zn koji je peritektičkog karaktera i prikazuje vezu između mikrostrukture i mehaničkih svojstava mjedi [7].



Slika 3. Dijagram stanja bakra i cinka i ovisnost mehaničkih svojstava o udjelu cinka [1, 7, 8]

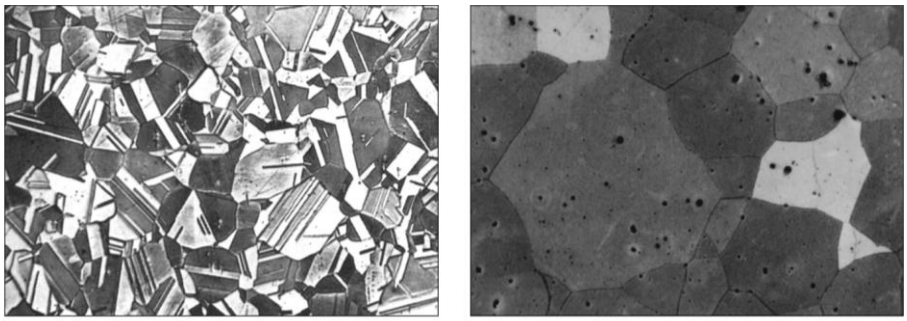
Bakar pri temperaturi od 902 °C (peritektička temperatura) otapa do 32,5 %Zn. Sa sniženjem temperature topljivost raste, tako pri temperaturi od 454 °C udio cinka iznosu 39 %. Postizanjem ravnoteže uz vrlo sporo hlađenje, udio cinka u bakru opada do 35,2 % pri 250 °C. Radi vrlo spore difuzije cinka kod industrijskih brzina hlađenja pri sobnoj temperaturi ostaje oko 37 %Zn otopljenog u kristalima mješancima bakar. Na slici 3. ta je čvrsta otopina označena kao α [1, 8].

Intermetalna faza β' pojavljuje se u mikrostrukturi porastom udjela cinka u leguri iznad 37 %. Ta faza je tvrda pri sobnoj temperaturi, ali i prilično žilava. U oblik β dovodi se zagrijavanjem iznad 454 °C, te se može oblikovat deformiranjem. Od 45 do 50 %Zn legura je monofazno, te im se mikrostruktura samo sastoji od intermetalne faze β'. Dolazak γ- faze u mikrostrukturi pojavljuje se porastom udjela cinka iznad 50 %. Ova faza je vrlo krhka i legure nisu povoljne za inženjersku primjenu. Zbog toga većina legura ne sadrži više od 44 %Zn [1, 8].

Primjena mjedi je raznovrsna. Često se primjenjuju zbog dobre hladne deformabilnosti, dobre korozijske postojanosti, ali isto tako veliku ulogu igra i estetski izgled mjedi. Loša strana mjedi je nikakva ili uvjetna zavarljivost zbog niske temperature isparavanja cinka (oko 900 °C) i udjela olova do 3 %, koji dovodi do nastajanja toplih pukotina. Za cijevi izmjenjivača topline kod hladnjaka morske vode koristi se rijetka zavarljiva legura CuZn20Al2As [6].

1.5.1. Hladno gnječene α-mjedi

To su legure koje su po mikrostrukturi jednofazno homogene. Kako bi se postigla maksimalna duktilnost kod 30 %Zn, legura mora biti visoke čistoće, jer se duktilnost već znatno smanjuje kod prisutnosti male količine uključaka. Zbog željene čistoće bakra i cinka ova je legura u proizvodnji vrlo skupa. Opasnost kod α-mjedi je nagli porast zrna koji dovodi do "spaljenja" legure. Do toga dolazi radi osjetljivosti na temperaturama žarenja (do oko 600 °C). U slučaju pregrijavanja legure, nakon sljedećeg postupka prešanja na površini metala pojavljuje se efekt "narančina kora" (zrno toliko poraste da je vidljivo golim okom) [1].



Slika 4. Mikrostruktura hladno gnječene mjedi CuZn30 (a) i lijevano i žareno stanje CuZn20Pb (b) [2]

Ova vrsta α-mjedi osjetljiva je na napetosnu koroziju (eng. season cracking). Prilikom hladnog oblikovanja na granicama zrna se nakupljaju dislokacije zbog kojih ta područja poprimaju stanja s višom energijom. Uz prisutnost manjih količina vlage i amonijaka, korozija prodire interkristalno i oslabljuje veze po granicama zrna, te dolazi do pojave pukotina zbog prisutnih zaostalih naprezanja. Kako bi se uklonio ovaj nedostatak, legura se podvrgava žarenju za smanjenje zaostalih naprezanja, koje se vrši pri temperaturi od oko 250 °C nakon prerade [1].

1.5.2. Toplo gnječene (α+β)-mjedi

Spadaju u legure koje su gotovo potpuno oblikovljive toplom preradom i sadrže do 60 %Cu i više od 37 %Zn. (α+β)-mjedi se u početnim fazama prerade oblikuju u toplom stanju, dok se za dobivanje završnih dimenzija i zadovoljavajućeg stupnja očvrsnuća za daljnju uporabu primjenjuje hladno oblikovanje. Tako se u β-mikrostrukturnom području izvodi topla prerada, dok je α-faza potpuno apsorbirana u β-fazi, zbog čega je idealno temperaturno područje za toplu preradu od 650 °C do 750 °C [1].

Tijekom tog temperaturnog intervala hlađenja dolazi do precipitacije α-faze u obliku sitnih čestica, kojem doprinosi mehanička prerada. Uz to se sprječava ponovo stvaranje grubozrnate Widmannstättenove mikrostrukture zbog koje dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava. Kako bi obradljivost ovih legura postupcima odvajanja čestica bila poboljšana, poželjna je smanjena žilavost i heterogenost. Radi toga dodaje se olovo (1 % do 3 %) koje je netopljivo u mjedi i za vrijeme rezanja uzrokuje lom, zbog mikrostrukture u kojoj je olovo raspoređeno u obliku malih kuglica [1].

Kod toplo gnječene (α+β)-mjedi postoji mogućnost nastupanja još jedne vrste korozije koja nastaje u vodenim otopinama uz lokalnu koroziju, te se još pogrešno naziva "korozija cinka" ili "otcinkavanje". Kako bi se ova pojava spriječila upotrebljavaju se posebne mjedi koje će detaljnije biti opisane u sljedećem poglavlju [1].

1.5.3. Posebne mjedi

Kao što je i ranije navedeno sastoje se od 54 % do 62 %Cu i oko 7 % udjela drugih elemenata, dok ostalo čini cink. Posebne mjedi su legure koje su toplo oblikovljive, te se često primjenjuju i u lijevanom stanju, u kojem je iznos vlačne čvrstoće viši od 700 MPa. Dok se korozijska postojanost legura povećava dodavanjem do 2 % nikla, željeza, mangana, aluminija i silicija pojedinačno i do 1 % kositra [1].

Utjecaji legirnih elemenata [1, 2]:

- Aluminij: - znatno povećava čvrstoću, dok pri tome istezljivost ostaje nepromijenjena
  - štiti mjed od oksidacije stvarajući na površini oksidni sloj
  - na povišenim temperaturama dodatak od 2 %Al štiti mjed od oksidacije
- Kositar: - u morskoj vodi povećava otpornost na koroziju
  - ima utjecaj i na povećanje čvrstoće, ali se udio kositra ograničava na 1 %, jer u protivnom (većem udjelu) smanjuje istezljivost
- Mangan: - u morskoj vodi i vodenoj pari, solima i kiselinama znatno povećava otpornost mjedi na koroziju
  - uz udio mangana do 4 % čvrstoća mjedi raste bez opadanja žilavosti
  - žilavost i istezljivost se počinju smanjivati pri udjelu iznad 4 %Mn
- Nikal: - povećava čvrstoću i otpornost na koroziju
  - utječe na usitnjenje zrna pri žarenju
- Silicij: - stvaranjem topljive troske povećava žitkost kod zavarivanja

- smanjuje zaostala naprezanja

- Željezo: - usitnjuje zrno, te se zbog toga povećava čvrstoća

U tablici 3. prikazane su vrste gnječenih legura bakra s cinkom i posebnih gnječenih mjedi, primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernice za primjenu. Podaci su uzeti iz DIN 17660 i 17672 (njemački standard).

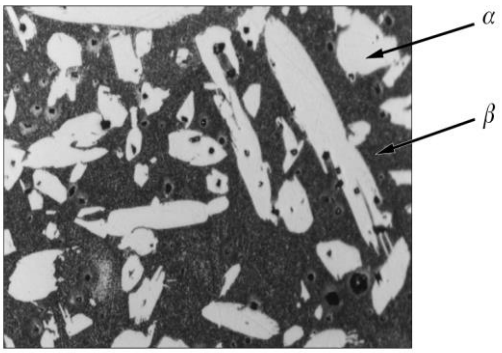
Tablica 3. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s cinkom (mjed i posebna mjed) [2, 9]

Oznaka DIN	Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva [1]				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$, N/mm² min.	R_m, N/mm² min.	A, % min	HB ≈	
CuZn15	Cu 84,0...86,0 Zn ostatak	220	310	22	95	Vrlo dobro se oblikuje hladnim postupkom; za instalacijske dijelove u elektrotehnici, umjetnički obrt, tlačne mjerne instrumente i tijela opruga.
CuZn30	Cu 69,0...71,0 Zn ostatak	230	350	30	110	Posebno pogodna za duboko vučenje; dobro lemljiva; za platiranje čelika; lisnate opruge, opružni dijelovi za spojeve utikačem.
CuZn37	Cu 62,0...64,0 Zn ostatak	250	370	27	110	Glavna legura za hladno oblikovanje dubokim vučenjem, utiskivanjem, prešanjem, valjanjem i savijanjem; dobro lemljiva i zavarljiva.
CuZn40	Cu 59,5...61,5 Zn ostatak	250	410	20	120	Dobro hladno i toplo oblikovljiva, poboljšana obradljivost odvajanjem čestica u odnosu na prethodne legure; dijelovi za okove i brave, dna kondenzatora.
CuZn36Pb3	Cu 60,0...62,5 Pb 2,5...3,5 Zn ostatak	250...350	400...460	18...12	115...140	Dobro se hladno oblikuje, dobro rezljiva ; legura za sve postupke obrade odvajanjem čestica, prikladna za obradu na automatima.
CuZn39Pb3	Cu 57,0...59,0 Pb 2,5...3,5; Zn ostatak	250...390	430...500	15...11	125...145	Vrlo dobro rezljiva; dobro toplo oblikovljiva; glavna legura za obradu na automatima – za sve vrste dijelova za obradu tokarenjem.
CuZn40Pb2	Cu 57,0-59,0; Pb 1,5...2,5; Zn ostatak					Vrlo dobro rezljiva; dobro toplo oblikovljiva, ograničeno hladno oblikovljiva; za sve postupke obrade odvajanjem čestica; za prešane profile točnih mjera; urarska mjed.
CuZn31Si1	Cu 66,0...71,0; Si 0,7...1,3; Zn ostatak	200...290	440...490	22...15	120...150	Za klizna opterećenja i kod većih opterećenja; kućišta ležajeva, vodilice i ostali klizni elementi.
CuZn35Ni2	Cu 58,0...61,0; Ni 2,0...3,0; Mn 1,5...2,5; Al 0,3...1,5	190...390	440...540	20...12	120...150	Konstrukcijski materijal srednje do visoke čvrstoće; izrada aparata, brodogradnja.
CuZn40Al2	Cu 56,5...59,5; Al 1,3...2,3; Mn 1,4...2,6; Ni ≤2; Fe≤1; Si 0,3...1,0; Zn ostatak	240...310	540...640	18...10	150...170	Konstrukcijski materijal visoke čvrstoće; legura dobro otporna na vremenske utjecaje; za povećana klizna opterećenja.
CuZn40Mn2	Cu 57,0...59,0; Mn 1,0...2,5; Fe ≤1,5; Ni ≤1,0; Zn ostatak	170...270	440...490	20...18	120...135	Konstrukcijski materijal osrednje čvrstoće; bez aluminija, lemljiv; otporan na vremenske utjecaje; Izrada aparata, arhitektura, prigušne šipke.

[1] Ovisno o dimenzijama i stupnju hladnog ugnječenja

1.5.4. Lijevane mjedi

Lijevane mjedi sadrže od 36 % do 43 %Zn i u pravilu od 1 % do 3 %Pb, dok posebne lijevane mjedi imaju još i aluminija, kositra, mangana, nikla, željeza. Ne dolazi do segregacije u zrnu zbog toga što posjeduju uski interval skrućivanja. Na slici 5. prikazana je heterogena (α+β)-mikrostruktura zbog koje ove legure nisu pogodne za hladno oblikovanje, nego se koriste u lijevanom stanju u kojem imaju povišenu čvrstoću. Dok se za specifične namjene lijevaju i α-mjedi, čija je mikrostruktura prikazana na slici 4.(b) [1].



Slika 5. Mikrostruktura (α+β)-mjedu (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [2]

U sljedećoj tablici 4. navedeni su neki od primjera lijevanih mjedi i posebnih lijevanih mjedi s pripadajućim oznakama legure, kemijskim sastavom u masenim postocima, mehaničkim svojstvima i smjernicama za primjenu. Podaci su uzeti iz DIN 1709.

Tablica 4. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s cinkom i olovom i višekomponentnih legura bakra s cinkom [2, 10]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$, N/mm^2	R_m, N/mm^2	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	Legura 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 Fe0,5...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 vretenskih preša, kućišta i tuljce mazalica pod tlakom, brodske propelere i drugo.

1.5.5. Legure bakra s cinkom i niklom (''novo srebro'')

"Novo srebro", "argentan", bijeli bakar", "alpaka", samo su neki od naziva za ovu vrstu legure srebrnaste boje, koja se dobiva dodavanjem od 10 % do 30 %Ni u legure s 55 % do 63 %Cu, dok je ostatak cink. Spadaju među najstarije metalne materijale čovječanstva otkrivene u Kini, dok su ih kasnije u Europi prvi počeli proizvoditi nijemci. Udio cinka služi za bolju livljivost i kao glavni razlog za pojeftinjenje legure. Ali isto tako treba biti pažljiv, jer previsoki udio cinka smanjuje čvrstoću i otpornost na koroziju. Po mikrostrukturi spadaju u homogene čvrste otopine (α-mješanci) koje su po mehaničkim svojstvima usporedive s mjedima. Vrlo su duktilne, dobro hladno oblikovljive i dobro se leme, ali su osjetljive na napetosnu koroziju [1, 2].

Imaju široku primjenu koja je opisana u tablici 5. gdje su još opisana mehanička svojstva, kemijski sastav odabranih legura i oznake legura iz DIN 17663, 17672 i stare HRN (hrvatska norma).

Tablica 5. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s niklom i cinkom [2, 11]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva [1)]				Smjernice za primjenu
DIN	stara HRN		$R_{p0,2}$, N/mm² min.	R_m, N/mm² 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 postojanija; 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 postojanija.

[1)] *Ovisno o dimenzijama i stupnju hladnog ugnječenja*

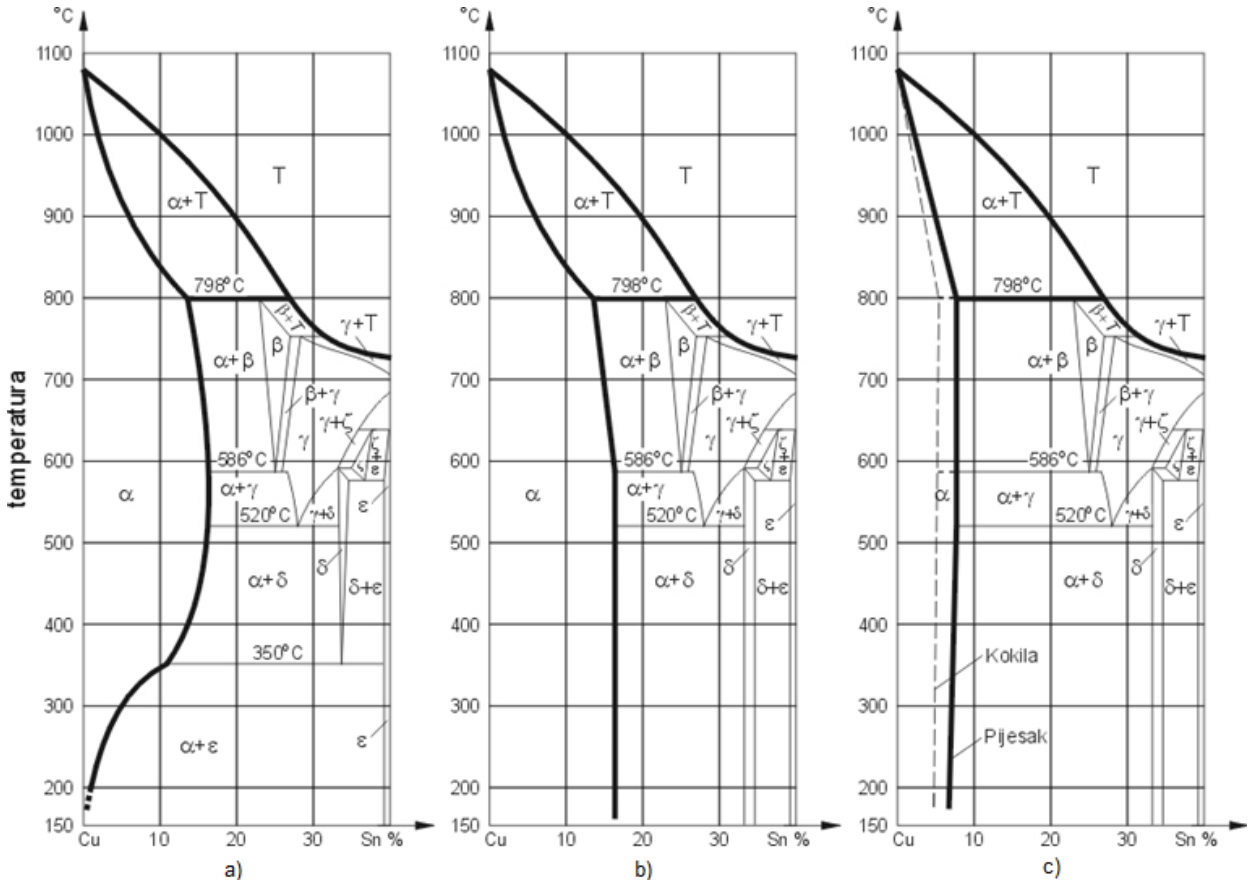
1.5.6. Legure Cu-Zn-Sn (+Pb)

Ove vrste legura su po svojstvima slične kositrenim broncama, ali su jeftinije zbog cinka u sastavu. Sadrže više od 80 %Cu, 3 % do 5 %Zn, Sn i Pb (u nekim legurama). Gnječene legure imaju naziv "crveni metal", a lijevane se nazivaju "crveni lijev" koji sadrži 4 % do 11 %Sn, 1 % do 6 %Zn i 2 % do 6 %Pb. Zbog svog sastava "crveni lijev" ima izvrsna lijevačka svojstva, klizna svojstva i otpornost na morsku vodu [2].

1.6. Legure bakra bez cinka

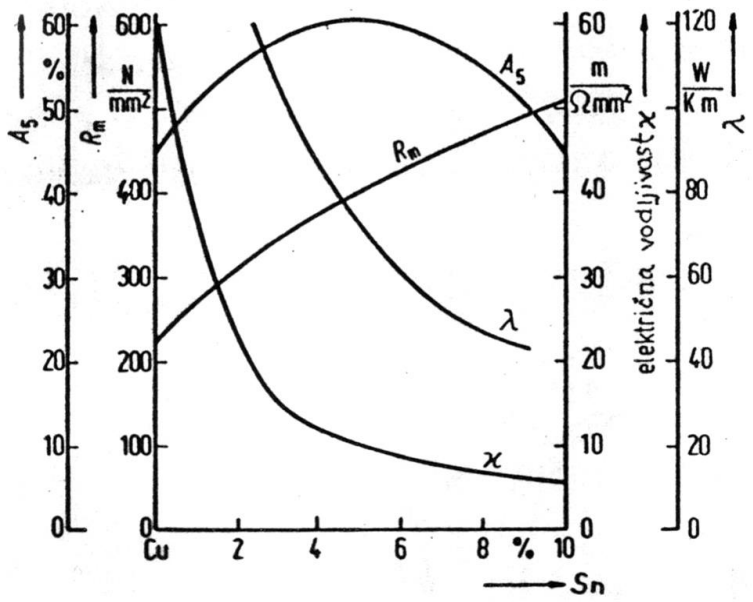
1.6.1. Kositrena bronca

Takozvana "prava bronca" spada u najstariju bakrenu leguru. Sadrži manje od 15 %Sn, uz neznatan udio drugih metala. Neka od glavnih svojstva su: tvrdoća (tvrđa od bakra), otpornost na koroziju, mali koeficijent trenja, dobar električni vodič [12]. Za ova svojstva vezana je njezina mikrostruktura koja se može opisati ravnotežnim dijagramom stanja koji je prikazan na slici 6.(a). Na dijagramu se vidi veliki razmak između likvidus i solidus linije, zbog kojeg je i između taljevine i skrućenog dijela legure velika razlika u kemijskom sastavu na bilo kojoj temperaturi. Do jakih mikrosegregacija tijekom skrućivanja dolazi zbog spore međudifuzije bakra i kositra. Dok isto tako kod Cu-Sn legura, mikrostrukturne promjene ispod približno 400 °C teku vrlo sporo. Na temelju ovih zaključaka lijevane bronce neće postići mikrostrukturno stanje koje zadovoljava ravnotežni dijagram i zato se pretežito zanemaruje dio dijagrama ispod 400 °C (Slika 6.) [1].



Slika 6. Dijagram stanja Cu-Sn: a) ravnotežno stanje, b) žareno stanje, c) lijevano stanje [1, 2]

Bronca s α-mikrostrukturom koja sadrži α kristal mješanac (čvrsta otopina) žilava je i duktilna, te se zbog toga može dobro hladno oblikovati deformiranjem. Dok u suprotnom legure koje su namijenjene za takvu vrstu obrade ne smiju imati prisutnu δ-fazu (intermetalni spoj). Sastav $Cu_{31}Sn_8$ sadrži više od 8 % Sn, zbog kojeg su veoma tvrde i krhke. Lijevane legure i s manje od 6 %Sn mogu sadržavati dijelove δ-faze po granicama α-faze, zbog djelovanja jake mikrosegregacije. Kako bi se δ-faza otklonila potrebno je leguru podvrgnuti produljenim žarenjem na 700 °C. Time se ubrzava difuzija i postiže se ravnotežno stanje kao što je vidljivo na dijagramu stanja (Slika 6.a). Nakon produljenog žarenja slijedi hlađenje na zraku ili u peći uobičajenim industrijskim brzinama, koje onemogućuje precipitaciju drugih faza. Po dijagramu stanja, teorijski se mogu hladno oblikovati i bronce do 14 %Sn (Slika 6.b), ali se u pravilu (praksi) hladno oblikuju legure do 7 %Sn, a legure do 15 %Sn se lijevaju [1].



Slika 7. Dijagram mehaničkih i fizikalnih svojstva gnječenih bronca [2]

U dijagramu (slika 7.) je vidljivo da većina svojstava opada povećanjem udjela kositra, osim vlačne čvrstoće koja raste i nakon udjela od 10 %Sn. Najveći negativni utjecaj ima na električnu i toplinsku vodljivost, kod kojih vrijednost strmovito pada. Dok istezljivost raste do otprilike 5 %Sn , a nakon toga počinje sve više padati.

Što se tiče zavarljivosti gnječenih legura, kao što su CuSn6 i CuSn8, potrebno je tijekom zavarivanja koristiti istovrsni dodatni materijal kako bi ove legure bile dobro zavarljive [6].Iznosi mehaničkih svojstava i primjena gnječenih Cu-Sn legura dani su u tablici 6. Vrijednosti su uzete iz DIN 17662 i 17672.

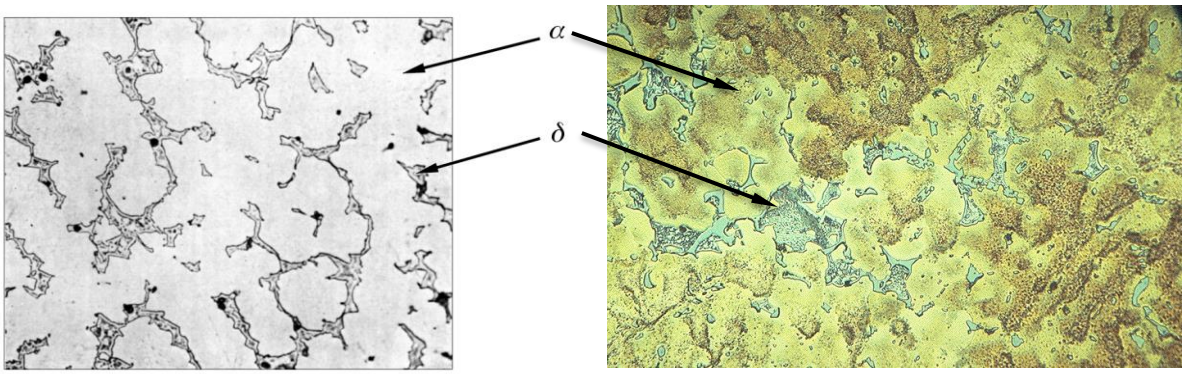
Tablica 6. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih Cu-Sn legura [2, 13]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$ N/mm² min.	R_m N/mm² min.	A % min	HB ≈	
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 ležaje.

[1] *Ovisno o dimenzijama i stupnju hladnog ugnječenja*

Za izradu kliznih ležaja najviše se koriste lijevane kositrene bronce. Glavni razlog je njihova mikrostruktura, koja u potpunosti ispunjava uvjete za tu primjenu. Čestice δ-faze doprinose otpornosti na trošenje, te se nalaze u matrici koja je u α-fazi otporna na udarce. Od preostale kemijske redukcije koja je radi uklanjanja kisika provedena prije lijevanja, većina bronci sadrži mali udio fosfora (do 0,05 %). Radi toga ih se često pogrešno naziva "fosfornim broncama". Bronce koje u masenom udjelu imaju namjerno dodan fosfor od 0,1 % do 1 % se nazivaju "prave fosforne bronce" [1].

Na slici 8. prikazan je primjer kositrene bronce u omjeru 250:1 (povećanje) i označena je δ-faza koja je umetnuta u matricu α-faze.



Slika 8. Mikrostruktura kositrene bronce P.CuSn14 [1, 2, 14]

Sastav fosforne bronce koja je gnječenjem oblikovljiva iznosi do 8 %Sn i do 0,3 %P, te su po obliku kao kositrene bronce (žice, šipke itd.). Udio fosfora poćava otpornost na koroziju i povećava čvrstoću, te smanjuje faktor trenja. Fosforne bronce koje su lijevane sadrže do 13 %Sn

i do 1 %P. Koriste se kod proizvoda koji zahtijevaju visoku žilavost i visoku čvrstoću uz nisko faktor trneja (ležaji).

Kod tih legura fosfor se povezuje s bakrom u bakrov fosfid (Cu_3P), stvarajući tvrdi spoj koji sadrži trojni eutektoid s α i δ-fazom [1].

Reducirajuće kao i fosfor, djeluje cink koji tvori cinkov oksid (ZnO). Pospješuje žitkost taljevine kod lijevanih legura, što doprinosi i livljivosti. Uz cink se još dodaje i 4 % do 6 % olova, kako bi se popunile mikropore između dendrita, tj. povećanje homogenosti legure. S manjim dodatkom legirnih elemenata, višekomponentne kositrene bronce se mogu i gnječiti (npr. CuSn4Zn4Pb4). Koriste se kod izrade valjanih košuljica za klizne ležajeve [1].

U tablici 7. navedeni su primjeri lijevanih kositrenih bronci uz opisane karakteristike iz DIN 1705.

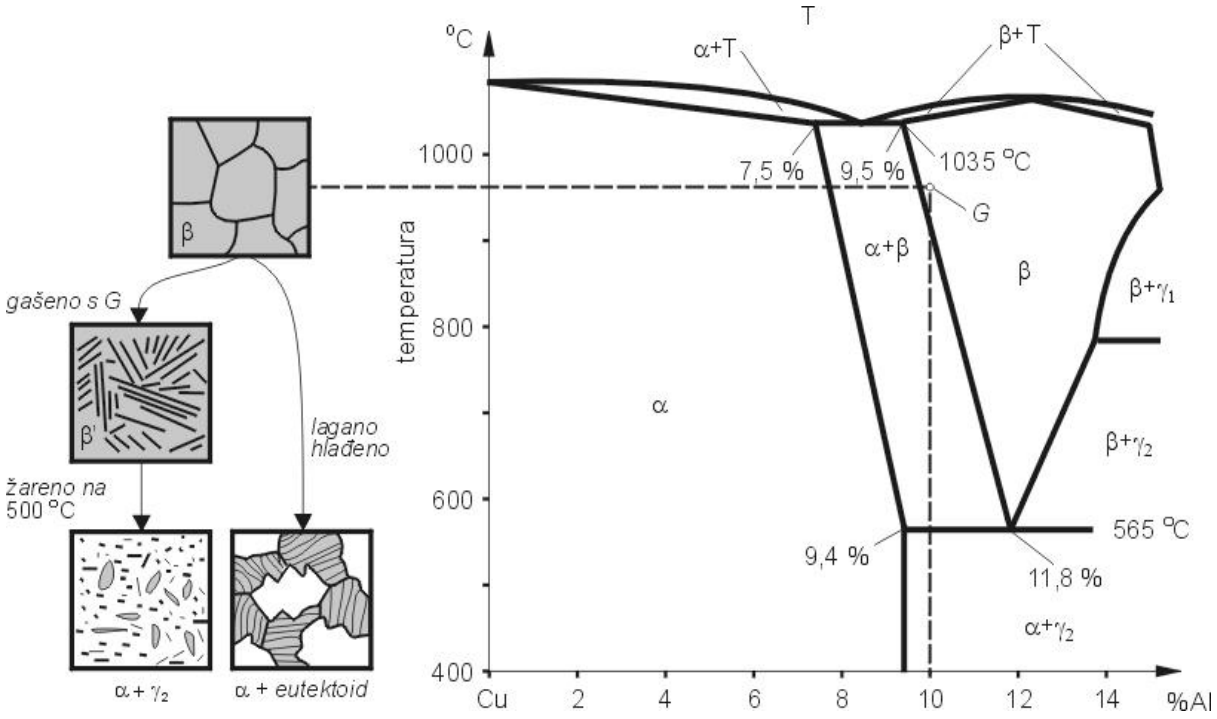
Tablica 7. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s kositrom i bakra s kositrom i cinkom [2, 15]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$, N/mm^2	R_m, N/mm^2	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 dijelovi spojki, matice vretena opterećene okretanjem vijenca 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	Legura za ležaje s dobrim mehaničkim svojstvima pri prisilnom kotrljanju i dobrom otpornošću na trošenje i morsku vodu; za udarno opterećene klizne ležaje do 60 N/mm^2, klizne letve i ploče itd.
G-CuSn10	P.CuSn10.01	Cu 88,0...89,0 Sn 9,0...11,0	130	270	18	Legura visoke žilavosti otporna na koroziju i morsku vodu; za armature i kućišta crpki, turbinska kola i crpke, dijelove u obliku cijevi za klizne otvore, ležaje, letve, matice opterećene okretanjem i sl.
G-CuSn5ZnPb	P.CuPb5Sn5Zn5.01	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, tankostijene složene odljevke i dr.

1.6.2. Aluminijeva bronca

Mogu se podijeliti u dvije glavne skupine, slično kao i mjedi: hladno i toplo oblikovljive (prva skupina) i livljive legure (druga skupina). Slično kao i kod kositrene bronce uz industrijske uvjete hlađenja ispod 400 °C, dolazi do spore difuzije zbog koje se mogu zanemariti mikrostrukturne promjene u legurama. Tako su im i svojstva poprilično slična, ali se skupi kositar

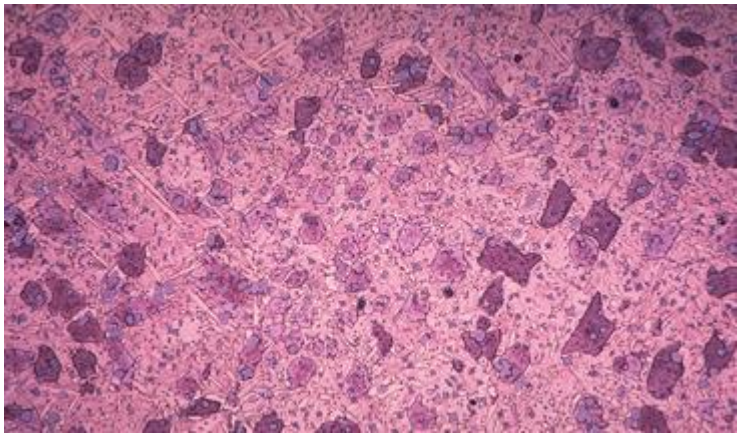
zamjenjuje aluminijem što pojeftinjuje leguru. Na dijagramu (Slika 9.) stanja Cu-Al vidljivo je da pri sobnoj temperaturi struktura jednofazna (α faza) do 9,4 %Al. Iznad 9,4 %Al legura postaje dvofazna, te se može toplo oblikovati i toplinskom obradom očvrsnuti. Javlja se intermetalni spoj γ_2-faze koji je sastava Cu_9Al_4. Faze tog tipa su tvrde i krhke, te samim time i legure čine prilično krhkima. Radi sličnosti s Fe-C dijagramom, aluminijeve bronce s oko 10 %Al podvrgnute toplinskoj obradi, dovode se do martenzitne transformacije [1, 2].



Slika 9. Dijagram stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10 %Al [1, 2]

Laganim hlađenjem bronce s 10 %Al, na sobnoj temperaturi nastaje mikrostruktura α i γ_2-faze. Zatim se iznad eutektoidne temperature (565 °C), ponovnim zagrijavanjem $\alpha+\gamma_2$ (eutektoid) prekristalizira u čvrstu otopinu β. Te kako bi se dobila monofazna čvrsta otopina β, daljnjim se zagrijavanjem na oko 900 °C α-faza u potpunosti otopi u β-fazi. Nakon toga se legura s temperature od oko 900 °C podvrgava hlađenju u vodi, nakon kojeg nastaje mikrostruktura β'-faze (nije ravnotežnog stanja te je zbog toga nema u dijagramu). Po mikrostrukturi i po svojstvima sliči martenzitu, pa je isto tako tvrda i krhak. Do precipitacije finih nakupina α i γ_2-faze, dolazi postupkom popuštanja legure na temperaturi oko 500 °C. Te konačnim hlađenjem na zraku nastaje mikrostruktura poput β' ili bainitne vrste s fino precipitiranim γ_2 (intermetalni spoj). Dok se mikrostruktura ($\alpha+\gamma_2$) može postići samo žarenjem nakon kojeg je potrebno hlađenje u peći do postizanja okolne temperature. Ove mikrostrukture su vidljive na dijagramu (Slika 9.) s lijeve

strane, gdje su označeni i postupci kojima se podvrgavaju, kako bi se postigli željeni sastavi legura [1].



Slika 10. Primjer mikrostrukture gnječene aluminijeve bronce [18]

Usprkos svim navedenim pojavama pri toplinskoj obradi, industrijska primjena aluminijeve bronce slijedi iz sljedećih svojstava [1, 2]:

- pri povišenim temperaturama zadržava čvrstoću (čvrstoća iznosi i do 700 N/mm^2),ima veliku otpornost na koroziju i oksidaciju
- na uobičajenim temperaturama uporabe ima dobru otpornost na trošenje i na koroziju
- radi lijepog estetskog izgleda služi u dekorativne svrhe, kao zamjena za zlato u izradi nakita

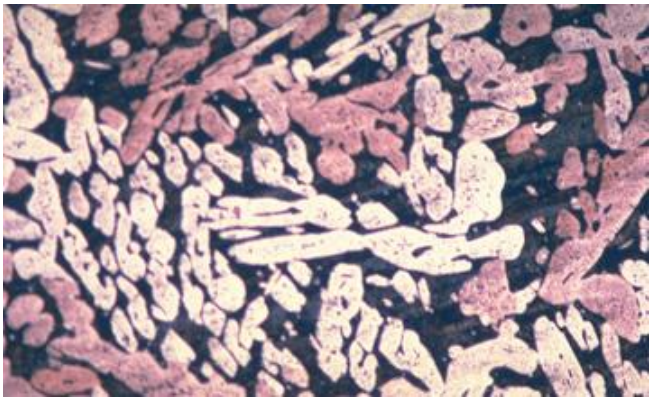
Poteškoće koje se javljaju kod lijevanja aluminijeve bronce, dovode do problema za širu uporabu. Stvara se oksidna kožica i troska na tekućem metalu, zbog oksidacije aluminija na visokim temperaturama lijevanja (iznad 1100 °C). Kako bi se ove poteškoće izbjegle, koriste se postupci neturbulentnog lijevanja, koji poskupljuju sam proizvod i time sužuje njihovu primjenu [1].

Tablica 8. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernice za primjenu gnječenih legura aluminijskih bronca [2, 16]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas. %, ≈	Mehanička svojstva [1)]				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$, N/mm² min.	R_m, N/mm² 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.
CuAl8Fe3	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	Konstrukcijski 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 ležaja, upravljački dijelovi za hidrauliku, usisni valjci (ind. papira) i sl.

[1)] *Ovisno o dimenzijama i stupnju hladnog ugnječenja*

Hladno gnječene α-legure sadrže 4 % do 8 %Al i u pravilu do 4 %Ni. Nikal doprinosi još većem povećanju korozijske otpornosti. Ove legure su našle svoju primjenu u proizvodnji toplinskih izmjenjivača i kondenzatora, zbog sastava koji doprinosi visokoj čvrstoći i korozijskoj postojanosti na temperaturi koja se kreće oko 300 °C. Dok zbog boje koja sliči na onu 18-karatnog zlato, služe za proizvodnju dekorativnih predmeta (sve rjeđe, jer ih zamjenjuje anodizirani aluminij). Neke od najprimjenjivijih legura opisane su u tablici 8. (vrijednosti izvedene iz DIN 17665 i 17672) [1, 2].



Slika 11. Mikrostruktura lijevane aluminijske bronce koja je gašena s temperature od 857 °C [18]

Lijevane i toplo gnječene legure imaju od 8 % do 12 %Al, dok im je sastav mikrostrukture $\alpha+\gamma_2$. Legure s 8 % do 10 %Al su toplo oblikovljive postupcima kao što su: valjanje ili kovanje (ovisno o daljnjoj primjeni). Osim aluminija dodaju se željezo i nikal, od svakog po 5 % udjela. Željezo doprinosi usitnjavanju zrna, te se ove legure koriste u kemijskoj industriji (visoke temperature) i za druge svrhe, ali posebice za otkovke s otpornošću na koroziju. Kao što je opisano i u tablici 8. [1].

Legure koje služe za lijevanje u pijesak ili kokilu sadrže između 9,5 % i 12 %Al s dodacima željeza i nikla (do 5 % svakog) i mangana (do 1,5 %). Ova vrsta legura ima široku primjenu u strojarstvu i brodogradnji, a opširnije je opisano u tablici 9. (izvodi iz DIN 1714) [1, 2].

Tablica 9. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih Cu-Al legura [2, 17]

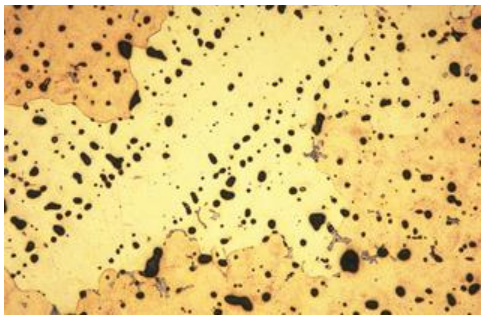
Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$ N/mm²	R_m N/mm²	A %	
G-CuAl10Fe	P.CuAl10Fe3.01	Cu min. 83,0; Al 8,0...11,0; Fe 2,0...4,0	180	500	15	Legura postojana na temp. –200 °C i +200 °C; odljevci velike čvrstoće, otporni na kiseline; za mehanički opterećene dijelove u strojogradnji, elektroindustriji automobilskoj i tekstilnoj industriji (mazalice, konusne zupčanike).
G-CuAl10Ni	P.CuAl10Fe5Ni5	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 i pužna kola i drugo.

1.6.3. Olovna i olovno-kositrena bronca

Ovim se legurama dodaje kao i mjedima do 3 %Pb, radi poboljšanja rezljivosti. Do oko 25 %Pb dodaje se legurama kojima je potrebna dobra otpornost na opterećenja (20 % veća nego kod "bijelih kovina" na bazi olova i kositra). Zbog tog svojstva, primjenjuju se za proizvodnju kliznih ležaja. Također se mogu koristiti pri većim brzinama, jer imaju i veću toplinsku vodljivost zbog koje brže odvode toplinu. Što se tiče podmazivanja, olovo privremeno djeluje kao sredstvo za podmazivanje (u slučaju izostanka normalnog podmazivanja), te imaju odličnu otpornost na trošenje i otpornost na zaribavanje. Olovno-kositrene bronce sadrže manje od 10 %Sn i manje od 28 %Pb. Svojstva su im nešto bolja što se tiče tvrdoće i otpornosti na trošenje, naspram olovnih bronca. Nekoliko primjera legura i njihovih svojstava dani su u tablici 10. (izvod iz DIN 1716) [1, 2].

Tablica 10. Kemijski sastav, mehanička svojstva, i smjernice primjene lijevanih olovno-kositrenih bronca [2. 12]

Oznaka legure		Kemijski sastav u mas. %	Mehanička svojstva, min. vrijednosti			Smjernice za primjenu
DIN	HRN		$R_{p0,2}$, N/mm^2	R_m, N/mm^2	A, %	
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 ležaje 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 ležaje 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	160	6	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 ležaje mlinova, crpki i valjaonica za hladno valjanje lima i folija itd.

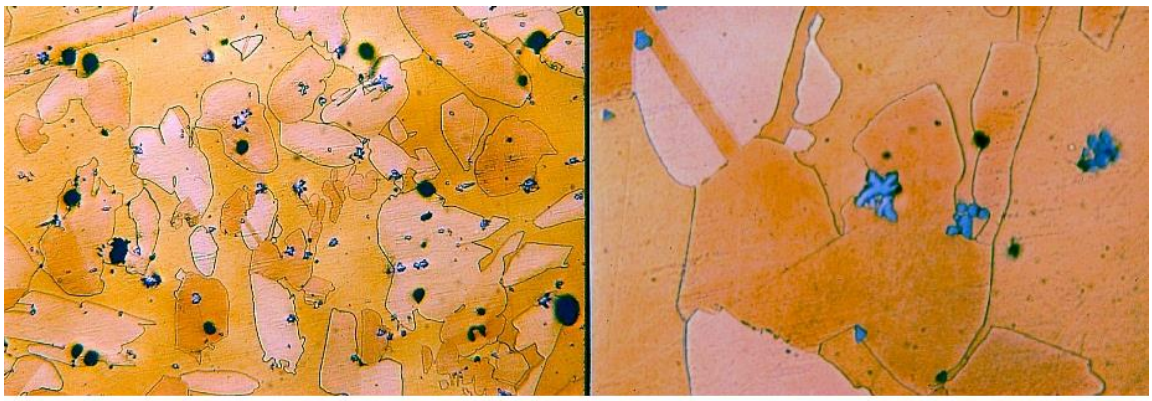


Slika 12. Primjer mikrostrukture lijevane kositrene bronce [20]

1.6.4. Manganova i silicijeva bronca

Jedna od važnijih svojstava manganovih bronca su: korozijska otpornost u morskoj vodi i velika sposobnost vibracijskih prigušenja. Mogu se lijevati, ali se također mogu hladno i toplo oblikovati. Zbog žilavosti imaju slabu rezljivost i kao nedostatak se još navodi visoka cijena [1, 2].

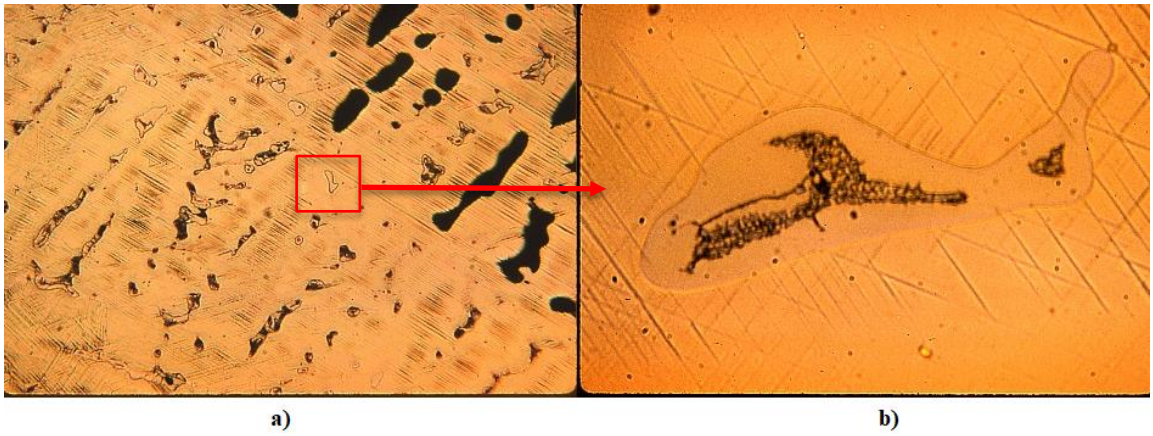
Na slici 13. prikazana je lijevana mikrostruktura legure koja sadrži 39 %Zn, 1,5%Fe, 1 %Sn i 0,1 %Mn. Plave "zvijezdice" koje su specifične za ovu leguru, nastaju zbog Fe-Zn spoja [21].



Slika 13. Primjer lijevane mikrostrukture manganove bronce: a) 100:1, b) 500:1 [21]

Što se tiče silicijeve bronce, ona rijetko sadrži samo dvije komponente. Kao i ostale legure većinom sadrži željezo, nikal, mangan, cink. Ima vrlo dobru korozijsku postojanost i izvanredno se hladno i toplo oblikuje. Čvrstoća im je osrednja, ali zato imaju visoku žilavost [1, 2]

Ovaj primjer silicijeve bronce (Slika 14.) prikazuje posebno složenu mikrostrukturu [22].

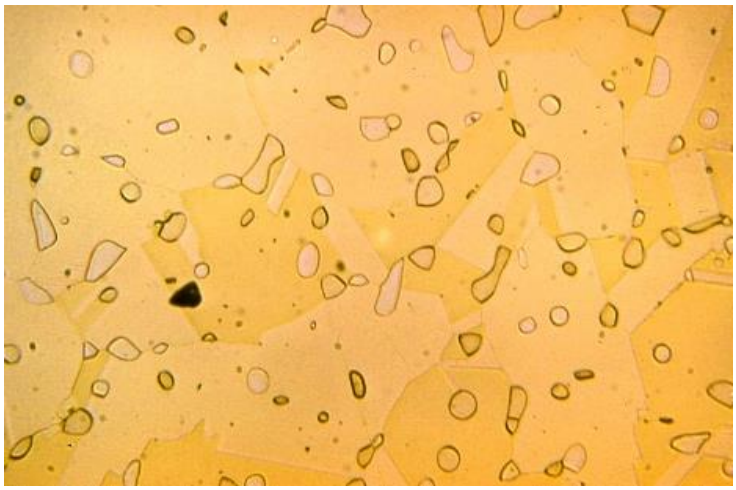


Slika 14. Primjer lijevane mikrostrukture silicijeve bronce: a) 50:1, b) 500:1 [22]

1.6.5. Berilijeva bronca

Ove legure sadrže od 1,5 % do 2 %Be i manje dodatke kobalta i nikla. Zahtjeva preciznu kontrolu složene toplinske obrade, zbog koje postiže čvrstoću do oko 1350 N/mm^2 (najviša čvrstoća među bakrovim legurama). Ostala svojstva su: dobra električna vodljivost, otpornost na trošenje, nemagnetičnost, dobra kemijska postojanost, ne iskri. Pogodne su za izradu opruga kod preciznih aparata, zatim za kalupe za preradu polimera, te za izradu neiskrećeg alata. Negativne karakteristike su toksičnost i visoka cijena legura [1, 2].

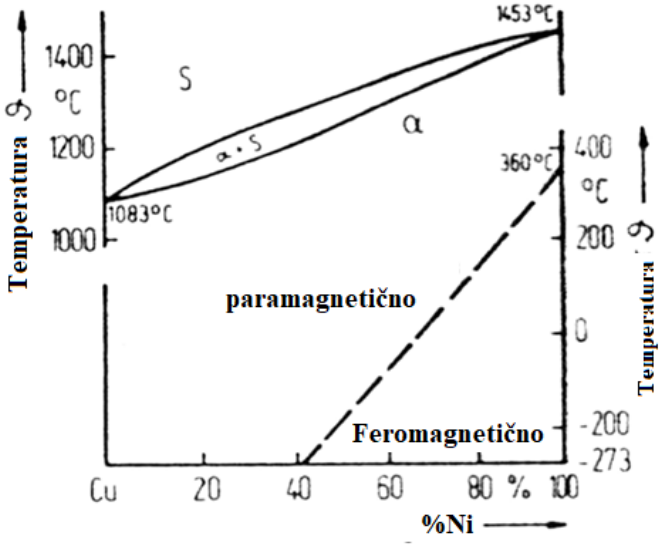
Na slici 15. prikazana je mikrostruktura berilijeve bronce koja sadrži 2 %Be i 0,25 %Ni i 0,25 %Co. Potrebno ju je pažljivo termički obrađivati kako bi se dobila dovoljna čvrstoća [23].



Slika 15. Primjer mikrostrukture berilijeve bronce, 200:1 [23]

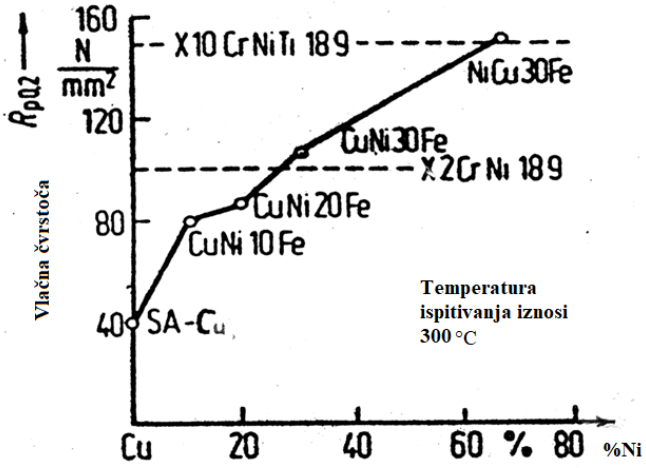
1.6.6. Legure bakra s niklom

Elementi bakar i nikal su "susjedi" u periodnom sustavu elemenata, imaju približno jednako velike atome, male razlike u gustoći i imaju istu kristalnu strukturu (FCC). Radi ovih obilježja međusobno su topljivi u svim omjerima, te tako stvaraju razne čvrste otopine. Područja s vrlo jakim mikrosegregacijama su moguća pojava u lijevanom stanju, ali se ne dovodi do precipitacije krhke sekundarne faze, kao kod ostalih bakrovih legura [1, 2].



Slika 16. Dijagram utjecaja udjela nikla na temperaturu taljenja i na temperature promjene svojstva magnetičnosti [2]

Žarenjem se postiže stanje jednolične čvrste otopine, kao što je prikazano na dijagramu (Slika 16.). Zbog odsutnosti sekundarne faze u mikrostrukturi, omogućuje vrlo dobru oblikovljivost i veliku korozijsku postojanost. Posebice otporne na koroziju u svim vodenim otopinama, a pogotovo u morskoj vodi. Što se tiče čvrstoće na povišenim temperaturama se može usporediti s nehrđajućim čelicima (Slika 17.). Korozijska postojanost se može dodatkom od 1,5 %Fe i 2 %Mn još povećati, tako da legure stvaraju pasivan sloj u doticaju s kisikom [1, 2].



Slika 17. Dijagram ispitivanja legura na vlačnu čvrstoću pri 300 °C ovisno o udjelu nikla [2]

Mogući je problem kod zavarivanja, zbog velike topljivosti vodika u bakru i niklu. Te tijekom hlađenja taljevine, topljivost se skokovito smanjuje pri temperaturi skrućivanja u metalu i ostaje topljiva količina vodika u čvrstom stanju. Potrebno je uklanjanje vlage, jer ova pojava dovodi do stvaranja pora u zavaru [2].

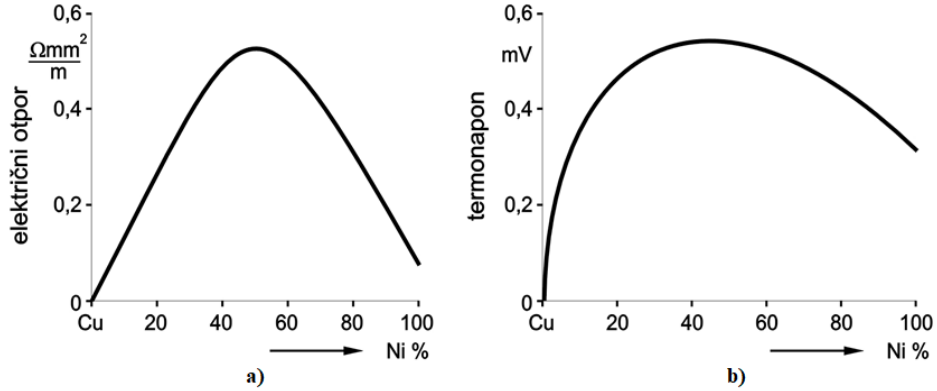
Neki od primjera gnječenih legura bakra s niklom, su prikazani u tablici 11. (izvod iz DIN 17664 i 17672).

Tablica 11. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava i smjernice za primjenu gnječenih Cu-Ni legura [2, 24]

Oznaka legure prema DIN-u	Kemijski sastav u mas.[2] %, ≈	Mehanička svojstva [1] ≈				Smjernice za primjenu
		$R_{p0,2}$, N/mm² min.	R_m, N/mm² min.	A, % min	HB ≈	
Cu Ni10Fe1Mn	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 [2]; cijevi za vodovode s morskom vodom; cijevi, ploče i podnice za kondenzatore i izmjenjivače topline kao i za predgrijače 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 [2]; 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.

[1] Ovisno o dimenzijama i stupnju hladnog ugnječenja; [2] uz P max. 0,02 %; S max. 0,02 %

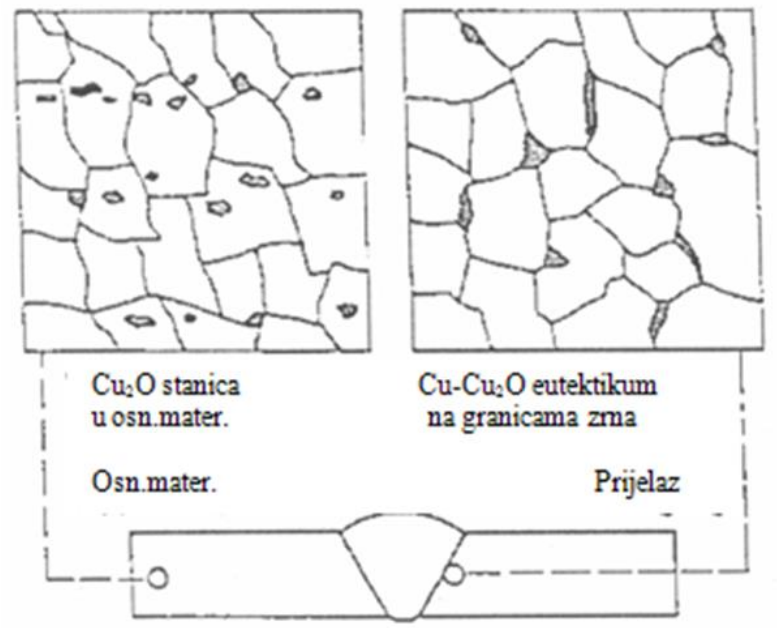
Kontinuirani porast električnog otpora kod kristala mješanca raste s količinom udjela nikla u leguri. Tako je kod 50 %Ni postignut maksimalan iznos otpor (Slika 18.a). Ali im istovremeno pada temperaturni koeficijent električnog otpora. Zbog toga se ova legura koristi za grijaće elemente ("konstantan", elektrootporni materijal). Tako se kontinuirano mijenja i termoelektrični napon koji maksimalan iznos postiže pri 45 %Ni (Slika 18.b)[1, 2].



Slika 18. Promjena električnog otpora Cu-Ni legura pri 0 °C (a) i termonapon Cu-Ni legura b) ovisno o udjelu Ni [1, 2]

2. Zavarljivost bakra i bakrenih legura

Bakar nije moguće zavariti ako u sebi sadrži kisik jer dovodi do nastajanja "vodikove bolesti", koja je ranije opisana u temi 1.2. (Mjere za suzbijanje "vodikove bolesti") i koja je prikazana na slici 19. [6].



Slika 19. Prikaz mikrostrukture bakra s udjelom kisika u osnovnom materijalu i na liniji staljivanja zavarenog spoja i osnovnog materijala [6]

Zavarljive su samo one vrste Cu koje ne sadrže udjele kisika, kao Cu-SLP i Cu-DHP. Zbog velike toplinske vodljivosti i visoke električne vodljivosti, potrebno je kod elektrolučnog zavarivanja unijeti više energije nego npr. kao kod čelika. Potrebno je predgrijavanje na temperaturu od 100 °C do maksimalno 600 °C po 1 mm debljine osnovnog materijala. Teško je održati temperaturu zbog visoke toplinske provodljivosti (bakar je šest puta bolji toplinski vodič od željeza) i potrebno je paziti da ne dođe do pregrijavanja područja oko zavara. Može doći do stvaranja površinskog oksidnog sloja, zbog selektivnog isparavanja elemenata s niskom točkom isparavanja (Cd, Zn). Kako bi se ova pojava riješila, koriste se prašci s dezoksidirajućim djelovanjem. Elektrootporno zavarivanje bakra je veoma otežano zbog ranije navedenog svojstva, velike električne provodljivosti. U tom slučaju potrebne su velike struje zavarivanja i kratka vremena, kako bi se omogućilo točkasto zavarivanje bakrenih limova (debljine do 2 m) [6, 26].

Tablica 12. Temperaturno područje taljenja i toplinska provodljivost nekih bakrenih legura [26]

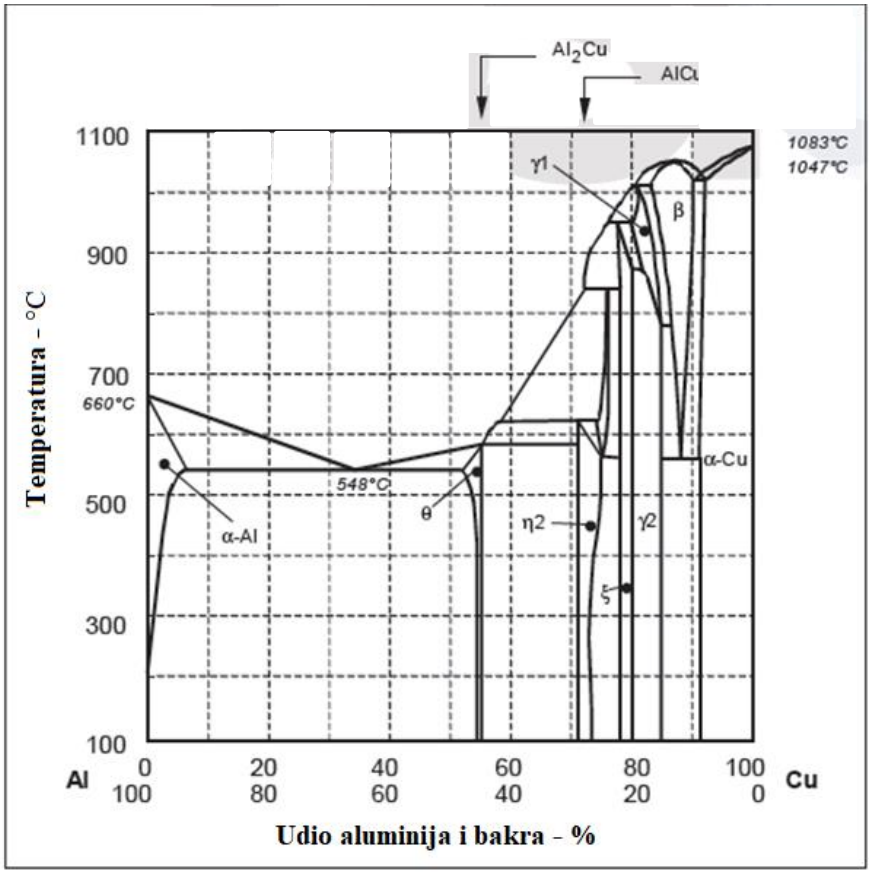
Oznaka Cu-legure	Temperaturno Područje taljenja, °C	Toplinska provodljivost $Wm^{-1}K^{-1}$
Bakar bez kisika	**1072-1097**	**390**
Bronce	**870-970**	**107-109**
Komercijalna bronca, 90 %Cu	**1030-1050**	**188**
Mjed 85 %Cu	**995-1035**	**160**
Mjed 70 %Cu	**930-960**	**120**
P-bronca	**850-1000**	**50**
Al-bronca	**1050-1150**	**67**
Si-bronca	**980-1035**	**36**
Mg-bronca	**870-900**	**105**
Cu-10 %Ni	**1100**	**45**
Cu-30 %Ni	**1180-1250**	**29**

Za zavarivanje bakra potrebni su dodatni materijali koji nisu od čistog bakra, već sadrže mali udio Ag, Ni, Mn, Sn itd. Prema DIN-1733 kod zavarivanje bakra i njegovih legura koriste se različite elektrode za zavarivanje. Tako se npr. za zavarivanje čistog bakra koristi EL-CuMn2 elektroda, a za zavarivanje kositrene bronce uzima se EL-CuSn7, EL-CuSn13 elektrode. EL-CuAl19, EL-CuAL19Ni2Fe, EL-CuMn14AL elektrode se koriste za zavarivanje aluminija. Kod zavarivanja bakra s čelikom i zavarivanja bakrenih legura koristi se specijalna bazična EZ-Bakar 1 elektroda, a za bakrove legure i zavarivanje bakra s čelikom, broncama i sivim lijevom, koristi se i EZ-Bakar 2 elektroda. Dok se kod mjedi koriste dodatni legirani materijali sa Si, Sn, Zn ili Ag, Si, Sn, Mn, Ni, Zn. [26].

Legure bakra i aluminija koje sadrže niži udio alumnija su monofazne, a od 9 do 15 %Al su dvofazne s martenzitnom ili eutektoidnom pretvorbom. Al-bronce su zavarljive, posebice TIG i MIG postupcima, bez potrebnog predgrijavanja. Kao izvor koristi se izmjenična struja za TIG postupak zavarivanja, dok se kod legura s malim udjelom aluminija može zavariti i istosmjernim izvorom s elektrodom koja je spojena na minus pol. Legure s udjelom aluminija manjim od 8,5 % postaju osjetljive na tople pukotine, dok legure koje sadrže između 9,5 %Al i 11,5 %Al se očvršćuju kaljenjem na temperaturama od 850 do 1020 °C i popuštanjem, te nakon toga više nisu osjetljive na tople pukotine i postaju vrlo dobro zavarljive. Do sljedećeg problema dolazi nastajanjem tankog oksidnog sloja (Al_2O_3) na površini, koji dovodi do poteškoća prilikom zavarivanja, te ga je potrebno otkloniti. Kod plinskog zavarivanja oksidni sloj se odstranjuje pomoću talila, ali ovaj način zavarivanja nije pogodan zbog unašanja prevelike topline.

Aluminijske bronce još je moguće zavariti REL postupkom, ali kod ovog načina zavarivanja dolazi do problema zbog uključaka troske [6, 26].

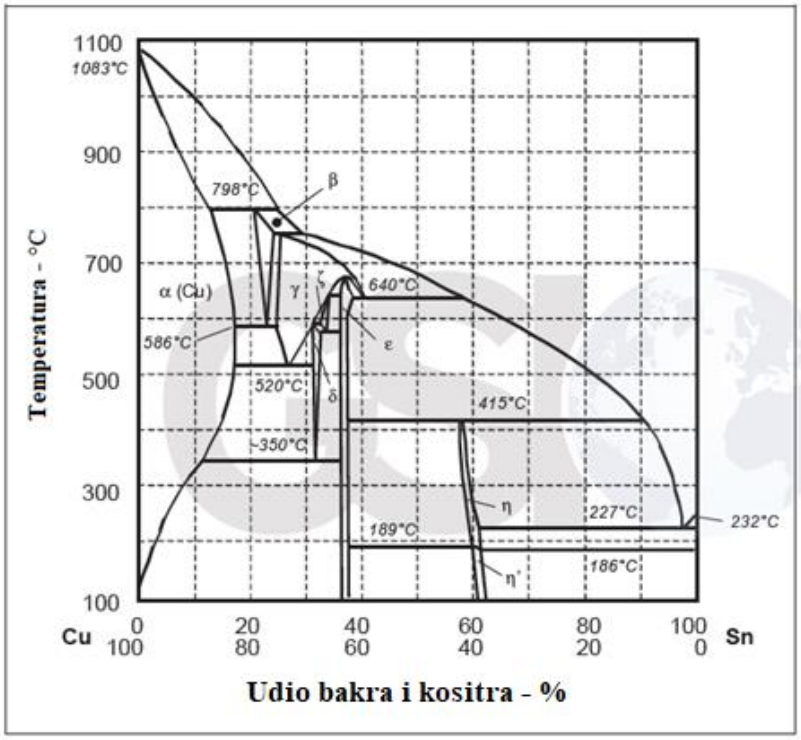
Aluminijske bronce s približno 7 %Al (monofazne) teže se zavaruju od dvofaznih, zbog toga što u ZUT-u nastaju pukotine. Kod tanjih presjeka prije zavarivanja nije potrebno predgrijavanje, dok kod bronca s manje od 10 %Al potrebno je predgrijavati do 150 °C, a kod bronca s udjelom aluminija od 10 do 13 % potrebno je maksimalno predgrijavanje do 250 °C. Kako bi se postigla svojstva čim sličnija osnovnom materijalu, koriste se dodatni materijali za elektrolučne postupke zavarivanja kao što su Al-bronce i CuNiAl legure [26].



Slika 20. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Al i Cu [6]

Kositrene bronce koje sadrže ispod 2 %Sn su monofazne, u slučaju ako se pri temperaturi otapajućeg žarenja brzo ohlade. Kao i aluminijske bronce, osjetljive su na tople pukotine, ali i naginju oksidaciji kositra, ulasku oksida na mjesto zavara i pojavi smanjenja tvrdoće. Svojstva kao što su tvrdoća, čvrstoća i istezanje, kod kositrene bronce opadaju već pri 200 °C. Kod temperatura iznad 500 °C dolazi do mogućnosti loma komada (zbog mase), kod zavarivanja težih komada. Legure s 2,5 % do 9 %Sn su dobro zavarljive, a ispod ili iznad tog udjela zavarljivost im počinje padati. Najčešći postupci zavarivanja su TIG (najbolja zavarljivost) i REL (dobro se zavaruje),

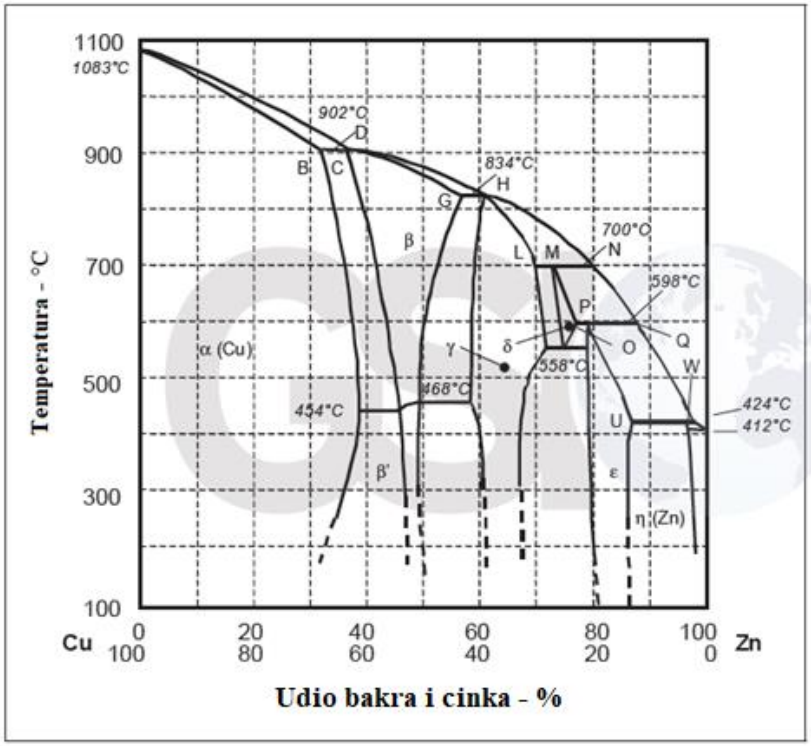
dok plinski i MIG postupci nisu preporučljivi. Kod MIG postupka postoji šansa od nastajanja poroznosti, te je potrebno predgrijavanje. Nakon toga je potrebno zavareni komad lagano hladiti. Kod ovih legura za zavarivanje potrebni su dodatni materijali koji su svrstani u dvije grupe: 6 %Sn i 12 %Sn. Što zadovoljava uvjete za zavarivanje osnovnih materijala koji sadrže do 6 %Sn i više (npr. CuSn6 i CuSn8) [6, 26].



Slika 21. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Cu i Sn [6]

Legure bakra s cinkom, tj. mjedi su dobro zavarljive TIG, MIG i plinskim postupcima, dok je REL postupkom zavarljivost nešto slabija. Kod mjedi s višim udjelom cinka raste vjerojatnost nastajanja pukotina, posebno u slučaju prisutnosti olova (> 0,03 %Pb) koje dovodi do stvaranja pukotina u ZT-u (zona taljenja). Tijekom zavarivanja postoji opasnost od udisaja otrovnih para, nastalih isparavanjem cinka već pri malim pregrijavanjima zavarenih komada. Zbog visokog tališta bakra (1083 °C) dolazi do problema poroznosti, jer cink isparava pri temperaturi od 906 °C. Kako bi se smanjila poroznost koristi se plinsko zavarivanje s oksidirajućim plamenom i dodatni materijali koji sadrže dezoksidante (npr. Si). Moguće je i dodavanje fosfora ali u malim količinama, kako bi otežao oksidaciju mjedi i isparavanje cinka. Kako bi se poboljšala zavarljivost mjedi, potrebno ih je predgrijavati na temperaturi između 250 °C i do maksimalno 300 °C. Porastom udjela cinka, toplinska i električna provodljivost opadaju, te zbog toga visokolegiranim mjedima je potrebna niža temperatura predgrijavanja. Dok cink brže isparava kod niskolegiranih mjedi i zbog toga unos topline treba biti jednoliko podešen kako bi cink minimalno ispario. Kao

dodatni materijali za zavarivanje mjedi koriste se materijali legirani sa Si, Sn, Zn ili Ag, Mn, Ni, Si, Sn, Zn. Dodatni materijali koji sadrže do 3 %Si i mali udio Mn i Fe, koriste se pri zavarivanju TIG i MIG postupcima [26].



Slika 22. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Cu i Zn [6]

Pri temperaturi od 880 °C berilijeva topljivost u bakru je maksimalna (2 %Be), a kod sobne temperature opada na otprilike 0,3 %Be. Zbog toga se stvara prezasićena čvrsta otopina, precipitacije, ali dolazi i do porasta čvrstoće. Udjelom berilija smanjuje se toplinska provodljivost, ali se time poboljšava zavarljivost legure. Do otežanog taljenja dolazi stvaranjem oksida na površini koji sprječavaju stvaranje korijena. Kod zavara rubovi moraju biti čisti, te se predlaže korištenje inertnih plinova za zavarivanje. Kod limova koji su tanji od 3 do 4 mm nije potrebno predgrijavanje, dok je kod debljih limova poželjno predgrijavanje na 150 °C do 200 °C [26].

Cu-Ni legura s više komponenta može sadržavati: Si, Fe, Mn, Al, Zn. Monofazne su legure i lako se zavaruju. Imaju manju toplinsku provodljivost, te je potrebno paziti da ne dođe do pregrijavanja tijekom zavarivanja Cu-Ni legura. Zbog toga se ne preporučuje plinsko zavarivanje. Do povećanja osjetljivosti na krhkost zavara i na tople pukotine dolazi uslijed nečistoća u leguri. Što se tiče dodatnih materijala, većinom odgovaraju sadržaju glavnog materijala uz određeni udio desulfuranata i dezoksidanata (Zn ili Mn). Elektrolučnim postupcima se podvrgavaju legure sa 70 %Cu i 30 %Ni, dok se plinski postupak koristi za reparaturno zavarivanje [26].

Bakar i bakrove legure debljine veće od 6 mm potrebno predgrijavati i postaviti lim u okomiti položaj zbog odvođenja topline, te istovremeno zavarivati s dva zavarivača koji se nalaze na suprotnim stranama. Ovom tehnikom se postiže znatna količina topline uz male jakosti struje i odlična zaštita taline. MIG postupak (žica s 0,02 do 0,10 %P) se koristi za limove debljine veće od 5 mm, dok se uz predgrijavanje može koristiti TIG postupak za limove do 5 mm debljine. Mogući su i neki postupci elektrootpornog zavarivanja, kao npr. točkasto i šavno zavarivanje kojima se dobivaju spojevi zadovoljavajuće kvalitete. Ali su tijekom tih postupaka manje sile pritiska na elektrode, kraće vrijeme zavarivanja i veće struje [26].

Prilikom zavarivanja bakra i bakrenih legura potreban je veliki oprez i korištenje zaštitnih maska, zbog skrutnutih lebdećih čestica bakra tijekom MIG zavarivanja i zbog isparavanja cinka tijekom zavarivanja mjedi [26].

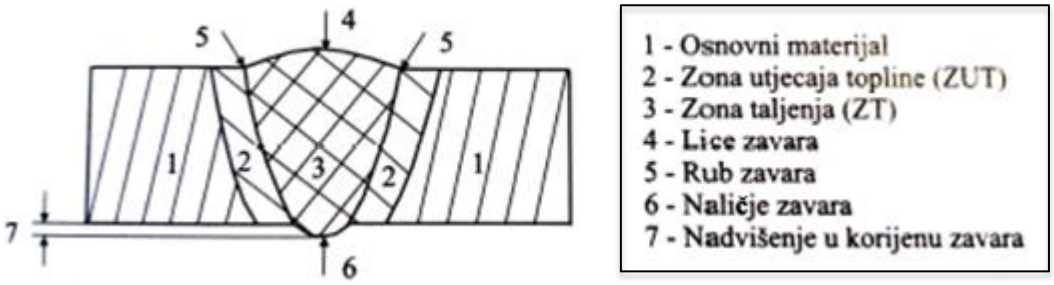
Tablica 13. Temperaturno područje homogenizacijskog žarenja bakrenih legura [26]

Legura	**Temperatura** °C
Bronca	**430-740**
Fosforom dezoksidirani bakar	**380-660**
Cu-Be	**780-810**
P-bronce	**490-680**
Al-bronce	**670-910**
70 %Cu – 30 %Ni	**650-820**

Nakon postupaka zavarivanja bakra i bakrenih legura koristi se toplinska obrada, kako bi se povećala čvrstoća i otpornost zavarenog spoja od naponske SCC korozije (kod bronci). Tako se za mjedi, broncu i Cu-Ni legure koristi žarenje za popuštanje naprezanja koje traje 60 minuta pri temperaturama nižim od temperatura rekristalizacije (mjed: 260-290 °C; bronca: oko 350 °C; Cu-Ni legure: 550°C). Dok se za prokaljive bakrene legure provodi homogenizirajuće žarenje u trajanju od oko 60 min. Temperature za legure homogenizirajućeg žarenja vidljive su u tablici 13. [26].

3. Zavarivanje

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više elemenata (dijelova) primjenom topline i/ili pritiska, s dodatnim materijalom ili bez dodatnog materijala. Nakon zavarivanja postiže se zavareni spoj, tj. nerastavljivi kontinuirani spoj nastao zavarivanjem istovrsnih ili različitih materijala tvoreći spoj jednoličnih svojstava. Kako bi se dobio zavareni spoj potrebno je postići tekuće ili plastično stanje zone spoja tijekom zavarivanja. Spajati se mogu razni materijali od metala (Al, Cu, čelici, Ni i legure) i nemetala (npr. termoplastični dijelovi). Slika 23. prikazuje poprečni presjek i osnovne elemente zavarenog spoja [26, 27].



Slika 23. Presjek i elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [26]

Zona taljenja (ZT) i zona utjecaja topline (ZUT) glavni su dijelovi zavarenog spoja. Prilikom zavarivanja dio zavarenog spoja kod kojeg je došlo do taljenja i do skrućivanja i pojave kristalizacije se naziva ZT. Sastoji se samo od osnovnog materijala ili od mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Do mijenjanja kristalne strukture dolazi u ZUT-u koja čini dio osnovnog materijala uz rastaljenu zonu. Širina ZUT-a ovisi najviše o toplinskom unosu i većinom iznosi 2 do 8 mm [26].

Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom označuje se brojem 14 prema normi HRN EN ISO 4063.

Tablica 14. Podjela elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom prema HRN EN ISO 4063 [27, 28]

14 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom
141 TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom
142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala
143 TIG zavarivanje s praškom punjenom žicom ili šipkom
145 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i pune žice ili šipke
146 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i praškom punjene žice ili šipke
147 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom primjenom aktivnog plina (TAG zavarivanje)

3.1. Izvori energije za zavarivanje

Kod zavarivanja se najčešće primjenjuje toplinska energija za spajanje materijala (dijelova). Glavne karakteristike izvora energije su snaga izvora, brzina kretanja izvora i koncentriranost gustoće snage. Izvor energije kod zavarivanja taljenjem mora zadovoljavati sljedeće zahtjeve [26]:

- djelovati lokalno na zahtijevanu površinu ili volumen elementa koji se zavaruje
- za lokalno zagrijavanje do određene temperature potrebna je dovoljna snaga izvora "P" i za kompenzaciju toplinskih gubitaka
- predmet koji se zavaruje ovisi o dimenzijama, obliku i fizikalnim svojstvima te gustoća snage na površini zavarivanog komada mora postići određenu vrijednost

Kako bi se materijal doveo u stanje za zavarivanje bitna je gustoća snage, a ne vrsta (oblik) energije za zavarivanje, kao što su npr. kemijska, mehanička, električna, optička i difuzijska. Izvori energije za zavarivanje ovisno o gustoći snage dijele se na [26]:

- izvori visoke gustoće koji tale i isparavaju materijal ($q_2 > 10^2 - 10^4$ W/mm^2)
- izvori uobičajene gustoće koji tale materijal ($q_2 = 10^{-1} – 10^2$ W/mm^2)
- izvori niske gustoće koji ne tale materijal ($q_2 < 10^{-1}$ W/mm^2)

Još jedna bitnija podjela izvora energije, ali s obzirom na fizikalno obilježje, tj. koncentrirane vrste izvora energije su [26]:

- mlaz vrućih plinova (mlaz plazme i plinski plamen)
- električni luk
- tok nabijenih čestica ubrzanih u električnom polju (mlaz elektrona ili iona u vakuumu)
- tok zračenja (laser, sunčano zračenje, zračenje tijela visoke temperature)
- električna struja

3.2. Vrste zavarenih spojeva

Prema međusobnom položaju zavarenih elemenata zavareni spojevi se dijele na: kutne (rubni spoj, T-spoj), sučeljene, preklopne i naliježuće spojeve. Kutni i sučeljeni spojevi se najčešće upotrebljavaju u praksi. Spojevi se još dijele prema oblicima, te mogu biti: I-spoj, U-spoj, dvostruki U-spoj, K-spoj, J-spoj, dvostruki J-spoj, V-spoj, 1/2V-spoj, X-spoj itd. Kod nacrta se

označavanje zavarenih spojeva provodi u skladu s nacionalnim standardima (prema međunarodno priznatim oznakama) koji će detaljnije biti opisani u tablici 15. [26].

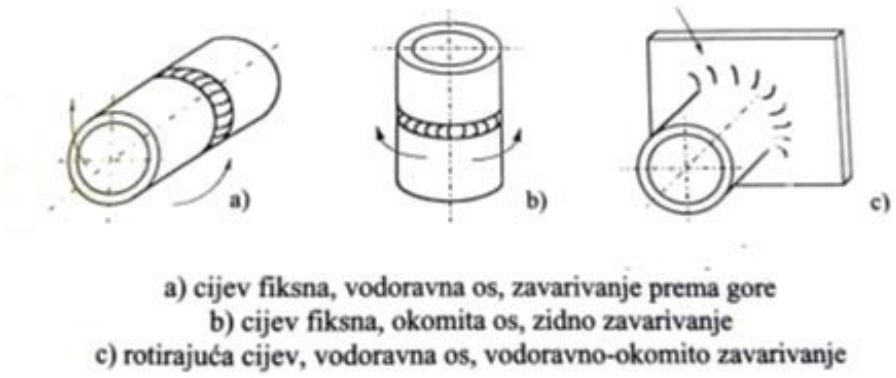
Tablica 15. Označavanje i primjena zavarenih spojeva [26]

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.

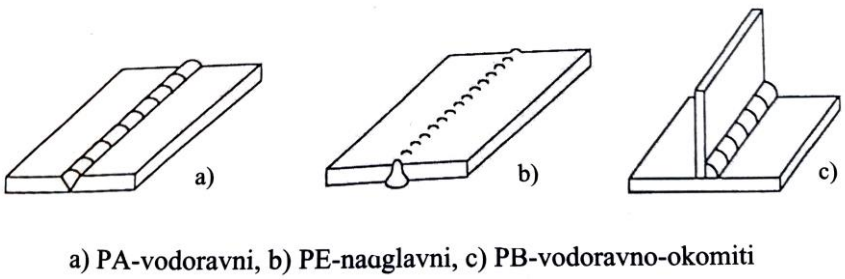
Sučeljeni V-spoj zavaren i s druge strane		Kao kod V-spoja, s time da se zavaruje i s korijenske strane.
Sučeljeni X-spoj		Za debljine stijenke 15-40 mm, a za bakar već od 8 mm. Zavaruje se s obje strane.
Sučeljeni K-spoj		Kao kod X-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće iskositi rub ili 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 zahtjeva 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.

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.

Vrste zavarenih spojeva mogu se podijeliti i na razne druge načine, npr. prema kontinuiranosti (točkasti, neprekidni i isprekidani), broju prolaza (jedan prolaz, više prolaza, te višeslojni zavar gdje svaki sloj može sadržavati više prolaza) i prema funkciji (brtveni, nosivi, kombinirani).



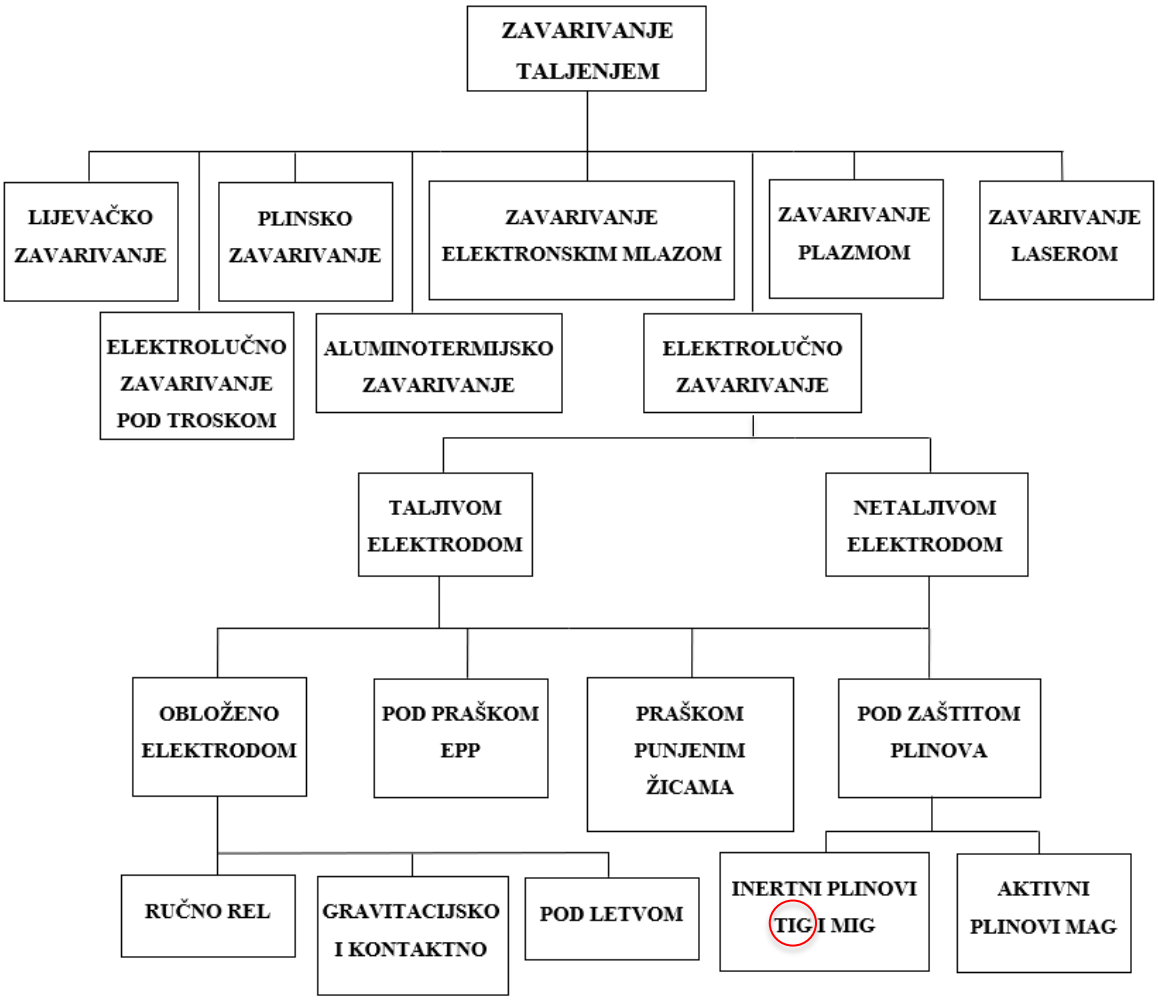
Slika 24. Položaj i oznake zavarivanja cijevi [26]



Slika 25. Položaj i oznake zavarivanja cijevi [26]

3.3. Vrste postupaka zavarivanja

Postoje razne vrste postupaka zavarivanja, a najbolje će ih biti prikazati pomoću hierarhijskog dijagrama (slika 26.).



Slika 26. Dijagram podjele postupaka zavarivanja taljenjem [29]

Zavarivanje posjeduje mnoge prednosti, od uštede i smanjenja mase materijala do lakših izrada konstrukcija naspram lijevanih i zakovanih. Razvojem lasera i elektronskog snopa, ubrzava se tehnološki napredak zavarivanja i dovodi do zavarivanja materijala koji se prije nisu mogli zavariti [30].

U slijedećem poglavlju biti će opisana metoda zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom plina (TIG), koja spada u skupinu elektrolučnog zavarivanja, kao što prikazuje slika 26.

4. TIG zavarivanje

4.1. Uvod u TIG zavarivanje

Elektrolučni postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja i održava između volframove netaljive elektrode ili elektrode od volframovih legura i osnovnog materijala koji se tali, naziva se TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja. Postupak se izvodi u zaštitnoj atmosferi inertnog plina ili manje vjerojatno u smjesi plinova. U većini primjena kao inertni zaštitni plin koristi se argon (Ar), helij (He) ili kombinacija argona i helija. Za ovaj se postupak još upotrebljavaju nazivi WIG (*eng. Wolfram Inert Gas)* i GTAW (*eng. Gas Tungsten Arc Welding)* [26, 31, 32] .

U današnje vrijeme se sve više teži ka poluautomatizaciji i robotizaciji (potpunoj automatizaciji) postupaka i procesa, iako je danas još uvijek najčešći ručni postupak TIG zavarivanja. Tijekom zavarivanja ručnim postupkom, zavarivač drži i pomiče pištolj te u prednji rub taline dodaje dodatni materijal u pravilnim vremenskim intervalima. Kod poluautomatiziranog postupka dodatni se materijal dodaje uz pomoć elektromotora iz dodavača žice, a za serijsku proizvodnju se sve više koristi automatizirani TIG postupak, kod kojeg se pištolj poluautomata montira na numerički programiranu robotsku ruku, koja se upravlja CAD/CAM sučeljem na upravljačkom računalu [31, 35].



Slika 27. Primjer ručnog TIG zavarivanja [36]

Osnovne prednosti TIG postupka zavarivanja [26, 35]:

- koncentriranost električnog luka koja doprinosi smanjenju zone utjecaja topline (ZUT)
- proizvodi minimalnu količinu štetnih plinova
- ne dolazi do nepoželjnog rasprskavanja kapljica metala izvan električnog luka i ne javljaju se troske
- mogućnost zavarivanja u svim položajima rada
- zavarivanje raznih vrsta metala i legura metala
- zavarivanje različitih vrsta materijala
- zavarivanje materijala malih presjeka (debljina) i kompliciranih oblika
- ispravno izvedeni zavareni spojevi spadaju u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom
- TIG postupak je pogodan za izvođenje reparaturnih radova
- mogućnost zavarivanja u radioni i na terenu
- mogućnost poluautomatizacije i automatizacije (robotizacije)
- odličan estetski izgled zavarenog spoja.

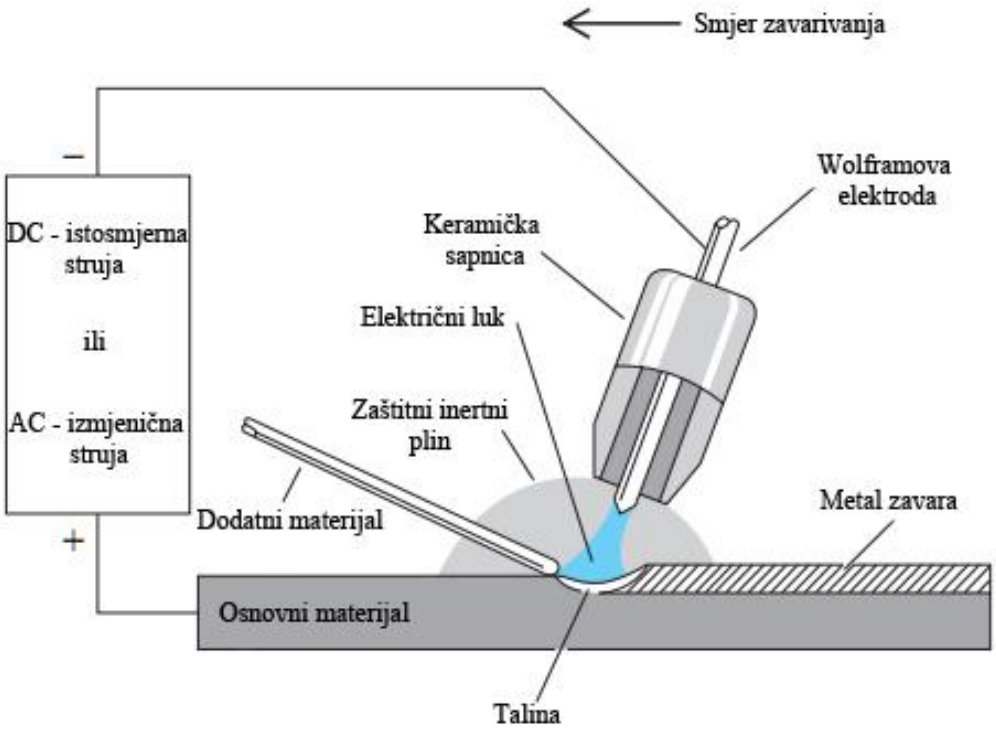
Osnovni nedostaci TIG postupka zavarivanja [26, 35]:

- brzina zavarivanja je mala i mali su depoziti dodatnog materijala
- materijali debljina >6 mm nisu ekonomični za zavarivanje
- priprema zavarenog spoja mora biti precizna
- potrebna duga i skupa edukacija zavarivača zbog kompleksnosti izvođenja ručnog TIG zavarivanja
- potrebna je dobra priprema površine (visoka čistoća) koja se zavaruje
- na otvorenim prostorima dolazi do otežanog izvođenja zavarivanja, a kod skučenih prostora je potrebna ventilacija zraka tijekom izvođenja zavarivanja
- proizvodi pojačanu svijetlost i UV zračenje.

Kod TIG postupka zavarivanja radi se na razvoju raznih faktora kao što su: impulsna struja kvadratnog oblika, visoke frekvencije impulsnog zavarivanja, dodatni materijali i automatizacija dodavanja materijala, vruća i hladna žica, K-TIG (visoko penetracijski postupak "keyhole"), A-TIG (primjena aktivacijskog premaza), uspostava električnog luka i razvoj elektroda [31].

4.2. Princip rada ručnog TIG zavarivanja

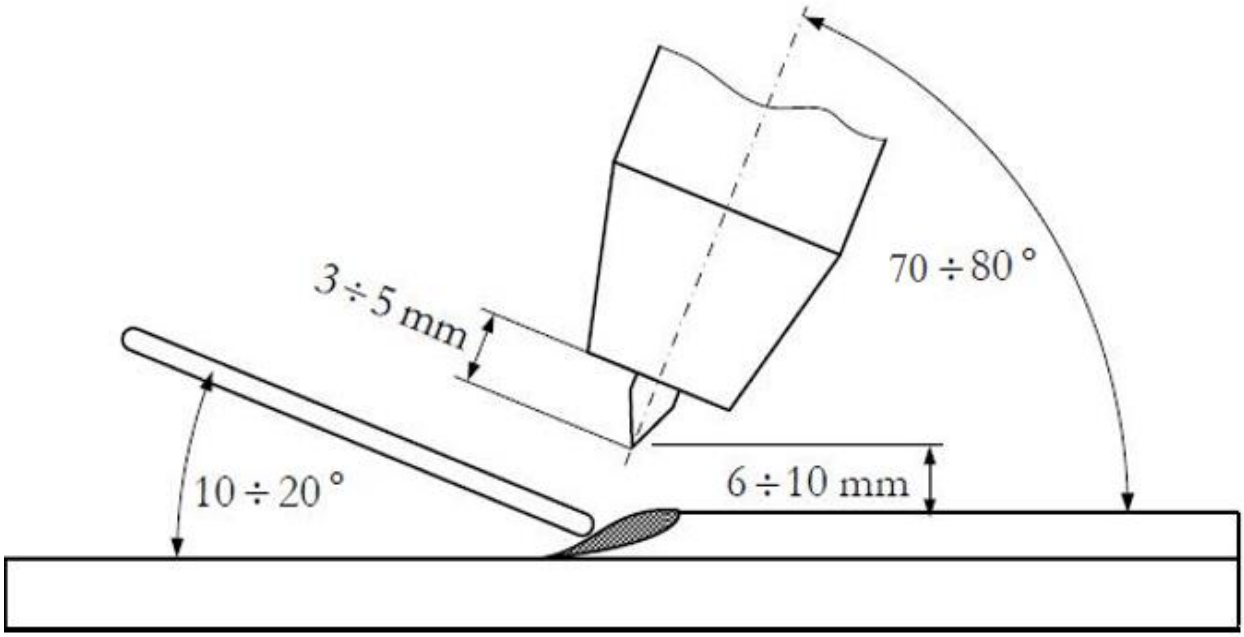
Kod ručnog TIG zavarivanja na pištolju se nalazi prekidač kojeg zavarivač pritisne ili bežičnu papučicu koju pritisne stopalom, kako bi započeo cirkulaciju rashladne vode i istjecanje inertnog plina kroz sapnicu pištolja. Potrebno je na točno određeni razmak primicanja pištolja mjestu zavarivanja. Upravljačka elektronika nakon otprilike dvije sekunde naknadno šalje visokofrekventnu struju koja lako ionizira atmosferu u inertnoj struji plinova, te dolazi do lakšeg stvaranja električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada. Električni luk manifestira temperaturu od 3000 °C do 10000 °C, kako bi mogao rastaliti osnovni materijal. Zatim se u točno određenim vremenskim intervalima rastaljenom materijalu dodaje dodatni materijal koji se tali u prednjem rubu taline osnovnog materijala, te se zajedno spajaju u zavar. Nakon prestanka pritiska na prekidač pištolja ili papučice, zaustavlja se električni luk, dok zaštitni plin još neko vrijeme ostaje istjecati iz sapnice pištolja kako bi zaštitio talinu i vrh elektrode od oksidacije prilikom hlađenja. Tijekom tog vremenskog intervala bitno je da radnik drži pištolj na mjestu zavara [31, 35].



Slika 28. Shematski prikaz TIG zavarivanja [35]

Dodatni materijal je najčešće u obliku šipke (za ručne) ili kao namotana žica (za automatizirani postupak). Kao što je već prije rečeno, zaštitni plin je Ar, He, te kombinacije s vodikom i dušikom [31].

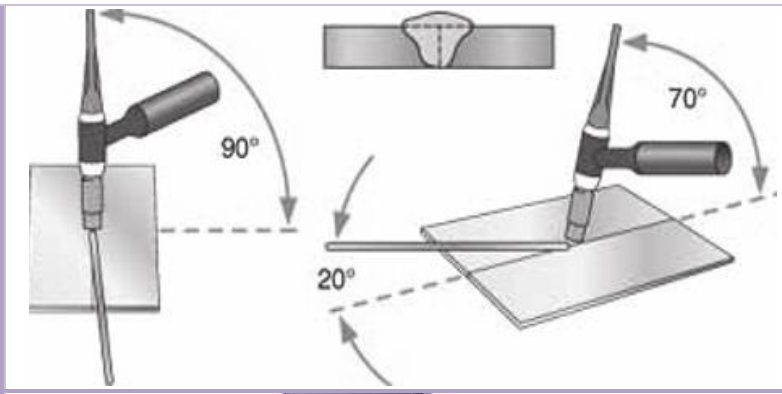
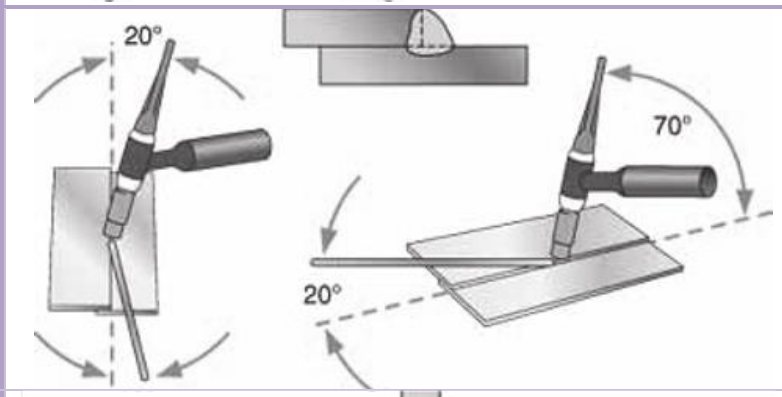
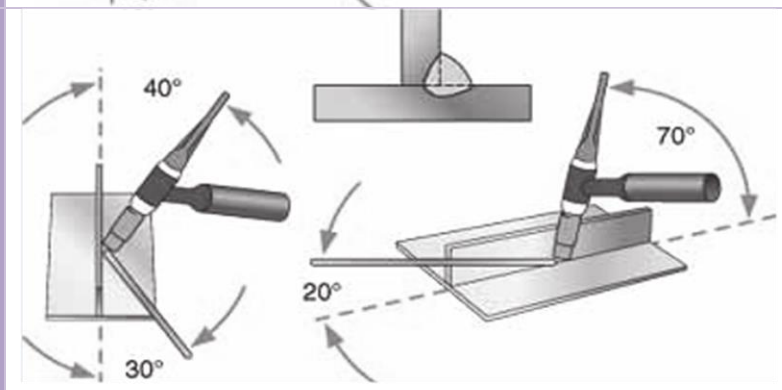
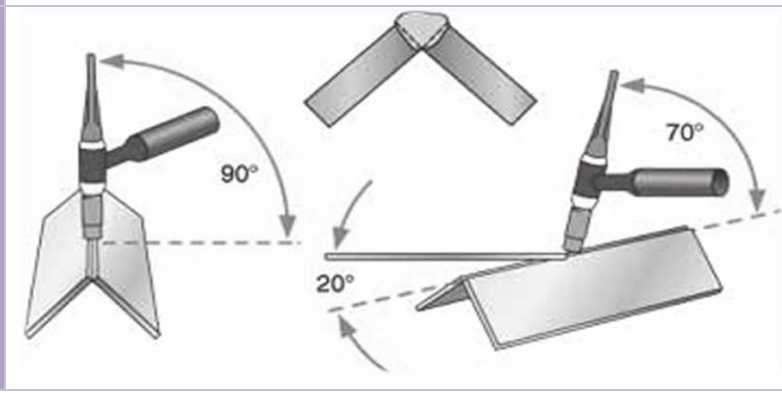
Kao što je prikazano na slici 29., elektroda se namjesti u pištolju tako da vrh izlazi 3 do 5 mm izvan sapnice, a ponekad i 12 mm ovisno o obliku zavarenog spoja i jakosti struje. Od površine taline sapnica mora biti udaljenja 6 do 10 mm, a ponekad može biti i veća (ovisno o jakosti struje zavarivanja). Slika 33. prikazuje postupak koji je karakterističan za lijevu tehniku rada, što znači da se dodatni materijal nalazi u lijevoj ruci dok se pištolj nalazi u desnoj ruci, te se tako zaključuje da se postupak zavarivanja odrađuje s desna u lijevo. Kako bi se postiglo optimalno zavarivanje kut pištolja u odnosu na dio koji se zavaruje treba biti između 70° i 80°, a dodatni materijal pod kutem od 10° do 20° tijekom dodavanja. Kod ovog postupka zavarivanja specifično je da se kapljice metala ne prenose kroz električni luk, već se u prednji rub taline dodaje dodatni materijal kako bi se pod električnim lukom rastalio i spojio s talinom zavara. Kako ne bi došlo do naljepljivanja i stvaranja grešaka, potrebno je imati dovoljno taline [26. 31].



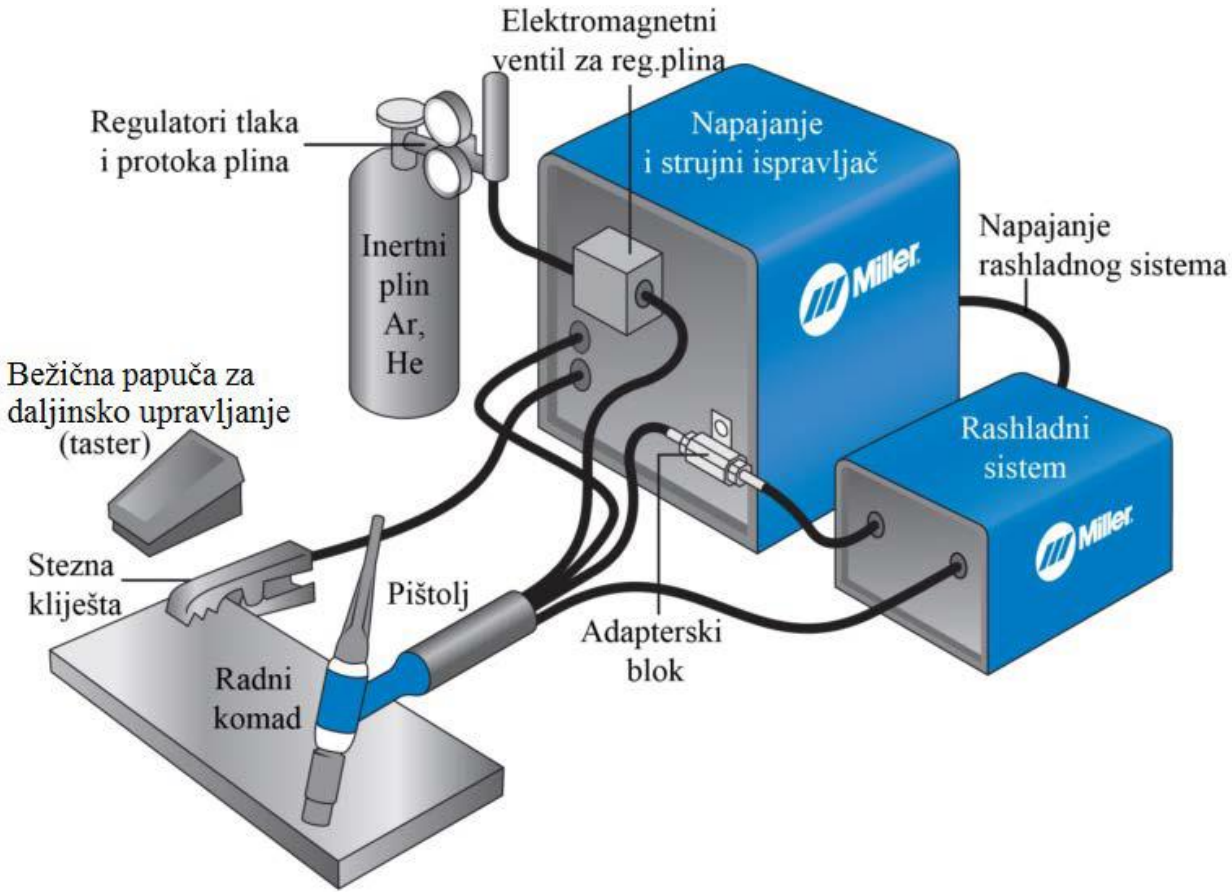
Slika 29. Položaj pištolja i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [26, 31]

U tablici 16. prikazana su pravila TIG zavarivanja sučeonog spoja, preklopnog spoja, kutnog spoja i rubnog spoja. Glavna važnost se daje kutovima pod kojim je potrebno držati pištolj i dodatni materijal u odnosu na dio koji se zavaruje.

Tablica 16. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [40]

Izvođenje sučeonog spoja	
Izvođenje preklopnog spoja	
Izvođenje kutnog spoja	
Izvođenje rubnog spoja	

4.3. Oprema za TIG zavarivanje

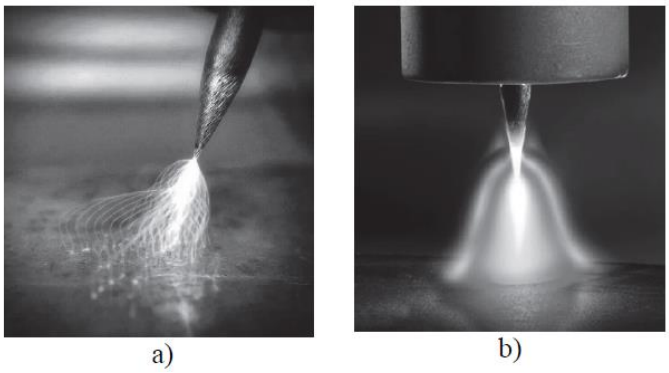


Slika 30. Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [43]

Na slici 43. su prikazani osnovni dijelovi opreme za TIG zavarivanje. Pištolj, adapterski blok, rashladni sistem, napajanje rashladnog sistema, napajanje i strujni ispravljač, elektromagnetni ventil za regulaciju plina, regulator tlaka i protoka plina, atestirana čelična boca, bežična papuča za daljinsko upravljanje, stezna kliješta. Za izvore struje se koriste transformatori, inverteri ili ispravljači, koji imaju karakterističnu strujnu konstantu za obavljanje impulsnog TIG zavarivanja. Elektroda se priključuje na (+/ - / AC) pol, ovisno o komadu (materijalu) koji se zavaruje. Na radni komad se uz pomoć steznih kliješta spaja drugi kraj, u svrhu zatvaranja strujnog kruga. Atestirana čelična boca koja ima regulator protoka sadrži inertni (zaštitni) plin, te se na nju još nadovezuju mjerni instrumenti. Većina novijih uređaja ima integrirani rashladni sustav pištolja uz pomoć tekućine za hlađenje i bežične prekidače radi olakšavanja rada. Svi dijelovi opreme su polikablom povezani s pištoljem, kako bi se preko njega provodila kontrola procesa [31, 35].

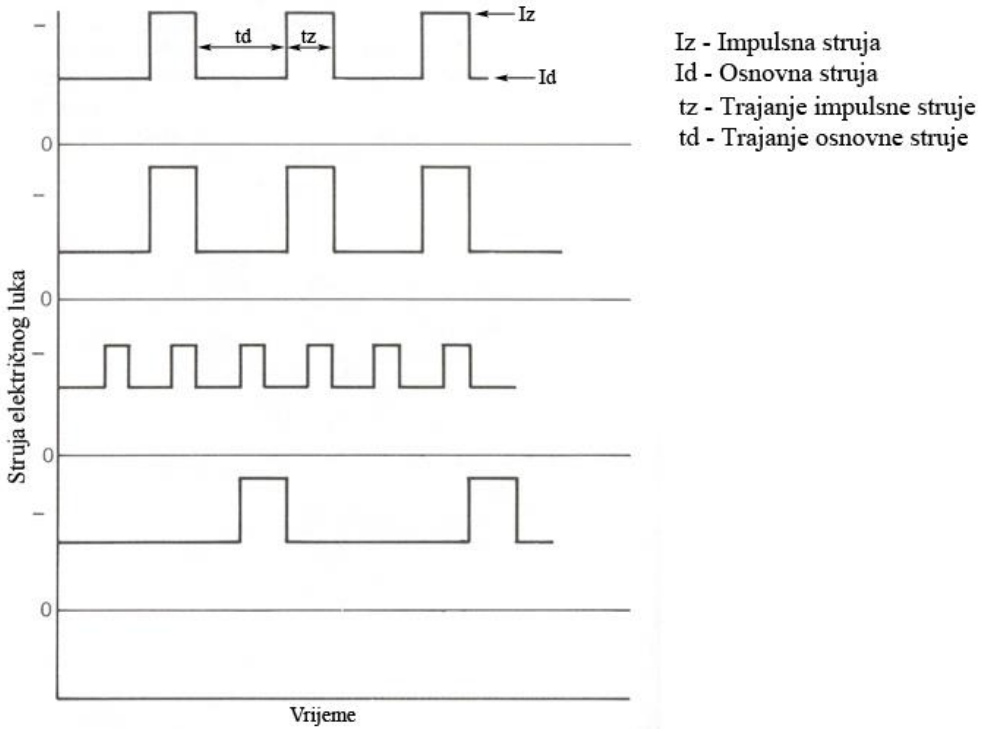
4.3.1. Izvori električne struje

Kao što je već prije navedeno transformatori, inverteri i ispravljači spadaju pod izvore el. struje, dok se kod ručnog zavarivanja bakra najčešće koristi inverter ili ispravljač. Na njih se priključuje pištolj koji je spreman za zavarivanje, te se električni luk uspostavlja dodirom vrha volframove elektrode i radnog komada [35].



Slika 31. a) Uspostava el. luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk [32]

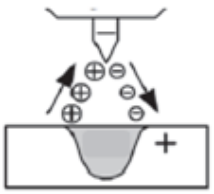
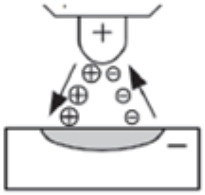
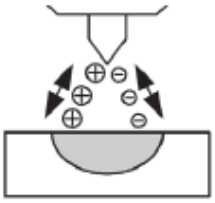
Kod zavarivanja osjetljivih materijala, tankih limova i zavarivanja u teškim položajima koristi se impulsno TIG zavarivanje. To je postupak zavarivanja kod kojeg se u dvije razine jakost električne struje ritmički mijenja, kao što je prikazano na slici 32. [31].



Slika 32. Osnovne karakteristike pravokutnih impulsnih oblika [31, 35]

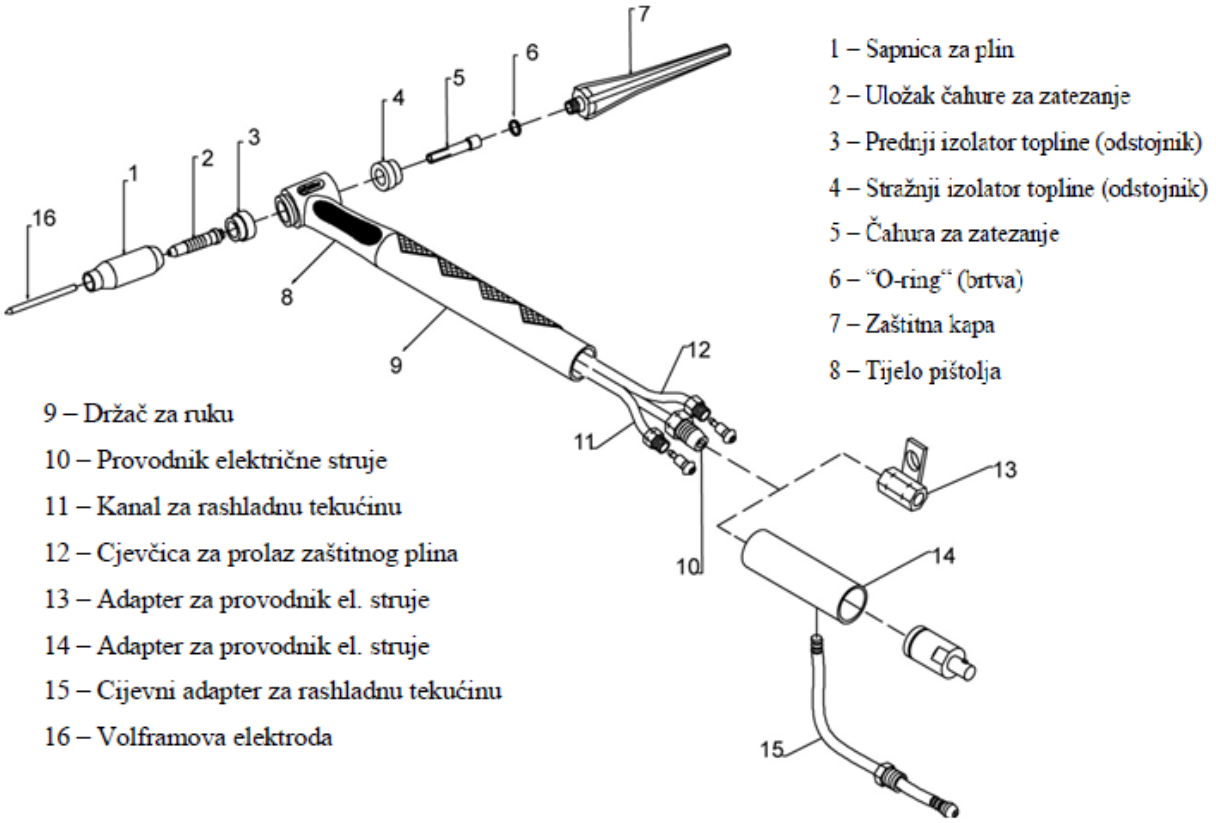
Vrsta struje zavarivanja i polaritet elektrode ovisi o raspoređenoj toplini u električnom luku. Moguća su tri slučaja koja su dana primjerima u tablici 17.

Tablica 17. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [32, 45]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet	-	+	~
Grafički prikaz			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka, srednje duboka
Kapacitet elektrode	odličan npr. Ø3,2/400A	loš npr. Ø6,4/120A	dobar npr. Ø3,2/255A

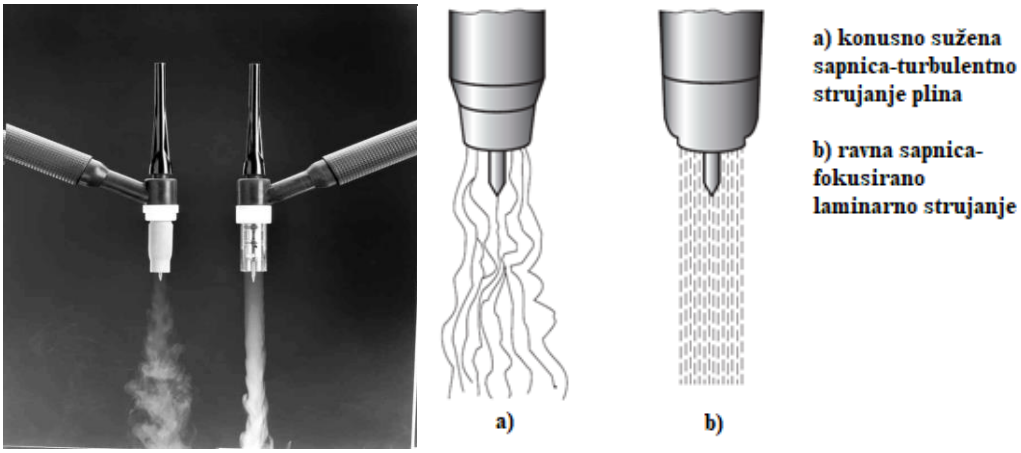
4.3.2. Pištolj za ručno TIG zavarivanje i sapnica

Pištolj se sastoji od volframove elektrode koja služi za dovođenje električne struje kako bi se uspostavio električni luk i za usmjeravanje zaštitnog plina. Razlikuju se prema veličini i obliku, te se mogu podijeliti u dvije skupine: s hlađenjem rashladnom tekućinom i bez hlađenja rashladnom tekućinom. Za zavarivanja s manjom jakosti struje (150-200 A) i kraćim vremenskim opterećenjem koriste se pištolji koji nemaju hlađenje rashladnom tekućinom, već se hlade samo zrakom. Konstruiraju se i pištolji koji zavaruju na mjestima koja su teško pristupačna, te imaju posebnu dimenzioniranu veličinu i oblik. Ali najčešće se koristi pištolj koji je prikazan na slici 33. Sastoji se od oko 16 manjih dijelova, ovisno o izvedbi samog pištolja. Svi provodnici završavaju u držaču za ruku, dok je na držaču smješten prekidač za ukapčanje el. komandi. Snop provodnika dužine 5 do 8 m spojen je direktno na pištolj, a sam snop je još spojen na izvor struje zavarivanja. [31, 35].



Slika 33. Pištolj za ručno TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem s numeriranim dijelovima [35, 45]

Sapnica koja je na slici 33. numerirana brojem 1 ima zadaću tijekom zavarivanja usmjeravati zaštitni plin. Najčešće se izrađuju od keramike (najjeftinije), ali zbog krhkosti mogu biti izrađene i od metala i kvarcnog stakla. Kod rada s visokofrekventnim strujama se koriste keramičke sapnice. Što se tiče oblika sapnice najčešće izvedbe su konusnog, profilnog ili cilindričnog oblika. A u pravilu je unutarnji promjer sapnice veći od promjera volframove elektrode tri puta. Izvedba sapnice ovisi o kvaliteti i količini protoka zaštitnog plina [32, 35].



Slika 34. Utjecaj oblika sapnice na protok zaštitnog plina [35, 47]

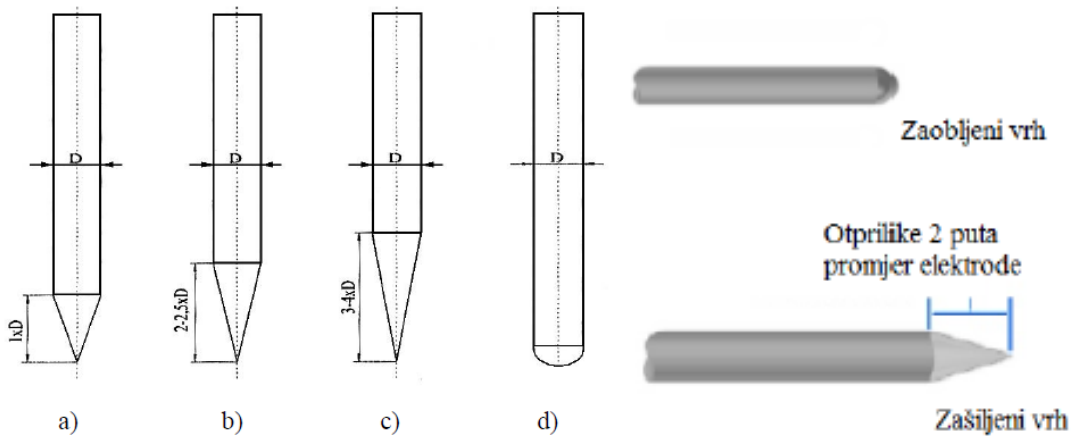
4.3.3. Netaljiva volframova elektroda

Kako bi se električna struja s pištolja prenijela na radni komad koristi se volframova netaljiva elektroda. Iako se naziva netaljiva elektroda, u pravilu se ona ipak troši zbog erozije vrha i zbog prljanja vrha, te je potrebno brušenje kako bi se elektroda očistila. 200 mm dugačka netaljiva elektroda ima u prosjeku vijek trajanja od 30 sati. Materijal za izradu elektrode je čisti volfram ili volfram s dodacima cirkonijevog oksida (ZrO_2), cerijevog oksida (CeO_2), lantanovog oksida (La_2O_3) ili torijevog oksida. Neke od karakteristika volframa su talište (T_t = 3422 °C) i velika gustoća (19,3 g/cm^3). U sljedećoj tablici (tablica 18.) prikazana je klasifikacija elektroda po legirnim elementima, koje se označuju pomoću boja [31, 32].

Tablica 18. Označavanje volframovih elektroda [31, 32]

Oznaka (ISO)	Boja	Dodatak oksida (%)	Legirni oksid	Legirni element
W	Zelena	---	---	---
WC 20	Siva	1,8 – 2,2	CeO_2	Cerij
WL 10	**Crna**	**0,9 – 1,2**	**La_2O_3**	**Lantan**
WZ 4	Smeđa	0,3 – 0,5	ZrO_2	Cirkonij
WT 10	Žuta	0,8 – 1,2	ThO_2	Torij
WT 40	Narančasta	3,8 – 4,2	ThO_2	Torij

20 % jaču el. struju provode elektrode legirane s torijem u odnosu na čistu volframovu elektrodu. Uz to je i lakše paljenje luka i stabilnost luka je veća, a spajaju se s istosmjernim izvorom struje. Kod elektroda koje su legirane cerijevim ili s lantanovim oksidom postoji razlika jer nisu radioaktivne kao što je torij, te se mogu spajati s istosmjernim i izmjeničnim izvorom el.struje. Dok elektrode legirane s cirkonijevim oksidom spadaju između čistih legiranih elektroda s torijevim oksidom. O vrsti i promjeru volframovih elektroda ovisi vrsta i debljina metala koji se zavaruje. Tako se izrađuju elektrode u različitim promjerima 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4; i 8,0 mm, dok su duljine najčešće 150 mm.. Nakon odabira elektrode bitna je i priprema koja sadrži zašiljenje i zaobljenje vrha. Sama geometrija elektrode znatno utječe na geometriju el. luka. Npr. za zavarivanje Al, Mg i njihovih legura koristi se zaobljeni vrh elektrode, dok se većinom kod ostalih materijala traži šiljasti vrh elektrode [31, 32 35].



Slika 35. Dimenzije vrha elektroda za pojedine vrste TIG zavarivanja [32, 35]

Prema slici 35. vrhovi elektroda a), b) i c) se koriste kod zavarivanja bakra i čelika na minus polu istosmjernom strujom. Primjer a) se koristi za strojno zavarivanje, a primjer b) za ručno zavarivanje kod većih jakosti struje. Dok je primjer d) pogodan za ručno zavarivanje istosmjernom strujom na plus polu ili izmjeničnom strujom, materijala kao što su aluminij i magnezij [35].

4.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod zaštitnog (inertnog) plina

Rashladni sustav služi za hlađenje pištolja pomoću rashladnih sredstva, a to su: destilirana voda i/ili antifriz, različite antikorozivne primjese. Izvedba rashladnog sustava može biti u tri verzije, a to su: otvoreni, zatvoreni pojedinačni i zatvoreni centralni. Kod otvorene verzije crijevo se priključuje direktno na vodovod, dok zatvoreni centralni sustav sadrži vlastiti spremnik za vodu i crpku koja dovodi vodu po dijelovima aparature. Zatvorena pojedinačna verzija sadrži hladnjak, mali spremnik, elektromotor i crpke [32].

Sustav za dovod zaštitnog plina ima zadaću dovesti zaštitni plin u točno određenoj količini (protoku) do mjesta zavarivanja. Sustav se sastoji od [32]:

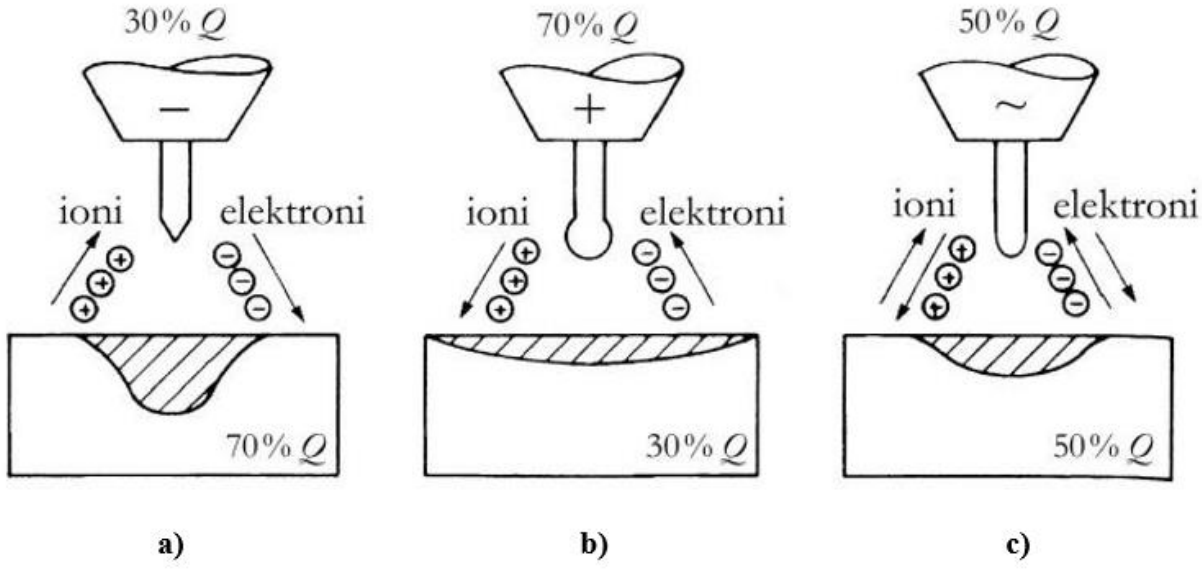
- crijeva za dovod plina s pištolja
- crijeva za dovod plina s magnetskog ventila na pištolj
- spremnika plina – atestirana čelična boca
- magnetskog ventila za uključivanje i isključivanje protoka plina na pištolju
- redukcijskog ventila s mjeračem protoka plina.

4.4. Glavni parametri kod TIG zavarivanja

Kako bi se postigla najveća moguća kvaliteta zavara, potrebno je brinuti o sljedećim parametrima: vrsti i jakosti el. struje zavarivanja, protoku i vrsti zaštitnog plina, naponu struje zavarivanja, dodatnim materijalima i brzini zavarivanja.

4.4.1. Vrsta i jakost struje zavarivanja

Kao što je već navedeno u poglavlju "Izvori električne struje" TIG zavarivanje je moguće izvoditi istosmjernom el. strujom, kada minus pol spaja elektrodu (DC – Electrode Negative) ili kada plus pol spaja elektrodu (DC – Electrode Positive), i zadnja moguća izvedba je kada se spaja na izmjeničnu el. struju (AC). Na slici 36. prikazana su sva tri primjera, te za dane uvjete polarizacije raspodjela topline Q [32].



Slika 36. Prikaz smjera gibanja nosilaca naboja i intenzitet zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu el. struje [32]

Na prvom primjeru a) prikazana je elektroda spojena na istosmjernu struju minus pola, koja se koristi za zavarivanje svih metala osim aluminija, magnezija i njihovih legura. Smjer gibanja negativnog naboja (elektrona) je s katode (negativna elektroda) na anodu (pozitivan radni komad), dok se pozitivni ioni gibaju suprotno, prema katodi. Do toplinske energije dolazi zbog kolizije između iona i elektrona s većom kinetičkom energijom, tj. elektroni s većom kinetičkom energijom se sudaraju s radnim komadom i dovode do generiranja toplinske energije Q. Dok ioni

koji su manje kinetičke energije udaraju u elektrodu i stvaraju manju toplinsku energiju. Radi toga se na elektrodi generira samo 30 % ukupne topline, dok se ostalih 70 % generira na radnom komadu. Te se iz tog podatka može zaključiti, da manjim zagrijavanjem vrha elektrode dolazi do odabira zašiljenog vrha kako bi se postigao koncentrirani el. luk koji dovodi do dubljeg protaljivanja [32, 35].

Kod b) primjera elektroda je spojena na plus pol istosmjerne struje i upotrebljava se samo u specijalnim slučajevima kad se moraju razoriti površinski oksidi na aluminiju i ostalim lakim metalima. Ovaj primjer se u većini slučajeva ne upotrebljava zbog prevelikih toplinskih opterećenja elektrode i nestabilnosti el. luka [32 35].

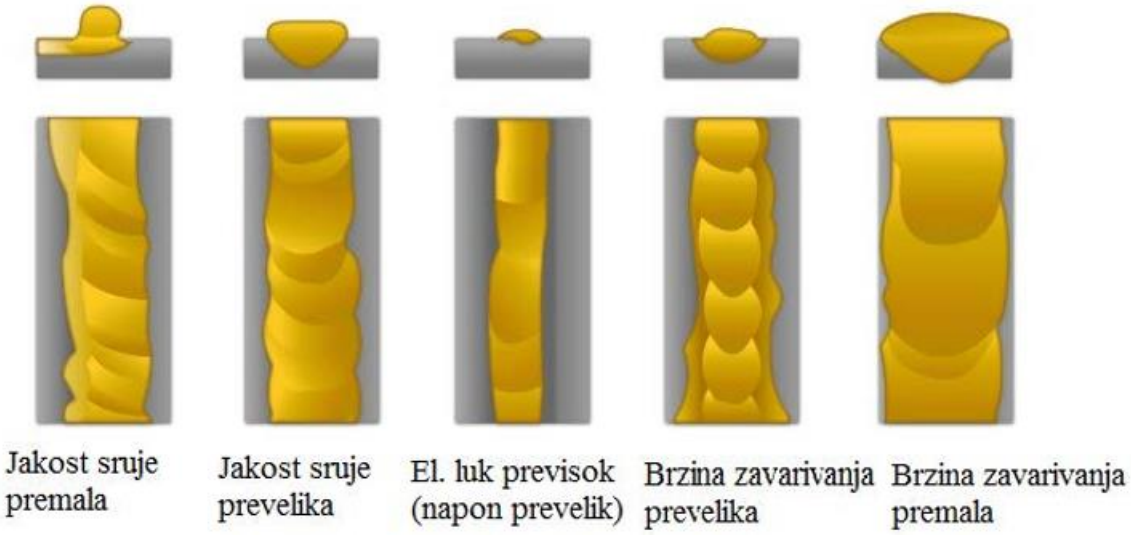
Zadnji primjer c) prikazuje el. luk izmjenične struje zavarivanja koji se koristi za zavarivanje magnezija, aluminija i njihovih legura. Ovaj se postupak koristi kod metala čiji oksidni sloj ima veće talište od samog metala, zbog toga što dolazi do razaranja oksidnog površinskog sloja uslijed toka elektrona prema elektrodi i do dubokog protaljivanja uslijed toka na radni materijal, što dovodi do čistog zavarenog spoja [32, 35].

Što se tiče jakosti električne struje, ona najviše utječe na oblik zavarenog spoja. Tako da spada među najbolje parametre pomoću kojih se može kontrolirati dubina penetracije i depozita. Sama jakost struje se određuje prema sljedećim faktorima [35, 48]:

- vrsta el. struje
- raspon jakosti struje uređaja
- promjer i vrsta elektrode
- položaj zavarivanja
- debljina osnovnog materijala
- priprema spoja.

4.4.2. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja se definira kao put koji el. luk prođe po radnom komadu u nekom određenom vremenu. Uz jakost i napon struje, unos topline u radni komad određuje brzina zavarivanja. Osim toga znatno utječe i na oblik i dubinu penetracije zavara. Ako su ostali parametri fiksni (nepromjenjivi), depozit i dubina penetracije će se smanjiti povećanjem brzine zavarivanja, a u slučaju dok se brzina i struja zavarivanja proporcionalno smanjuju ili povećavaju, širina i dubina penetracije se neće mijenjati [32].

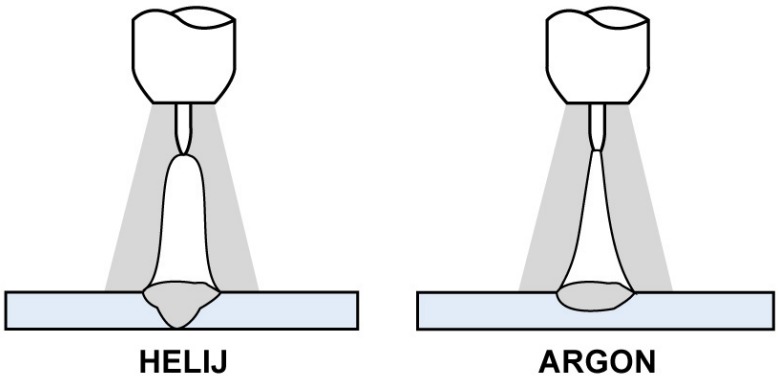


Slika 37. Posljedica ekstrema različitih parametara na geometrijske karakteristike zavara [32, 48]

Na slici 37. su prikazane vidljive geometrijske nepravilnosti zavara nastali zbog ekstrema različitih parametara. Uslijed prikazanih ekstrema može doći do stvaranja grešaka u samom spoju zavara, što dokazuje potrebnu ozbiljnost pristupa prema TIG zavarivanju.

4.4.3. Protok i vrsta zaštitnog plina

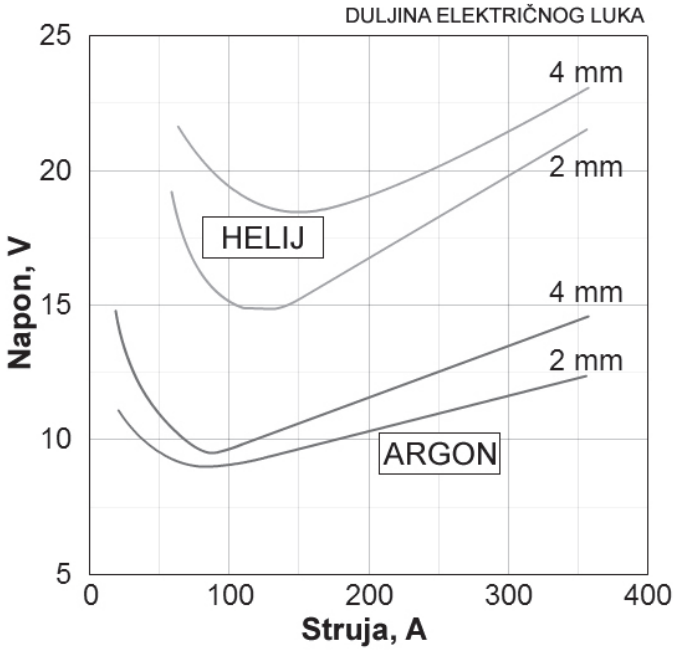
Plemeniti plinovi kao što su helij i argon spadaju u najčešće korištene zaštitne plinove kod TIG zavarivanja. Helij kao začetnik uporabe kod postupaka TIG zavarivanja predaje sve više poziciju argonu, koji danas ima sve češću primjenu. Zadaća ovih dvaju inertnih plinova je zaštititi rastaljeni materijal od vanjskog utjecaja atmosfere, postići pozitivan utjecaj na kvalitetu i stabilnost el. luka, ograničiti količinu para koje se tijekom zavarivanja oslobađaju, te estetski i geometrijski zadovoljiti zavareni spoj [31,32].



Slika 38. Učinak i oblik el. luka kod He i Ar [49]

Otežana uspostava el. luka kod helija je radi visokog ionizacijskog potencijala (24,5 eV). Karakteristična svojstva helija su mala masa (10 puta < mase argona), zbog koje su potrebni tri puta veći protoci nego kod argona. Ali toplinska vodljivost mu je veoma dobra te postiže širi el. luk i brži prijenos topline na radni komad s električnog luka, te daje veći toplinski input i penetraciju. Radi većeg toplinskog inputa helij je pogodan za zavarivanje debljih pozicija u materijala s velikom toplinskom vodljivošću (npr. bakar). Što se tiče zavarivanja tanjih materijala nije pogodan zbog povećanih napona pri nižim strujama (50-100 A). Tražena minimalna čistoća zaštitnog plina helija iznosi 99,99 % [31].

Kod TIG zavarivanja argon je najjeftiniji zaštitni plin. Osim niske cijene i ionizacijski potencijal mu je nizak (15,7 eV), što olakšava stabilnost i uspostavu el. luka. Argon zbog svoje veće mase (1,4 puta > zraka) štiti dobro rastaljeni materijal i ima potrebu za manjim protokom prilikom postupka zavarivanja. Zbog niže toplinske vodljivosti naspram helija, rezultira manjom penetracijom i protaljivanjem radi kompaktnijeg el. luka. Potreba za čistoćom argona iznosi minimalno 99,95 %, iznimno 99,997% [31, 32].



Slika 39. Ovisnost duljine el. luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja [31, 32]

Upotreba inertnih plinova (Ar i He) i njihovih mješavina detaljnije je prikazana u tablici 19. Osim Ar, He i njihovih mješavina, pogodno je dodati i manji udio vodika, koji pospješuje penetraciju zbog vrlo dobre toplinske vodljivosti. Dok dodatak dušika olakšava zavarivanje materijala s austenitnom građom [31].

Tablica 19. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [31, 32]

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

4.4.4. Dodatni materijal

Što se tiče dodatnih materijala kod TIG zavarivanja postupak se može izvoditi s i bez njih. Do debljine 3 mm osnovnog materijala koristi se zavarivanje bez dodatnog materijala, osim ako postoji potreba za dodatnim materijalom onda se on dodaje ručno ili automatizirano. Ručni postupak dodavanja materijala u zavareni spoj izvodi se sa šipkama dimenzija promjera i duljine oko 915 mm, Automatizirano dodavanje dodatnog materijala se mehanizira i dovodi u hladnom ili predgrijanom stanju do rastaljenog osnovnog materijala. Glavna prednost automatiziranog postupka je povećana produktivnost procesa, tj. veća količina depozita) [31, 32].



Slika 40. Primjer šipki od nehrđajućeg čelika za TIG zavarivanje [50]

4.5. Greške kod TIG zavarivanja

Kod TIG postupka zavarivanja do grešaka najčešće dolazi zbog loše pripreme komada za zavarivanje i radi lošeg odabira parametara zavarivanja. Svaki parametar i priprema imaju ulogu u kvalitetnoj izvedbi zavarenog spoja, stoga je poželjno već unaprijed predvidjeti probleme koji se mogu pojaviti. U tablici 20. opisane su neke od najčešćih grešaka koje se javljaju kod TIG zavarivanja.

Tablica 20. Vrste grešaka kod TIG zavarivanja [35]

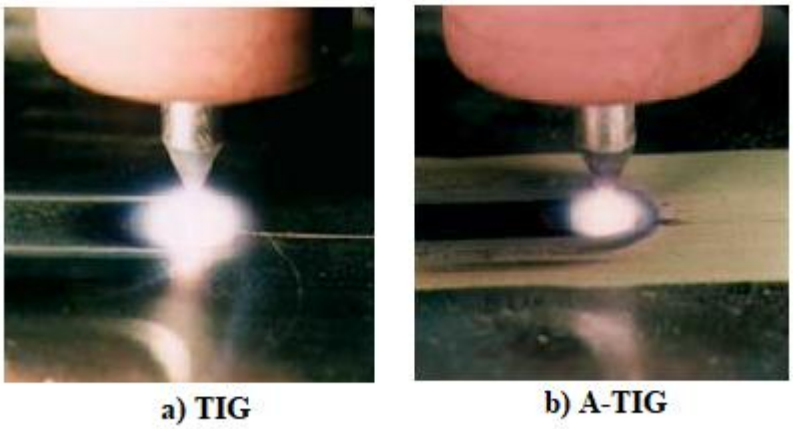
VRSTA GREŠAKA	OPIS
UKLJUČCI VOLFRAMA	Uzrokovani si lošom tehnikom izvođenja rada operatera te je došlo do dodira zagrijane elektrode s dodatnim materijalom ili talinom, tj. zavar se kontaminirao volframom. Izbjegavati prevelika opterećenja elektrode s jakom strujom.
OKSIDNA POVRŠINA	Može biti uzrokovana: nedovoljnim protjecanjem argona iz sapnice , nedovoljnom čistoćom zaštitnog plina argona ili prejakim električnim lukom. Javlja se kod zavarivanja aluminija i njegovih legura, a boja zavara je najčešće crna.
NALJEPLJIVANJE	Javlja se često kod materijala koji imaju veliku toplinsku vodljivost (bakar i bakrene legure). Talina ne smije bježati ispred el. luka na "hladni" i neprotaljeni dio materijala, jer će doći do naljepljivanja.
LOŠA GEOMETRIJA ZAVARA	Uzrokovana je lošim odabirom parametara, tj. neadekvatnom tehnikom.

5. Postupak A-TIG zavarivanja

5.1. Uvod

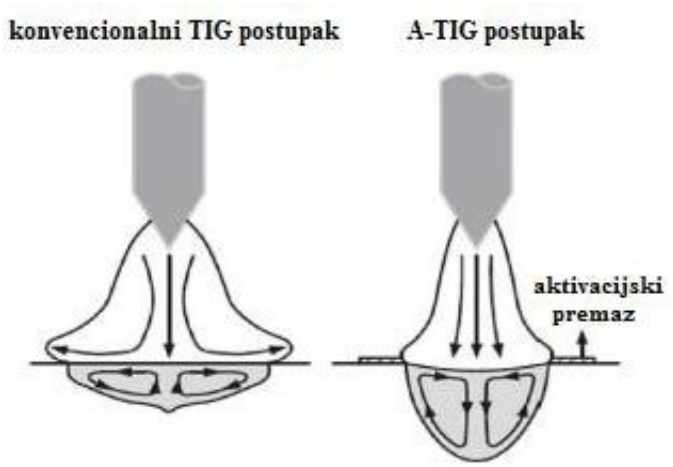
Nedostaci kod konvencionalnog TIG zavarivanja kao što su slaba penetracija i mali depozit utječu na produktivnost postupka u proizvodnji u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja. Kod komada debljine veće od 3 mm potrebno je provesti zavarivanje u više prolaza, što automatski smanjuje produktivnost postupka. Zbog navedenih problema počeo se razvijati A-TIG postupak zavarivanja s aktivacijskim premazom koji ima sve veću ulogu u proizvodnji [51].

Postupak A-TIG zavarivanja uključuje metodu za povećanje probojnosti luka u TIG zavarivanju. To se postiže nanošenjem tankog aktivacijskog premaza na površinu spoja prije zavarivanja. Smatra se da učinak aktivacijskog premaza ograničava luk, što povećava gustoću struje na anodi i djelovanje sile luka na mjesto spoja zavara. Suženi izgled A-TIG luka uspoređuje se s karakterističnim difuznim izgledom konvencionalnog TIG luka (slika 41.) [52].



Slika 41. Usporedba luka kod TIG i A-TIG postupka zavarivanja [52]

O uporabi aktivacijskih premaza za TIG zavarivanje prvi je objavio Institut za električno zavarivanje EO Paton u bivšem Sovjetskom Savezu 1950-ih. U novije vrijeme aktivacijski premazi su postali komercijalno dostupni iz više izvora. Tvrdi se da su ovi premazi prikladni za zavarivanje niza materijala, uključujući C-Mn čelik, Cr-Mo čelik, nehrđajući čelik i legure na bazi nikla. Premazi su obično dostupni u obliku aerosola ili kao paste (prašak u prahu pomiješan s pogodnim otapalom) koji se kistom nanosi na površinu. Aktivacijski premazi se mogu primijeniti u ručnom i mehaniziranom zavarivanju, kako bi se smanjio broj prolaza i time bi se povećala produktivnost zavarivanja. Uz pravilnu primjenu aktivacijskog premaza, moguće je postići potpunu protaljivost u jednom prolazu komada debljine čak i do 12 mm [51, 52].



Slika 42. Usporedba protaljivanja kod TIG i A-TIG postupka zavarivanja [51, 53]

5.2. Svojstva i sastav aktivacijskog premaza

Aktivacijski premaz se može prilagođavati, tj. mijenjati ovisno o svojstvima (mehanička, kemijska i toplinska) materijala koji je potrebno zavariti. Kako bi se povećala penetracija i gustoća energije el. luka, poželjno je da aktivacijski premaz sadrži elektrone poput oksida, fluorida i halida. Premaz sadrži različite komponente u prahu koje je potrebno pomiješati s etanolom ili acetonom [51, 54].

Komponente koje mogu biti dio sastava aktivacijskog premaza za zavarivanje bakra i bakrenih legura su [55]:

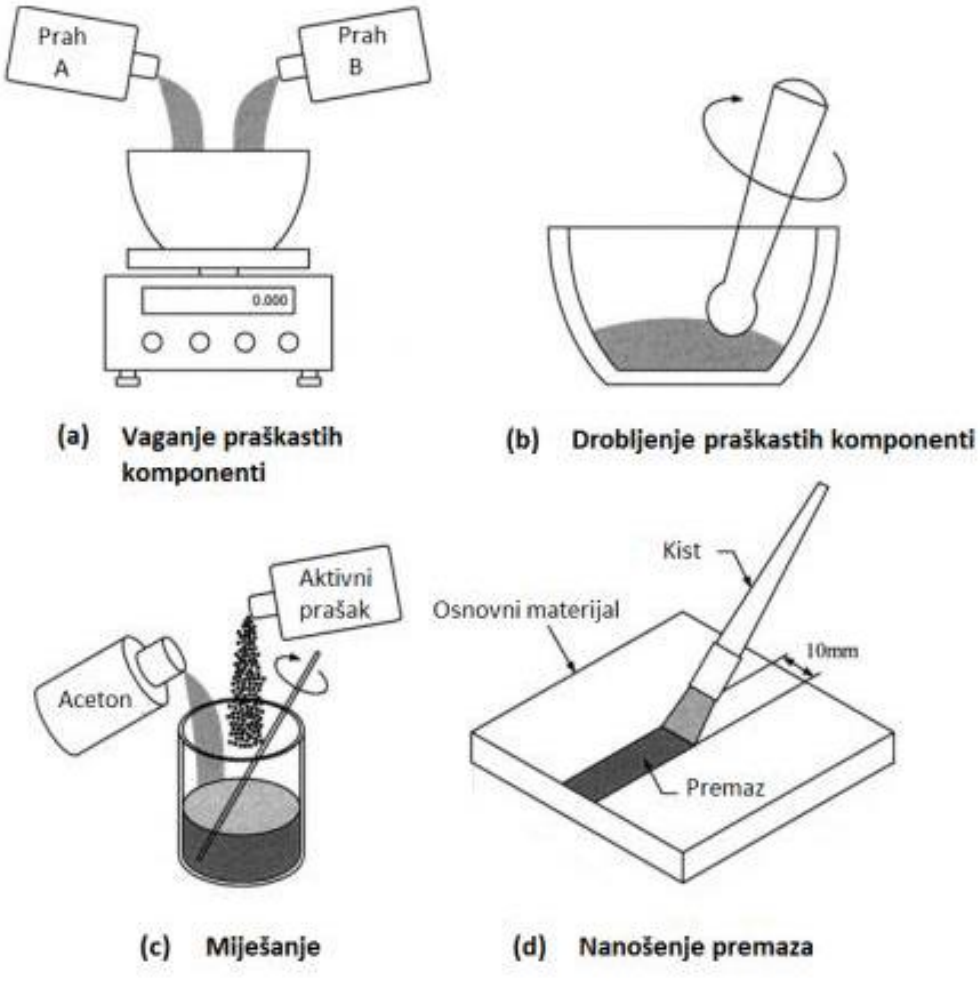
- Natrijev cijanid – NaCN
- Bakrov cijanid – $Cu(CN)_2$
- Natrijev hidroksid – NaOH
- Natrijev hidrosulfit – $Na_2S_2O_4$
- Natrijev nitrit – $NaNO_2$.

Kako bi se poboljšala efikasnost aktivacijskog premaza, poželjno je da talište osnovnog materijala bude približno slično talištu premaza. Isto tako da ne dođe do pogoršanja svojstava zavarenog spoja i do uništavanja izgleda zavara, aktivacijski premaz ne smije stvarati stabilne čvrste faze s talinom zavara [51, 53].

5.3. Princip rada A-TIG zavarivanja

A-TIG postupak zavarivanja je isti kao i konvencionalno TIG zavarivanje, jedino što se prije postupka zavarivanja nanosi aktivacijski premaz. Na slici 43. prikazan je postupak pripreme i nanosa aktivacijskog premaza u fazama. Faze postupka su sljedeće [56, 57]:

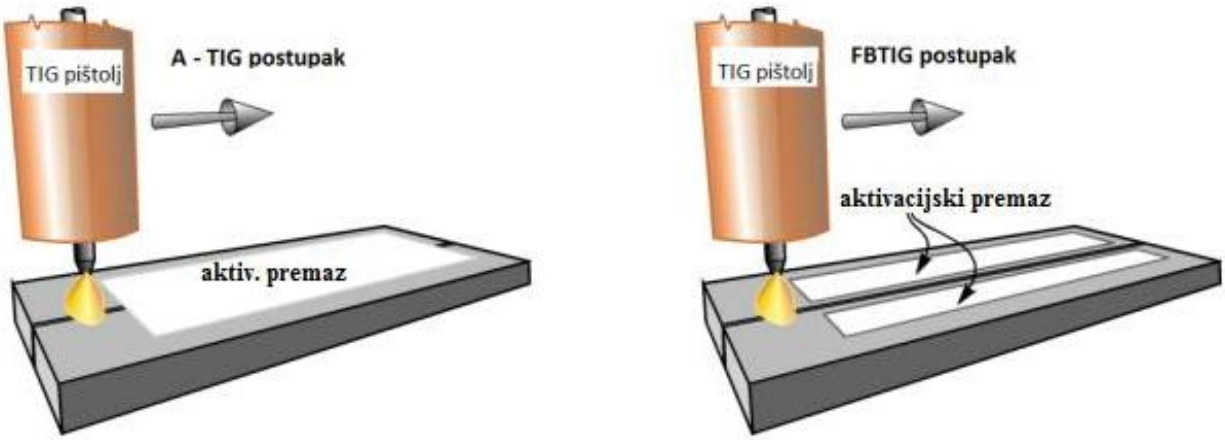
1. Određivanje postotka (udjela) praškastih komponenti
2. Usitnjavanje i homogenizacija komponenti u praškastom obliku
3. Miješanje acetona ili etanola s praškastim komponentama kako bi se postiglo kvašenje
4. Nanošenje ručno ili automatski dobivenog aktivacijskog talila pomoću kista. Potrebno je paziti da talilo ne curi unutar spoja i da je debljina premaza što je moguće ujednačena kako bi se osigurala optimalna stabilnost procesa.



Slika 43. Shematski prikaz priprave aktivacijskog talila, miješanja te nanošenje premaza na komad koji se zavaruje [51, 56]

5.3.1. Postupci nanošenja aktivacijskog premaza

Razlikuju se dvije vrte postupaka nanošenja aktivacijskog premaza (Slika 44.). Prvi postupak je tzv. A-TIG postupak, gdje se po čitavoj površini koja se zavaruje nanosi premaz. Dok se kod FBTIG (Flux- Bonded TIG) postupka vrši zavarivanje po određenoj namjerno ostavljenoj praznini. Kod ručnog izvođenja FBTIG ima određene prednosti naspram A-TIG zavarivanja, zbog manje ovisnosti o debljini premaza koji utječe na stabilnost procesa [58].



Slika 44. Shema A-TIG i FBTIG postupka zavarivanja [51, 58]

5.4. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavareni spoj

Istraživanjima svojstava i utjecaja aktivacijskog premaza na komad koji se zavaruje , došlo se do zaključka da postoje dva glavna mehanizma utjecaja aktivacijskog premaza, a to su [31, 51]:

- Mehanizam na temelju Marangonijevog efekta strujanja fluida
- Mehanizam povećanja energije el. luka (kontrakcija – suženje el. luka).

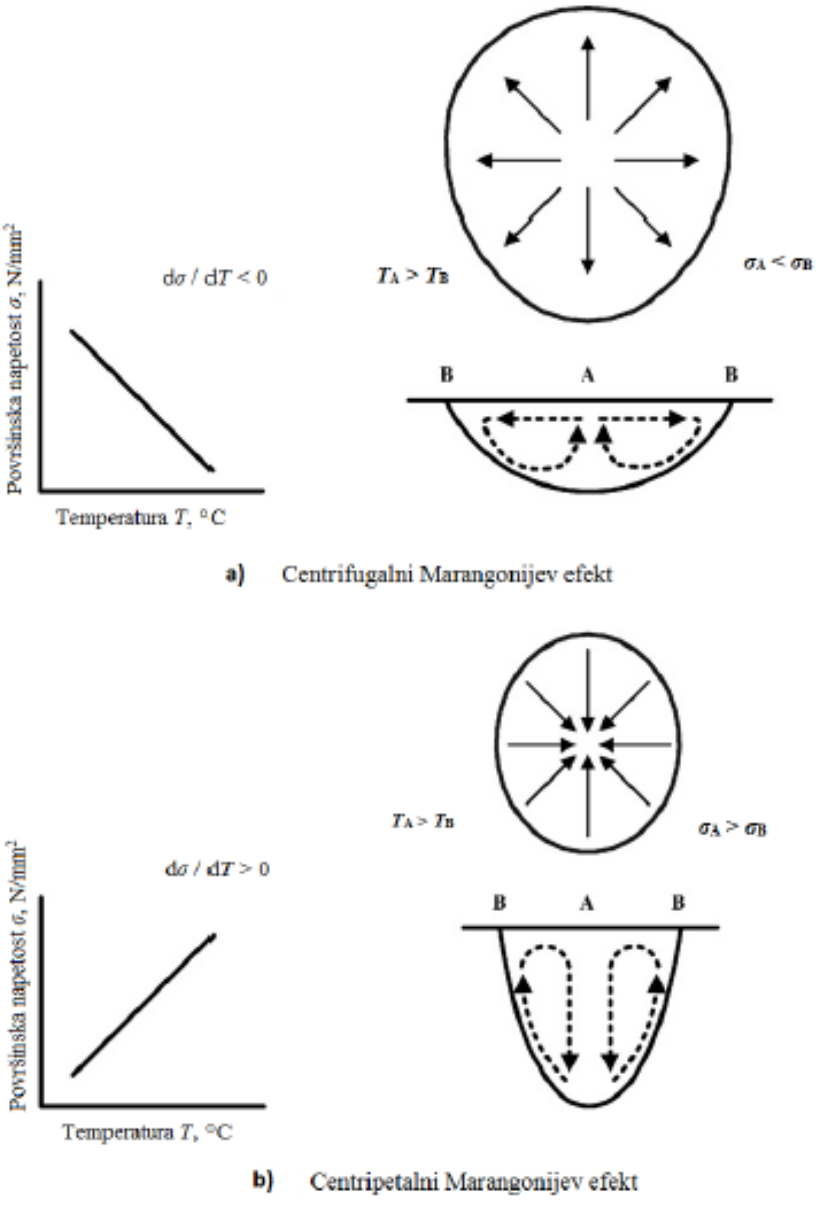
5.4.1. Marangonijev efekt

Ovaj efekt se koristi kod TIG i A-TIG postupaka zavarivanja za objašnjenje različitih vrsta profila taline. Odnosi se direktno na toplinski koeficijent površinske napetosti (TKPN) taline [31].

Tijekom TIG postupka bez aktivacijskog premaza TKPN dobiva negativnu vrijednost, što znači da periferna strana taline koja je hladnija ima veću površinsku napetost od srednjeg dijela. Radi toga se generira centrifugalni Marangonijev efekt u talini zavara, kao što je prikazano na slici

49a. Kod takvih uvjeta, tok taline se odvija lakše od centra taline zavara do rubova tvoreći plitki i široki profil zavara [59].

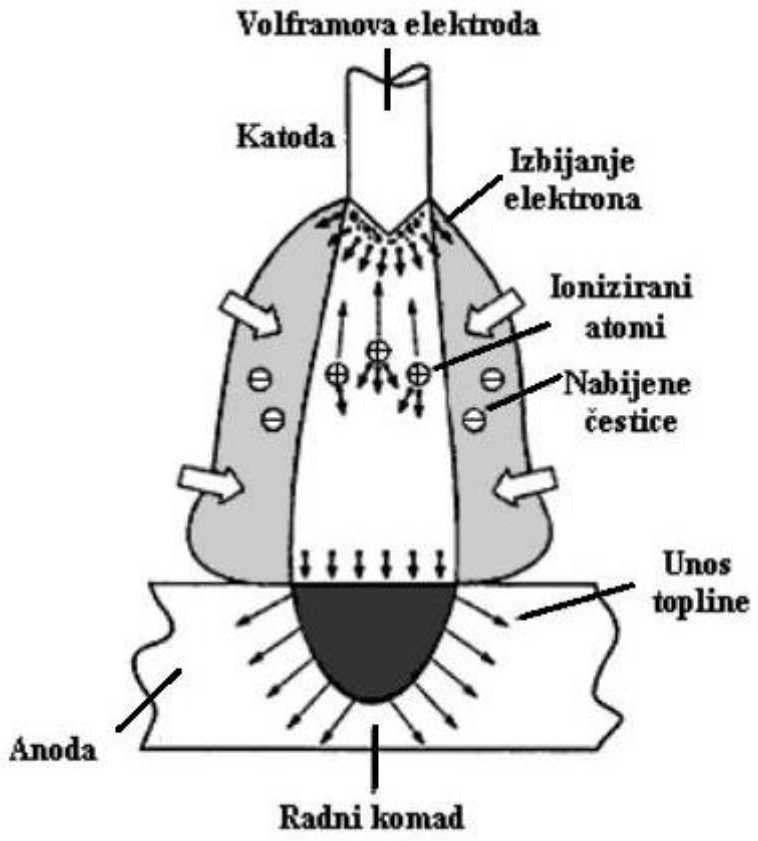
Kada se koristi postupak A-TIG zavarivanja, onda se TKPN mijenja iz negativne u pozitivnu vrijednost. Te su u ovom slučaju površinske napetosti veće u centru taline zavara nego na rubovima. Uslijed toga javlja se centripetalni Marangonijev efekt (slika 49b) kod kojeg je smjer strujanja taline od rubnih krajeva prema sredini. Zbog toga profil zavara ima suženi oblik i znatno veću penetraciju [59].



Slika 45. Shematski prikaz Marangonijevog efekta strujanja fluida u zavaru kod a) TIG postupka i b) A-TIG postupka [31, 59]

5.4.2. Kontrakcija električnog luka

Ovaj efekt je posljedica izravne ionizacije i disocijacije komponenti aktivacijskog premaza. Kako dolazi do suženja el. luka tako se povećava broj elektrona koji brže udaraju u talinu zavara i time povećavaju gustoću toplinske energije u središtu taline zavara i kontrakcija još ima za posljedicu povećanje temperature el. luka. Efekt apsorpcije elektrona utječe na kontrakciju el. luka, tako da se elektroni vežu uz disocirane atome i isparavajuće molekule stvarajući negativno nabijene čestice. Tako povezani elektroni zauzimaju samo mjesto u "hladnijem" dijelu periferije električnog snopa gdje sadrže znatno manju energiju. Ionizacija dominira u samom centru električnog snopa, što omogućuje postizanje znatno veće temperature i energije elektrona. Ograničava se struja u središnjem dijelu el. luka radi čega raste gustoća struje i stvaranje užeg električnog luka na radnom komadu (anodi). Time se postiže veća penetracija i uži zavareni spoj [60].



Slika 46. Shematski prikaz mehanizma kontrakcije električnog luka [51, 60]

5.5. Prednosti A-TIG zavarivanja i svojstva zavarenog spoja

A-TIG postupak zavarivanja postiže niz tehnoloških karakteristika koje dovode ovaj postupak u prednost naspram klasičnog TIG zavarivanja. Neke od najznačajnijih prednosti su [51, 61]:

- veća brzina zavarivanja, ne koristi se dodatni materijal i realizacija postupka je samo kretanjem
- mnogo lakše se izvodi, lakše se prilagođava teško pristupačnim položajima zavarenih spojeva (npr. kod kotlovskih postrojenja)
- postupak je lakši za automatizaciju
- bez dodatne potrebe za povećanjem struje zavarivanja i dodatne potrošnje zaštitnog plina, dolazi do kontrakcije el. luka uz paralelno smanjenje otpora rastaljenog metala u području zone zavarivanja
- veća dubina protaljivanja, ujedno i bolja (pouzdanija) kvaliteta zavarenog spoja, mogućnost zavara u jednom prolazu do 12 mm debljine kod jednostranog zavarivanja, a 24 mm debljine s obostranim zavarivanjem.
- moguće je naknadno otklanjanje grešaka u zavarenom spoju ponovnim protaljivanjem, zahvaljujući visokoj penetracijskog sposobnosti
- metal zavara je sitnozrnate strukture zbog koje su poboljšana svojstva kao što su otpornost prema toplim i hladnim pukotinama
- zavari visoke čvrstoće i s dugim vijekom trajanja.

6. Eksperimentalni rad

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad se obavljao u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Cilj ovog rada je bio ispitati može li se A-TIG zavarivanjem poboljšati učinkovitost i produktivnost zavarivanja bakra koristeći različite aktivacijske premaze.

Za eksperiment su se koristile limene ploče materijala Cu-ETP debljine 3 mm i dimenzija 150 x 200 mm. Prije samog zavarivanja ploče su se pripojile s gornje i donje strane kako ne bi došlo do pomicanja. Nakon toga određeni su sastavi aktivacijskih premaza koji su imali glavnu ulogu kod kvalitete zavara. Eksperiment se vršio automatiziranim A-TIG postupkom, te su se nakon toga zavareni limovi podvrgnuli ispitivanjima.

6.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal koristio se bakar oznaka Cu-ETP 1, 0X1000X2000 prema EN 13599 normi. Dimenzije limenih ploča 150 x 200 mm i debljine 3 mm. Karakteristike ovog bakra dane su u tablici 21.

Tablica 21. Karakteristike Cu-ETP bakra

Tip bakra	%Cu	R_m [N/mm^2]	Produljenje A50 %	R_{p0} [N/mm^2]	Električna provodljivost [SIM]
Cu-ETP	**99,900**	**266,3**	**37,2**	**202,4**	**57,0**

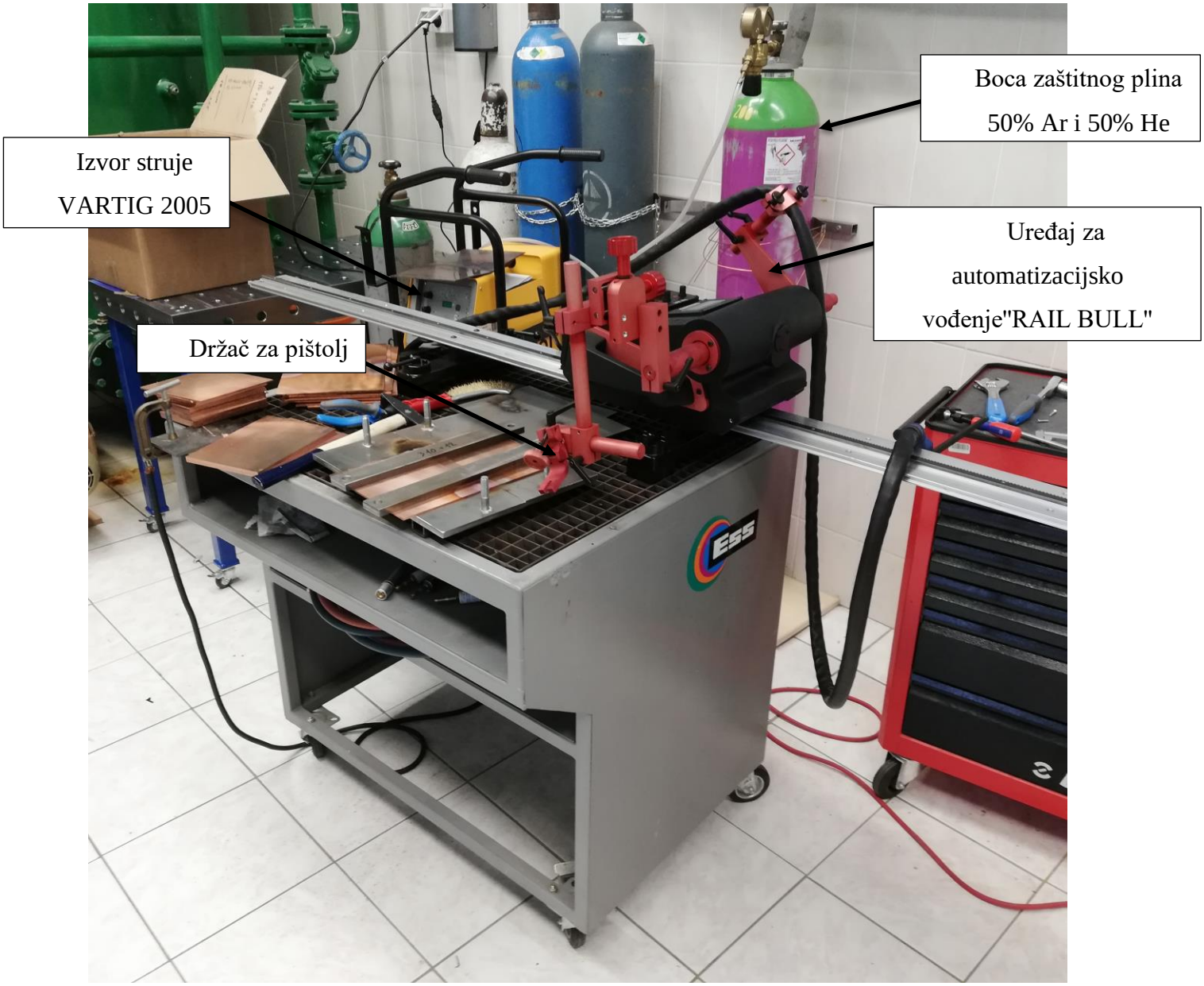
Material 3118453 - SHEETS Cu-ETP 1,0X1000X2000 R240(1/2T) EN, Total: 542,000
Batch V1375/20, Neto 542 KG
Standard: EN 13599 OR EN 1652

CHARACTERISTIC	UoM	MIN.	MAX.	RESULT
Sample 200154611				
1. % Cu	%	99,900	-	99,900 %
2. Tens. strength Rm	N/mm2	240,0	300,0	266,3 N/mm2
3. Elongation A50	%	8,0	-	37,2 %
4. Yield strength Rp0	N/mm2	180,0	-	202,4 N/mm2
5. electrical conduct	SIM	57,0	-	57,0 SIM

Slika 47. Certifikat (atest) za materijal Cu-EPT

6.3. Oprema za zavarivanje

Slika prikazuje sve potrebne elemente za izvršavanje automatskog A-TIG zavarivanja osim pištolja za zavarivanje koji je naknadno dodan. U nastavku će biti svaki dio zasebno prikazan i opisan.



Slika 48. Oprema i radno mjesto u labaratoriju za zvarivanje

6.3.1. Zaštitni plin

Kod ovog eksperimentalnog rada zaštitini plin je bio nepromjenjivi parametar. Sadržavao je 50% Ar i 50% He naziva Aluline He50 proizvođača Messer. Ova mješavina plinova pripada grupi I3 prema normi ISO 14175.



Slika 49. Boca zaštitnog plina Aluline He50 Messer

6.3.2. Izvor struje

Kao izvor struje za A-TIG zavarivanje korišten je uređaj VARTIG 2005 AC/DC (slika 54.), proizvođača Varstroj. Ovaj uređaj je u potpunosti digitalno upravljiv, dok su ostale karakteristike dane u tablici 22. Tijekom ovog rada korištena je istosmjerna struja (DC) i spoj elektrode na minus pol. U ovom slučaju jakost struje je bila promjenjiva komponenta koja je varirala od 132 A do 160 A, ovisno o svakom stanju eksperimenta.



Slika 50. Upravljačka ploča sa digitalnim prikazom jakosti struje

Tablica 22. Karakteristike VARTIG 2005 AC/DC uređaja

TIP	VARTIG 2005 AC/DC digit
Osigurač	20 A
Područje zavarivanja	TIG DC 5 – 170 A
	TIG AC 5 – 200 A
Intermitencija	35% /
	40% 200/170 A
	60% 160/140 A
	100% 130/110 A
Snaga zavarivanja	TIG 10 – 16,8 V
Hlađenje	Prisilno
Ukupna masa	18 kg
Dimenzije DxŠxV [mm]	440x220x480

6.3.3. Oprema za automatizaciju postupka zavarivanja

Za lakše i preciznije zavarivanje koristio se uređaj za automatizaciju RAIL BULL proizvođača Promotech, koji je služio za automatsko vođenje pištolja. Pomoću njega pištolj se postavi u željeni položaj, odnosno u ovom slučaju je bio postavljen tako da elektroda pištolja bude udaljena 5 mm od uzorka za zavarivanje. Na slici 51. prikazana je kontrolna ploča uređaja, pomoću koje se je određivala brzina zavarivanja i samo upravljanje uređaja.



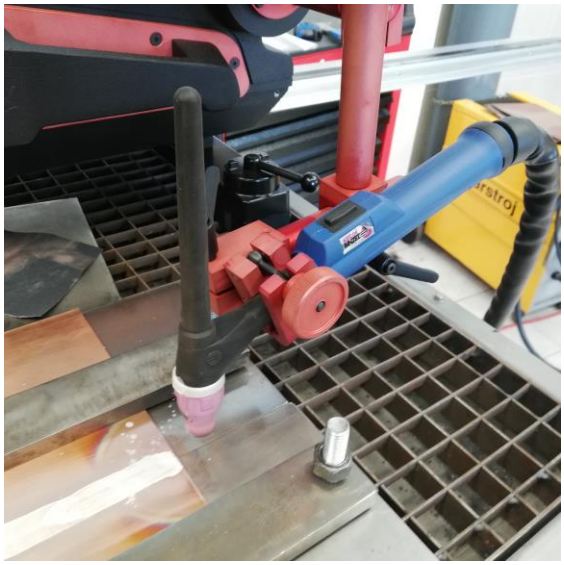
Slika 51. Kontrolna ploča uređaja za automatsko zavarivanje



Slika 52. RAIL BULL uređaj za automatizacijsko zavarivanje

6.3.4. Pištolj za A-TIG zavarivanje

Kao što je i ranije navedeno, pištolj je pričvršćen za automatizacijski uređaj kojim smo odredili visinu elektrode od osnovnog materijala, iznosila je konstantno za sve primjere 5 mm. Oznaka elektrode WLa15 gold označuje da je to netaljiva volframova elektroda prekrivena lantanovim oksidima i da je dodatno pozlaćena na vrhovima (slika 54.). Promjer elektrode je 3,2 mm dok je dužina 175 mm. Sapnica pištolja je od keramike i unutarnji promjer joj iznosi 13 mm. Što se tiče protoka zaštitnog plina on je konstantno iznosio 20 L/min.



Slika 53. Pištolj za zavarivanje

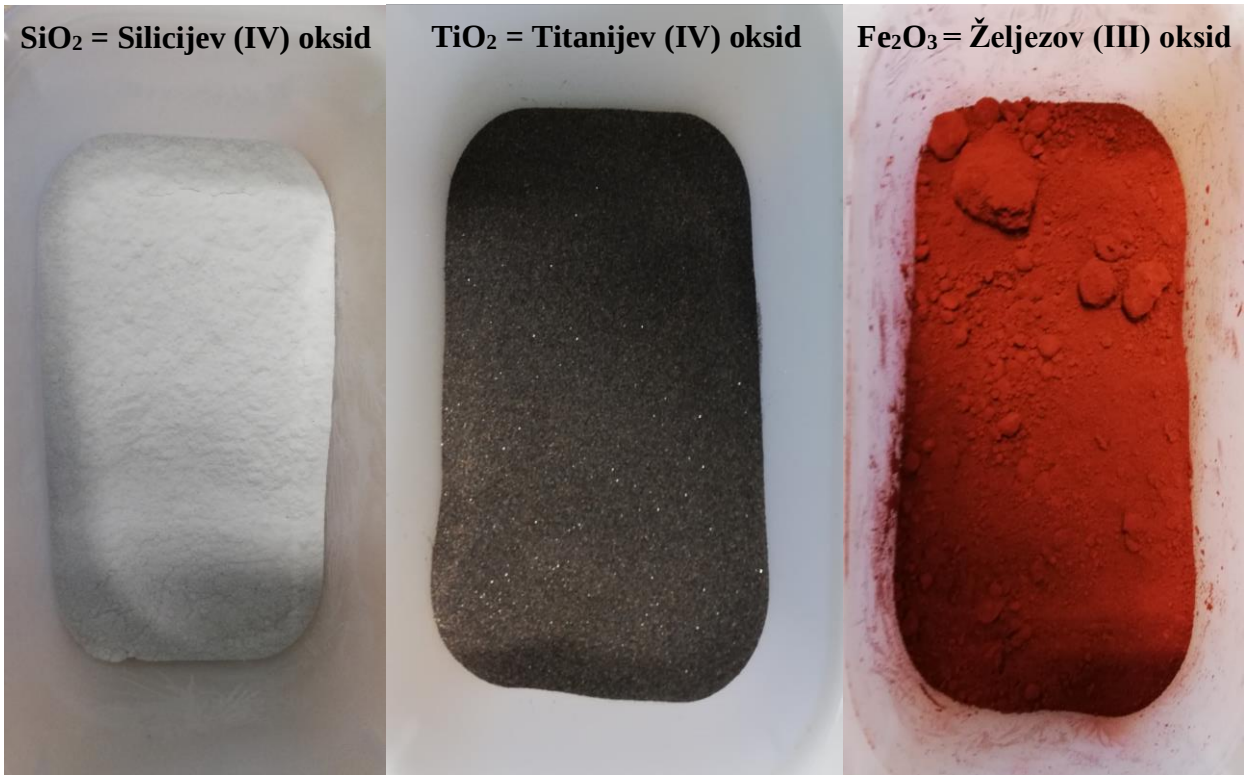


Slika 54. Wla15 gold Wolframove elektrode

6.4. Aktivacijski premaz

Za eksperiment su korištene 3 vrste praškastih komponenti kako bi uvidjeli razliku utjecaja aktivacijskog premaza. Praškaste komponente koje su korištene su :

- SiO_2 = Silicijev (IV) oksid
- TiO_2 = Titanijev (IV) oksid
- Fe_2O_3 = Željezov (III) oksid



Slika 55. Praškasti uzorci aktivacijskih komponenti korištenih u ovom radu

Kako bi se dobila pasta, tj. aktivacijski premaz, praškaste komponente je potrebno pomiješati sa 70% etanolom u staklenim posudicama. Količina etanola u miješavinama je bila konstantna, a iznosila je 20 ml.

6.5. Korišteni parametri

6.5.1. Konstantni parametri

Tijekom rada konstantni parametri su:

- Vrsta zaštitnog plina – smijesa plinova koja sadržava 50% Ar i 50% He
- Protok zaštitnog plina – 20 l/min
- Promjer sapnice – 13 mm
- volframova elektroda – dimenzija 3,2x175 mm
- Visina udaljenosti vrha elektrode od radnog komada – 5 mm
- Polaritet i vrsta struje – DC (-)

6.5.2. Promjenjivi parametri

Promjenjivi parametri tokom rada su:

- Unos topline – unos topline se regulirali s dva promjenjiva parametra a to su jakost struje i brzina zavarivanja. Kako bi odredili iznos unosa topline, potrebno je izračunati pomoću formule:

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

gdje je:

Q = Unos topline [kJ/mm]

k = Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (k = 0,6 za TIG)

U = Napon [V]

I = Jakost struje zavarivanja [A]

v = Brzina zavarivanja [mm/min]

- Temperatura ploča za zavarivanje – neki od primjera su predgrijavani na određenu temperaturu
- Primjena aktivacijskog premaza – u prva dva slučaja aktivacijski premaz se nije koristio, dok se u ostalim primjerima aktivacijski premaz razlikovao u sastavu

Tablica 23. Prikaz parametara za određeni uzorak

Uzorak	Premaz	Predgrijavanje	Vrsta premaza	Brzina zavarivanja [cm/min]	Jakost Struje [A]	Unos topline [kJ/mm]
01	NE	DA, na 200 °C	-	6	160	1,19
02	NE	DA, na 200 °C	-	6	150	1,12
03	DA	NE	SiO_2 (14 g) + 20 ml etanola	5	140	1,25
04	DA	NE	SiO_2 (14 g) + 20 ml etanola	5	132	1,18
05	DA	NE	SiO_2 (14 g) + 20 ml etanola	6	140	1,04
06	DA	NE	TiO_2 (20 g) + SiO_2 (5 g) + 20 ml etanola	5	132	1,18
07	DA	NE	Fe_2O_3 (10 g) + 20 ml etanola	5	132	1,18

6.6. Opis izvođenja procesa zavarivanja

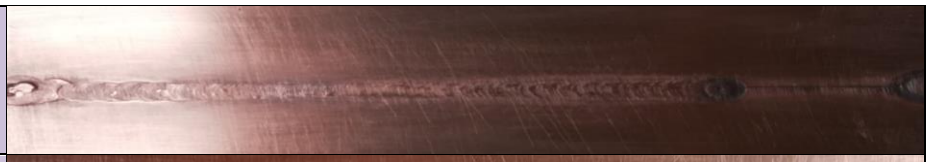
Prije samog početka zavarivanja bilo je potrebno pripremiti nekoliko ključnih elemenata. Kao što je navedeno u radu se koristila wolframova elektroda koju je trebalo nabrusiti prije početka rada pod određenim kutom i očistiti kako bi postigli što bolji električni luk. Uzorke limenih ploča bilo je potrebno sučeljeno spojiti "I" pripremom bez razmaka s gornje i donje strane kako se ploče ne bi pomicale tijekom zavarivanja. Nakon toga uzorci se pričvršćuju i centriraju na stol za zavarivanje. Dimenzije uzoraka (ploča) na kojima se izvodilo zavarivanje su 300x200 mm. Nakon toga na određene uzorke kao što piše u tablici 23. su se nanosili pripremljeni premazi. Aktivacijski premaz se je nanosio kistom jednoliko u jednom potezu kako bi se postigla što sličnija svojstva čitavoj dužinu zavara. Nakon postupka zavarivanja uzorak je potrebno očistiti od troske i provesti vizualnu kontrolu.

7. Analiza rezultata ispitivanja

7.1. Rezultati vizualne kontrole zavara

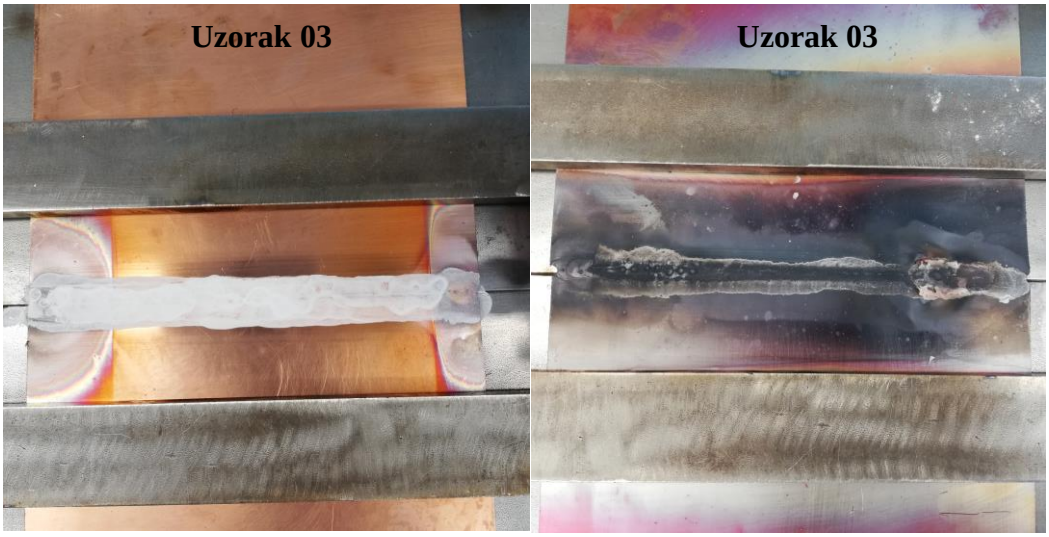
Kod uzorka 01 i 02 specifično je predgrijavanje na 200 stupnjeva Celzijusovih kako bi se smanjili toplinski gubici tijekom zavarivanja. Predgrijavanje se vršilo kontaktno pomoću električnog grijača, a digitalnim mjernim instrumentom UNI-T, mjerila se temperatura predgrijavanih limova.

Tablica 24. Prikaz zavara s prednje i stražnje strane uzorka 01 i 02

01	**Prednja strana**	
	Stražnja strana	
02	**Prednja strana**	
	Stražnja strana	

Nakon zavarivanja uzorci su očišćeni od troske kako bi se jasnije vidio zavareni spoj. Kod uzorka 01 i 02 razlika je samo u jačini struje i kod ovih uzoraka se nisu koristili aktivacijski premazi. Rezultat zavarivanja daje jasan zaključak već kod vizualne kontrole. Kod uzorka 01 vidljivo je sa stražnje strane da se kroz veći dio spoja osnovni materijal nije uopće protalio i nije stvorio spoj. A kod uzorka 02 je još jasnije da se osnovni materijal nije protalio, zbog korištenja manje jakosti struje u odnosu na uzorak 01.Te se dolazi do glavnog zaključka da se ovaj materijal ne može zavariti s tim parametrima (Tablica 23.).

Sljedeći uzorci koji su se zavarivali sa sebi sličnim parametrima su 03, 04 i 05. Kod ovih uzoraka se nije koristilo predgrijavanje, nego aktivacijski premaz koji sadrži SiO_2 (14 g) + 20 ml etanola (70% alkohola). Pomoću aktivacijskog premaza sprječavalo se rasipanje topline tijekom zavarivanja.



Slika 56. Prikaz nanesenog aktivacijskog premaza prije zavarivanja i izgled zavara nakon zavarivanja

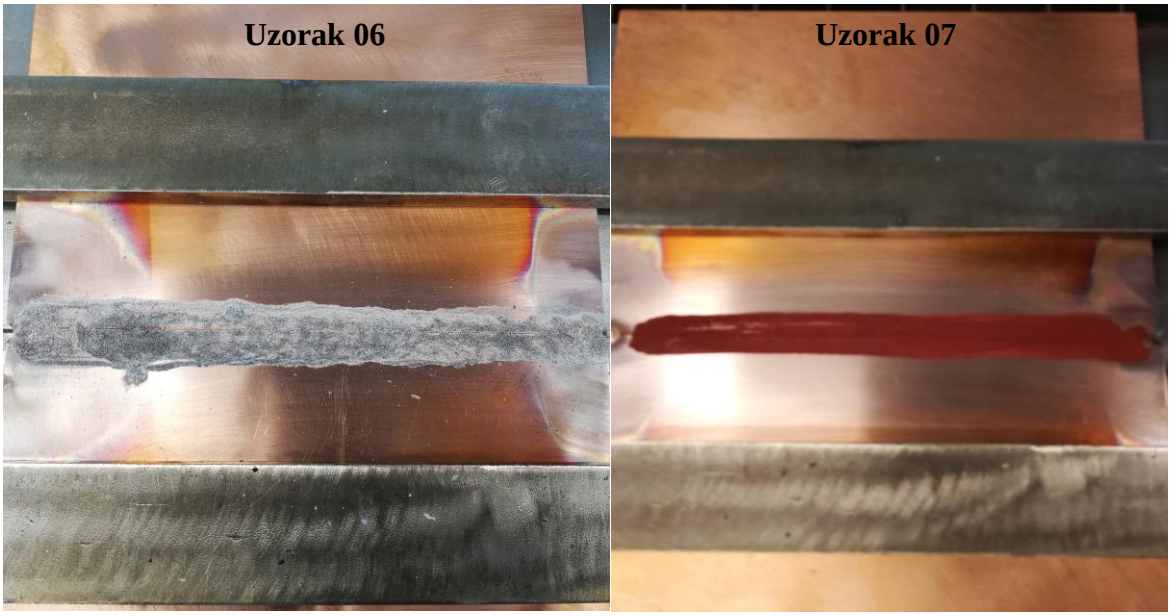
Aktivacijski premaz se nanosio kistom u jednom potezu, kako bi se postigla što sličnija svojstva zavara. Nakon postupka zavarivanja na zavaru je ostala troska, koju je potrebno otkloniti kako bi se izvršila vizualna kontrola.

Tablica 25. Prikaz zavara s prednje i stražnje strane uzorka 03, 04 i 05

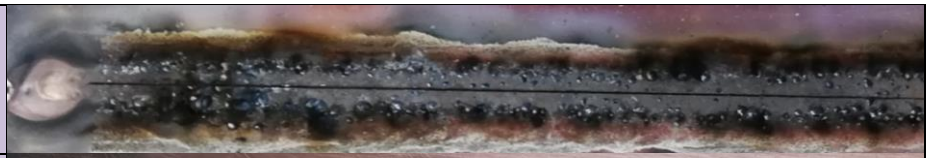
03	**Prednja strana**	
	Stražnja strana	
04	**Prednja strana**	
	Stražnja strana	
05	**Prednja strana**	
	Stražnja strana	

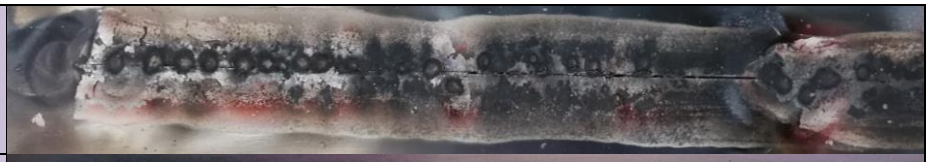
Dodavanjem aktivacijskog premaza već se na prvi pogled uočava razlika u zavaru naspram uzorka 01 i 02. Kod uzorka 03 osnovni materijal se protalio na trećini zavara, a razlog tome je što su toplinski gubici najveći na sredini. Kao što je i vidljivo sa stražnje strane, osnovni materijal se nije uspio protaliti na srednjem dijelu zavara. Uzorak 04 ima sve iste parametre ali smo mu smanjili jakost struje na 132 A, što je očekivano dovelo do slabijeg zavara nego kod uzorka 03. Sa stražnje strane je vidljivo da se osnovni materijal nije protalio, te se odmah može zaključiti da s tim parametrima ovaj materijal nije moguće zavariti. Što se tiče uzorka 05, kod njega smo vratili jakost struje na 140 A ali smo i povećali brzinu zavarivanja na 6 cm/min. S prednje i stražnje strane uzorak na prvi pogled daje pozitivne rezultate, te će se daljnjim kontrolama utvrditi kvaliteta ispravnost i kvaliteta zavara.

Uzorci 06 i 07 sadrže jednake parametre, kao što su jačina struje 132 A i brzina zavarivanja 5 cm/min, ali razlika je u vrsti sastava aktivacijskog premaza. Kod uzorka 06 koristio se premaz mješavine 20 g TiO_2 i 5 g SiO_2 pomiješanih u 20 ml 70% etanolom.Dok se kod uzorka 07 koristio aktivacijski premaz od 10 g Fe_2O_3 pomiješanog u 20 ml 70% etanola.



Slika 57. Prikaz nanešenih aktivacijskih premaza prije zavarivanja

06	**Neočišćena prednja strana**	
	Očišćena prednja strana	

07	**Neočišćena prednja strana**	
	Očišćena prednja strana	

Tablica 26. Prikaz neočišćenih i očišćenih zavara s prednjes strane

Uzorci 06 i 07 vizualnom kontrolom pokazali su neuspjeli pokušaj zavarivanja aktivacijskim premazima. Posljedica toga je u kemijskim sastavima premaza koji u potpunosti ne odgovaraju osnovnom materijalu. Ti i Fe u periodnom sustavu elemenata spadaju u lake metale, što ima za negativan utjecaj kod bakra, tj. povećavaju toplinske gubitke tijekom zavarivanja u doticaju s bakrom. Dok Si spada u polumetale i svojim kemijskim sastavom doprinosi smanjenju toplinskih gubitaka u doticaju s bakrom što je vidljivo na uzorcima 03, 04 i 05.

7.2. Analiza poprečnih presjeka zavarenih spojeva

Iz zavarenih spojeva uzoraka 01, 03 i 05 izrađeni su makroizbrusci kako bi se analizirala geometrija i moguće postojanje pogrešaka u zavarenim spojevima.

Na tračnoj pili izrezani su poprečni presjeci zavarenih spojeva veličine 30 x 10 x 3 mm. Nakon izrezivanja uzorci su brušeni uz ispiranje vodom na brusnom papiru sljedećih granulacija:

1. P180
2. P320
3. P600
4. P1000
5. P1500

Nakon brušenja bilo je potrebno nagristi uzorke na brušenim površinama kako bi se jasnije vidjela struktura zavarenog spoja i osnovnog materijala.

Prvo nagrizavanje provedeno je u trajanju od 30 sekundi u reagensu sastavljenom od:

- 5 g $FeCl_3$
- 30 ml HCl
- 100 ml destilirane vode

Nakon nagrizavanja na uzorcima se nije jasno vidjelo područje zavarenog spoja. Stoga je ponovno izvršeno brušenje prema prethodno navedenoj proceduri i nagrizavanje u drugom reagensu sastavljenom od:

- 25 ml NH_4OH - amonijev hidroksid
- 25 ml destilirane vode
- 50 ml H_2O_2 (3%) - vodikov peroksid

Nakon nagrizavanja na uzorcima se nije jasno vidjelo područje zavarenog spoja. Stoga je ponovno izvršeno brušenje prema prethodno navedenoj proceduri i nagrizavanje u trećem reagensu sastavljenom od:

- 50 ml NH_3 - amonijak
- 100 ml hidrogen peroksida (3%)
- 50 ml destilirane vode

Niti treći reagens nije ocrtao zavareni spoj na poprečnim presjecima. Stoga je zaključak da se zbog monofazne strukture bakra i zavarivanja bez unošenja dodatnog materijala kojim bi se mogli unijeti dodatni legirni elementi ne može jasno razlikovati struktura metala zavara od strukture metala osnovnog materijala. Također zbog vrlo brzog odvođenja topline ne može se vidjeti niti zona utjecaja topline na makroizbruscima.

Uzorci su snimani na mikroskopu proizvođača BTC pomoću digitalne kamere Canon EOS 200d.



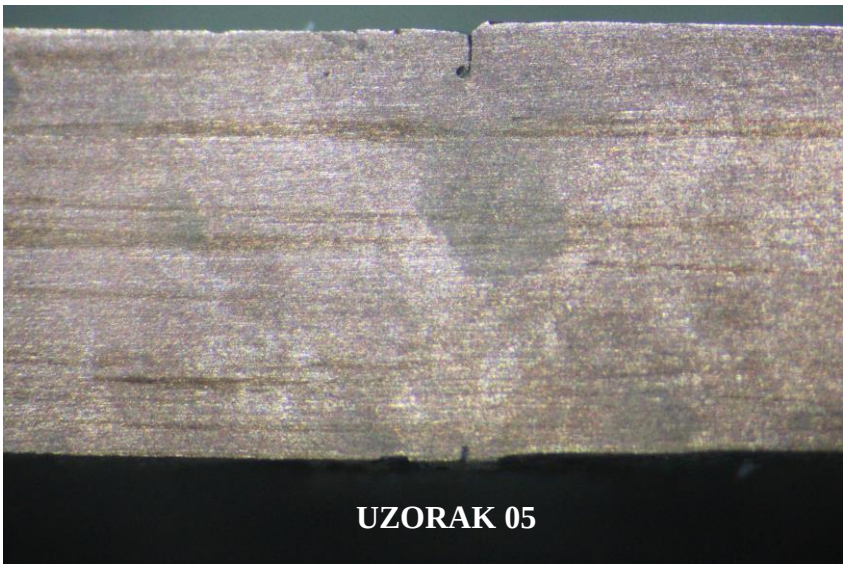
Slika 58. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 01

Na uzorku 01 se ne vidi linija između limova stoga je zavar izveden po čitavom presjeku. Također se vidi više pora veličine oko 0.1 mm u donjem dijelu zavarenog spoja.



Slika 59. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 03

Na uzorku 03 se također ne vidi linija, ali se vidi jedna pora veličine oko 0.2 mm u donjem dijelu.



Slika 60. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 05

Na uzorku 05 se vidi pogreška u povezivanju materijala u gornjem i u donjem dijelu zavarenog spoja. Većina presjeka materijala ipak je povezana.

8. Zaključak

Zbog visoke toplinske vodljivosti i visoke električne vodljivosti bakra, kod elektrolučnog zavarivanja potrebno je unijeti više energije nego npr. kao kod čelika. Potrebno je predgrijavanje na temperaturu od 100 °C do maksimalno 600 °C po 1 mm debljine osnovnog materijala, što dovodi do dodatnih utrošaka energije i mogućih odstupanja prilikom predgrijavanja. Teško je održati temperaturu zbog visoke toplinske provodljivosti i potrebno je paziti da ne dođe do pregrijavanja područja oko zavara. U tom slučaju potrebne su velike struje zavarivanja i kratka vremena, kako bi se omogućilo točkasto zavarivanje bakrenih limova.

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj aktivacijskih premaza na kvalitetu zavarljivosti bakra. Analizom dobivenih rezultata utvrdio se utjecaj aktivacijskih premaza, ali isto tako i utjecaj ostalih parametara kao što su: jakost struje zavarivanja i brzina zavarivanja.

S ciljem uspoređivanja rezultata različitih tipova aktivacijskih premaza u odnosu na uzorke bez premaza izvršeno je automatizirano A-TIG zavarivanje bakra. Na taj se način uklonio ljudski faktor na sljedivost zavarivanja. Analizom rezultata utvrdilo se da svaki od ispitanih A-TIG zavarenih uzoraka ima različitu kvalitetu zavarenog spoja.

Uzorci 01 i 02 nisu sadržavali aktivacijski premaz, ali su bili predgrijavani na 200 °C, što je u praksi problem jer iziskuje dodatnu operaciju, a isto tako i dodatan utrošak energije. Analizom zavara uzorak 01 je pokazao zadovoljavajući rezultat potpunog protaljivanja materijala vidljivog na makropresjeku, dok se kod uzorka 02 materijal nije protalio radi preslabe struje zavarivanja.

Aktivacijski premazi koji su pozitivno utjecali na proces zavarivanja bakra su oni koji su bili korišteni na uzorcima 03, 04 i 05. Od ova tri uzorka, uzorak 03 je pokazao najbolju kvalitetu zavara i stoga su njegovi parametri zadovoljavajući. Dok se kod uzoraka 04 pojavljuju problemi zbog preslabe struje zavarivanja, a kod uzorka 05 dolazi do pogrešaka radi prevelike brzine zavarivanja.

Zaključak rada je unaprjeđenje procesa zavarivanja kod uzorka 03 naspram uzorak 01 gdje je korišteno predgrijavanje, dok se kod uzorka 03 koristio aktivacijski premaz, slabija struja zavarivanja i manja brzina zavarivanja. Što je na kraju dovelo do sličnih rezultata, ali do velikih smanjenja utrošaka energije i pojednostavljenja procesa koja dovode do smanjenja odstupanja prilikom pripreme zavara.

U konačnici kao što je navedeno u teorijskom dijelu, zavarivanje bakra je veliki izazov koji iziskuje poznavanje kemijskih i fizikalnih svojstava bakra, ali isto tako i poznavanje vrsta zavarivanja i sastave aktivacijskih premaza koji bi pozitivno utjecali na zavarivanje bakra.

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, Luka Obelić *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom A-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:
(Luka Obelić)

(vlastoručni potpis)

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

Ja, Luka Obelić *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom A-TIG zavarivanje bakra i legura bakra (upisati *naslov) čiji sam autor.*

Student:
(Luka Obelić)

(vlastoručni potpis)

Literatura

[1] T. Filetin, F. Kovačiček, J.Indof: SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2009.

[2] T. Filetin: BAKAR I BAKROVE LEGURE (Tema 2.21), IWE tečaj, FSB, Zavod za materijale

[3] D. Mašinović: ISPITIVANJE SVOJSTAVA BAKRENE I ALUMINIJSKE LEGURE I NJIHOVA SPOJA ZA PRIMJENU U ELEKTROTEHNICI, Završni rad, MF, Sisak, 2016.

[4] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: MATERIJALI 1, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2014.

[5] https://www.thoughtco.com/copper-facts-chemical-and-physical-properties-606521, dostupno 17.6.2020.

[6] B. Bauer: ZAVARIVANJE BAKRA, EWE 2.21.

[7] I. Gabrić, S. Šitić: MATERIJALI I, Sveučilište u Splitu, Studij: Konstrukcijsko strojarstvo, Split, 2012.

[8] B. Tubić: UTJECAJ MEDIJA I TEMPERATURE NA KOROZIJSKA SVOJSTVA I MIKROSTRUKTURU BAKRA I MESINGA, Završni rad, MF, Sisak, 2017.

[9] https://www.elcas.nl/en/brass/cuzn39pb3/bar, dostupno 23.6.2020.

[10] https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-1709-1981-11--399431_SAIG_DIN_DIN_905718/, dostupno 24.6.2020.

[11] K. G. Krieg, W. Heller, G. Hunecke: Leitfaden der DIN-Normen, Stuttgart, 1983. Na:https://books.google.hr/books?id=LoaTBwAAQBAJ&pg=PA125&lpg=PA125&dq=DIN+17663+I+17672&source=bl&ots=077798x4IL&sig=ACfU3U3VU4vJHtq6IHH2kT7qVy1frbEhTQ&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwjyyJr75ZrqAhVQ0aYKHYzhAVoQ6AEwAnoECAYQAQ#v=onepage&q=DIN%2017663%20I%2017672&f=false, dostupno 24.6.2020.

[12] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=9685, dostupno 24.6.2020.

[13] https://www.copperalloys.net/alloys/din-17662-w-nr-2-1030, dostupno 25.6.2020.

[14] https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/cu_tin.html, 25.6.2020.

[15] https://www.copperalloys.net/alloys/din-1705-g-CuSn10Zn-2-1086-01, dostupno 25.6.2020.

[16] https://www.copperalloys.net/alloys/din-17665-wn-2-0978, dostupno 26.6.2020.

[17] https://www.elcas.nl/en/aluminiumbronze, dostupno 26.6.2020.

[18] https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/al_bronzes.html, dostupno 26.6.2020.

[19] https://matmatch.com/materials/alky4094-din-1716-grade-cc496k, dostupno 27.6.2020.

[20] https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/cu_tin.html, dostupno 27.6.2020.

[21] https://www.georgesbasement.com/Microstructures/NonFerrousAlloys/Lesson-2/Specimen02.htm, dostupno 29.6.2020.

[22] https://www.georgesbasement.com/Microstructures/NonFerrousAlloys/Lesson-3/Specimen03.htm, dostpuno 29.6.2020.

[23] https://www.georgesbasement.com/Microstructures/NonFerrousAlloys/Lesson-3/Specimen06.htm, dostupno 29.6.2020.

[24] https://www.copperalloys.net/alloys/din-17664-w-nr-2-0872, dostpuno 30.6.2020.

[25] L. Brown: COST-EFFECTIVE MANUFACRTURING: JOINING OF COPPER AND COPPER ALLOYS, CDA Publication, 1994.

[26] M. Gojić: TEHNIKE SPAJANJA I RAZDVAJANJA MATERIJALA, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, MF, Sisak, 2008.

[27] S.Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: ZAVARIVAČKI I SRODNI POSTUPCI, Priručnik, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i FSB (katedra za zavarene konstrukcije), Zagreb, 2015.

[28] D. Delač: KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ZAVARIVANJA PREMA HRN EN ISO 4063, Završni rad, FSB, Zagreb, 2014.

[29] M. Sermek: Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja, Završni rad, UNIN, Varaždin, 2019.

[30] https://tehnika.lzmk.hr/zavarivanje/, dostupno 6.8.2020.

[31] N. Babić: A-TIG ZAVARIVANJE DUPLEX ČELIKA, Diplomski rad. FSB, 2016.

[32] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: TEORIJSKE I PRAKTIČNE OSNOVE TIG POSTUPKA ZAVARIVANJA, Tehnical journal 8, 426-432, 2014.

[33] https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding, dostupno 10.8.2020.

[34] https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/c5/3f/8ebcd548700da1/US2274631.pdf, dostupno 10.8.2020.

[35] L. Čolić: ROBOTIZIRANO ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA A-TIG POSTUPKOM, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.

[36] https://tsi.webador.com/tois-tig-postupak-zavarivanja, dostupno 10.8.2020.

[37] http://www.infotrend.hr/clanak/2015/9/na-pragu-robotske-revolucije,86,1199.html, dostupno 10.8.2020.

[38] https://primeweld.com/blogs/news/the-evolution-of-tig-welding, dostupno 10.8.2020.

[39] https://materion.com/-/media/files/alloy/tech-briefs/at0014-0311---tech-briefs---welding-copper-beryllium.pdf, dostupno 10.8.2020.

[40] Pettersson,C.-O.: The MIG/MAG Process, A Good Choice When Welding Duplex Stainless Steels, 6th World Conference Duplex Stainless Steels, 513-520, 2000.

[41] I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić: PRIMJENA TIG POSTUPKA ZAVARIVANJA U SPAJANJU POZICIJA, Tehnical journal 9, 202-208, 2015.

[42] https://www.weldability-sif.com/media/docs/Intro_TIG_Welding.pdf, dostupno 10.8.2020.

[43] https://openbook.millerwelds.com, dostupno 17.8.2020.

[44] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-a-tig-welding-2000, dostupno 17.8.2020.

[45] http://www.mooseforge.com/Welding/tig.html, dostupno 17.8.2020.

[46] https://www.millerwelds.com/resources/welding-guides, dostupno 18.8.2020.

[47] https://www.electro-cal.com/pdf/TIG_Welding.pdf, TIG welding – Method and Application.pdf, dostupno 18.8.2020.

[48] http://navybmr.com/study%20material/14250a/14250A_ch9.pdf, dostupno 18.8.2020.

[49] http://www.netwelding.com/History_TIG_Welding.htm, dostupno 20.8.2020.

[50] https://stainless-wire.co.uk/product/stainless-steel-mig-wire-11851.html, dostupno 20.8.2020.

[51] D. Pongrac: UTJECAJ AKTIVACIJSKOG PREMAZA NA MEHANIČKA I KOROZIJSKA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.

[52] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/investigation-of-the-a-tig-mechanism-and-the-productivity-benefits-in-tig-welding-may-2009, dostupno 24.8.2020.

[53] https://ijetae.com/files/Volume4Issue8/IJETAE_0814_25.pdf, dostupno 24.8.2020.

[54] https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00941234/document, dostupno 24.8.2020.

[55] https://patentimages.storage.googleapis.com/b2/2f/df/9bccdc0298f88a/US2956901.pdf, dostupno 24.8.2020.

[56] Huang, H. Y.; Shyu, S. W.; K. H. Tseng, K. H.; Chou, C. P.: Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, No. 5, 2005.

[57] Muthukumaran V.; Nadu T.; Bhaduri A. K.: Penetration enhancing Flux formulation for Tungsten Inert Gas (Tig) Welding of Austenitic Stainless Steel and its Application, United States Patent, Patent No.: US 8,097,826 B2, Jan. 17, 2012.

[58] http://www.att.bme.hu/~femtech/letoltes/duplex-Dobranszky-2007.pdf, dostupno 25.8.2020.

[59] Tseng, Kuang-Hung; Hsu, Chih-Yu: Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, Journal of Materials Processing Technology, 211 (2011), 503–512, 2011.

[60] Berthier, A.; Paillard, P.;Carin, M.; F. Valensi, F.; Pellerin S.: TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 2: arc constriction and arc temperature; Science nad Technology of Welding and joining, Vol. 17, No. 8, 2012.

[61] https://pdfslide.tips/documents/atig-zavarivanje-55a758ab23a2e.html, dostupno 26.8.2020.

Popis slika

Slika 1. Elementarni bakar [5]....3
Slika 2. Ovisnot električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [2]....4
Slika 3. Dijagram stanja bakra i cinka i ovisnost mehaničkih svojstava o udjelu cinka [1, 7, 8]...8
Slika 4. Mikrostruktura hladno gnječene mjedi CuZn30 (a) i lijevano i žareno stanje CuZn20Pb (b) [2]....9
Slika 5. Mikrostruktura (α+β)-mjedu (K.CuZn40Pb) u lijevanom stanju [2]....13
Slika 6. Dijagram stanja Cu-Sn: a) ravnotežno stanje, b) žareno stanje, c) lijevano stanje [1, 2] 15
Slika 7. Dijagram mehaničkih i fizikalnih svojstva gnječenih bronci [2]....16
Slika 8. Mikrostruktura kositrene bronce P.CuSn14 [1, 2, 14]....17
Slika 9. Dijagram stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10 %Al [1, 2]..19
Slika 10. Primjer mikrostrukture gnječene aluminijeve bronce [18]....20
Slika 11. Mikrostruktura lijevane aluminijske bronce koja je gašena s temperature od 857 °C [18]....21
Slika 12. Primjer mikrostrukture lijevane kositrene bronce [20]....23
Slika 13. Primjer lijevane mikrostrukture manganove bronce: a) 100:1, b) 500:1 [21]....24
Slika 14. Primjer lijevane mikrostrukture silicijeve bronce: a) 50:1, b) 500:1 [22]....24
Slika 15. Primjer mikrostrukture berilijeve bronce, 200:1 [23]....25
Slika 16. Dijagram utjecaja udjela nikla na temperaturu taljenja i na temperature promjene svojstva magnetičnosti [2]....25
Slika 17. Dijagram ispitivanja legura na vlačnu čvrstoću pri 300 °C ovisno o udjelu nikla [2]...26
Slika 18. Promjena električnog otpora Cu-Ni legura pri 0 °C (a) i termonapon Cu-Ni legura b) ovisno o udjelu Ni [1, 2]....27
Slika 19. Prikaz mikrostrukture bakra s udjelom kisika u osnovnom materijalu i na liniji staljivanja zavarenog spoja i osnovnog materijala [6]....28
Slika 20. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Al i Cu [6]....30
Slika 21. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Cu i Sn [6]....31
Slika 22. Dijagram ovisnosti temperature i udjela Cu i Zn [6]....32
Slika 23. Presjek i elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [26]....34
Slika 24. Položaj i oznake zavarivanja cijevi [26]....38
Slika 25. Položaj i oznake zavarivanja cijevi [26]....38
Slika 26. Dijagram podjele postupaka zavarivanja taljenjem [29]....39
Slika 27. Primjer ručnog TIG zavarivanja [36]....40
Slika 28. Shematski prikaz TIG zavarivanja [35]....42

Slika 29. Položaj pištolja i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [26, 31] 43
Slika 30. Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [43] 45
Slika 31. a) Uspostava el. luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk [32] 46
Slika 32. Osnovne karakteristike pravokutnih impulsnih oblika [31, 35] 46
Slika 33. Pištolj za ručno TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem s numeriranim dijelovima [35, 45] 48
Slika 34. Utjecaj oblika sapnice na protok zaštitnog plina [35, 47] 48
Slika 35. Dimenzije vrha elektroda za pojedine vrste TIG zavarivanja [32, 35] 50
Slika 36. Prikaz smjera gibanja nosilaca naboja i intenzitet zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu el. struje [32] 51
Slika 37. Posljedica ekstrema različitih parametara na geometrijske karakteristike zavara [32, 48] 53
Slika 38. Učinak i oblik el. luka kod He i Ar [49] 53
Slika 39. Ovisnost duljine el. luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja [31, 32] 54
Slika 40. Primjer šipki od nehrđajućeg čelika za TIG zavarivanje [50] 55
Slika 41. Usporedba luka kod TIG i A-TIG postupka zavarivanja [52] 57
Slika 42. Usporedba protaljivanja kod TIG i A-TIG postupka zavarivanja [51, 53] 58
Slika 43. Shematski prikaz priprave aktivacijskog talila, miješanja te nanošenje premaza na komad koji se zavaruje [51, 56] 59
Slika 44. Shema A-TIG i FBTIG postupka zavarivanja [51, 58] 60
Slika 45. Shematski prikaz Marangonijevog efekta strujanja fluida u zavaru kod a) TIG postupka i b) A-TIG postupka [31, 59] 61
Slika 46. Shematski prikaz mehanizma kontrakcije električnog luka [51, 60] 62
Slika 47. Certifikat (atest) za materijal Cu-EPT 64
Slika 48. Oprema i radno mjesto u labaratoriju za zvarivanje 65
Slika 49. Boca zaštitnog plina Aluline He50 Messer 66
Slika 50. Upravljačka ploča sa digitalnim prikazom jakosti struje 67
Slika 51. Kontrolna ploča uređaja za automatsko zavarivanje 68
Slika 52. RAIL BULL uređaj za automatizacijsko zavarivanje 68
Slika 53. Pištolj za zavarivanje 69
Slika 54. Wla15 gold Wolframove elektrode 69
Slika 55. Praškasti uzorci aktivacijskih komponenti korištenih u ovom radu 70
Slika 56. Prikaz nanesenog aktivacijskog premaza prije zavarivanja i izgled zavara nakon zavarivanja 74

Slika 57. Prikaz nanešenih aktivacijskih premaza prije zavarivanja 75
Slika 58. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 01 77
Slika 59. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 03 78
Slika 60. Poprečni presjek zavarenog spoja uzorka 05 78

Popis tablica

Tablica 1. Karakteristična svojstva bakra [1, 3] 3
Tablica 2. Električna i toplinska vodljivost bakra prema DIN HRN 1708 [2] 5
Tablica 3. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih legura bakra s cinkom (mjed i posebna mjed) [2, 9] 12
Tablica 4. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s cinkom i olovom i višekomponentnih legura bakra s cinkom [2, 10] 13
Tablica 5. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu ... 14
Tablica 6. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernica za primjenu gnječenih Cu-Sn legura [2, 13] 17
Tablica 7. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih legura bakra s kositrom i bakra s kositrom i cinkom [2, 15] 18
Tablica 8. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava (šipke) i smjernice za primjenu gnječenih 21
Tablica 9. Kemijski sastav, mehanička svojstva i smjernice za primjenu lijevanih Cu-Al legura [2, 17] 22
Tablica 10. Kemijski sastav, mehanička svojstva, i smjernice primjene lijevanih olovno-kositrenih bronca [2. 12] 23
Tablica 11. Primjeri kemijskog sastava, mehaničkih svojstava i smjernice za primjenu gnječenih Cu-Ni legura [2, 24] 27
Tablica 12. Temperaturno područje taljenja i toplinska provodljivost nekih bakrenih legura [26] 29
Tablica 13. Temperaturno područje homogenizacijskog žarenja bakrenih legura [26] 33
Tablica 14. Podjela elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom prema HRN EN ISO 4063 [27, 28] 34
Tablica 15. Označavanje i primjena zavarenih spojeva [26] 36
Tablica 16. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [40] 44
Tablica 17. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [32, 45] 47
Tablica 18. Označavanje volframovih elektroda [31, 32] 49
Tablica 19. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [31, 32] 55
Tablica 20. Vrste grešaka kod TIG zavarivanja [35] 56
Tablica 21. Karakteristike Cu-ETP bakra 64
Tablica 22. Karakteristike VARTIG 2005 AC/DC uređaja 67

Tablica 23. Prikaz parametara za određeni uzorak....72
Tablica 24. Prikaz zavara s prednje i stražnje strane uzorka 01 i 02....73
Tablica 25. Prikaz zavara s prednje i stražnje strane uzorka 03, 04 i 05....74
Tablica 26. Prikaz neočišćenih i očišćenih zavara s prednjes strane....76