

# Analiza sastava, mikrostrukture i svojstava navara od aluminijske bronce

---

**Karačić, Frano**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:358634>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Frano Karačić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Frano Karačić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći i vremenu koje mi je posvetila prilikom izrade ovog rada.

Posebno se želim zahvaliti svojim roditeljima, obitelji, djevojci i prijateljima koji su vjerovali u mene i bili mi podrška tokom studija.

Frano Karačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FRANO KARAČIĆ** Mat. br.: 0035209768

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza sastava, mikrostrukture i svojstava navara od aluminijske bronce**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the composition, microstructure, and properties of the aluminum bronze overlay**

Opis zadatka:

Osnovna svojstva bakra i bakrovih legura jesu izvrsna električna i toplinska vodljivost, izvrsna duktilnost u žarenom stanju te dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskome okruženju. U nedostatke se može ubrojiti visoka cijena, visoko talište i otežano zavarivanje zbog visoke toplinske vodljivosti. Kod nekih bakrovih legura pri zavarivanju postoji opasnost od pojave „vodikove bolesti“ koja može dovesti do velikog pada čvrstoće i žilavosti.

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati podjelu bakrovih legura te detaljno opisati bronce i njihovu primjenu. Obraditi recentna istraživanja vezana uz primjenu aluminijskih bronci, osobito u svrhu nanošenja različitih prevlaka.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju navara od aluminijske bronce CuAl8Ni2Fe2 na osnovnom materijalu od legure CuNiAl. Analizirati kemijski sastav i mikrostrukturu osnovnog materijala i metala navara te izmjeriti tvrdoću i savojnu čvrstoću. Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti navarenog spoja.

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao: *Rede*  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
*Biserka Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
POPIS KRATICA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. Uvod.....	1
2. Bakar i bakrove legure.....	2
2.1 Mjedi.....	6
2.1.1 Hladno gnječene mjedi.....	7
2.1.2 Toplo gnječene mjedi.....	8
2.1.3 Posebne mjedi.....	9
2.1.4 Lijevane mjedi.....	10
2.2 Bronce.....	12
2.2.1 Kositrene bronce.....	12
2.2.2 Lijevane kositrene bronce.....	13
2.2.3 Olovna i olovnokositrena bronca.....	14
2.2.4 Berilijska bronca.....	16
2.2.5 Silicijska i manganska bronca.....	17
3. Aluminijske bronce.....	18
3.1 Mikrostruktura aluminijske bronce.....	18
3.1.1 Mikrostrukturne promjene.....	19
3.1.2 Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturne promjene.....	20
3.2 Kemijski sastav aluminijskih bronci.....	25
3.3 Primjena aluminijskih bronci.....	25
3.3.1 Primjena aluminijskih bronci prilikom popravka kapula za lijevanje.....	28

---

3.4 Mehanička svojstva aluminijskih bronci.....	33
3.5 Korozijska postojanost.....	33
3.6 Otpornost na trošenje .....	34
4. Eksperimentalni dio .....	35
4.1 Cilj rada i provođenje istraživanja.....	35
4.2 Materijal za ispitivanje.....	35
4.3 Priprema uzoraka za ispitivanje.....	36
4.4 Analiza kemijskog sastava .....	41
4.5 Mikrostruktura uzorka.....	42
4.6 Savijanje uzorka .....	48
4.6.1 Provođenje savojnog ispitivanja .....	50
4.7 Ispitivanje tvrdoće.....	53
4.7.1 Ispitivanje tvrdoće na osnovnom materijalu i navaru .....	54
5. Zaključak .....	58

## POPIS SLIKA

Slika 1	Navarivanje u svrhu poboljšavanja svojstva [2] .....	1
Slika 2	Elementarni bakar [3].....	3
Slika 3	Kristalna struktura bakra [3] .....	3
Slika 4	Neo-sumeranski kip nastao između 2094 i 2047 godine pr. Kr [5] .....	4
Slika 5	Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu legiranih elemenata [7].....	4
Slika 6	Utjecaj udjela cinka na svojstva mjedi [4].....	7
Slika 7	Mikrostruktura CuZn30 (hladno gnječeno stanje) (a) i CuZn20Pb (lijevano i žareno stanje) (b) [4] .....	8
Slika 8	Mikrostruktura ( $\alpha+\beta$ )-mjedi (K. CuZn40Pb) u lijevanom stanju [4].....	10
Slika 9	Ravnotežno stanje Cu-Sn [4] .....	12
Slika 10	Dijagram stanja Cu-Sn: žareno stanje (lijevo) i lijevano stanje (desno) [4].....	13
Slika 11	Ležaj [8].....	14
Slika 12	Dijagram stanja Cu-AL s prikazom mikrostrukturne promjena [4].....	19
Slika 13	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u vodi [9] .....	21
Slika 14	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 850 °C i hlađenog u vodi [9] .....	21
Slika 15	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u ulju [9].....	22
Slika 16	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog na zraku [9].....	23
Slika 17	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u peći [9].....	24
Slika 18	Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 850 °C i hlađenog u peći [9].....	24
Slika 19	Uzorci spremni za lemljenje [13].....	29
Slika 20	Prikaz prednje strane lemljenog spoja [13] .....	29
Slika 21	Uzorci za statičko vlačno ispitivanje [13] .....	30
Slika 22	Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokacija A za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal bio CuSi3Mn1 (desno) [13].....	31
Slika 23	Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokacija B1 za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal bio CuAl10Fe (desno) [13].....	32
Slika 24	Mikrostruktura od lokacije B2 (lijevo) i B3 (desno) za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal CuAl10Fe [13] .....	32
Slika 25	Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokaciji C za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal CuZn40SnSi (desno) [13].....	32



Slika 26	Uzorak osnovnog materijala s navarom .....	35
Slika 27	Rezanje uzorka pilom.....	36
Slika 28	Uzorci za ispitivanja.....	37
Slika 29	Brušenje uzorka.....	38
Slika 30	Uzorak nakon brušenja.....	38
Slika 31	Stavljanje dijamantne paste na tkaninu za poliranje .....	39
Slika 32	Poliranje uzorka .....	39
Slika 33	Poliran uzorak .....	40
Slika 34	Nagriženi uzorak .....	40
Slika 35	Optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO [16].....	41
Slika 36	Osnovni materijal, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 200×).....	43
Slika 37	Osnovni materijal, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 500×).....	43
Slika 38	Zona utjecaja topline, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 50×).....	44
Slika 39	Navar, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 50×).....	44
Slika 40	Osnovni materijal, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×) .....	45
Slika 41	Osnovni materijal, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 500×) .....	45
Slika 42	Zona utjecaja topline, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×).....	46
Slika 43	Prvi sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×).....	46
Slika 44	Drugi sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×) .....	47
Slika 45	Treći sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×) .....	47
Slika 46	Transverzalni test savijanja u vrhu ili korijenu [19] .....	48
Slika 47	Transverzalni test savijanja po površini zavara [19].....	49
Slika 48	Longitudinalni test savijanja u korijenu zavara [19].....	49
Slika 49	Ispitivanje savijanja.....	50
Slika 50	Pojava pukotine tijekom savijanja .....	51
Slika 51	Uzorak nakon završetka ispitivanja.....	51
Slika 52	Pukotina na površini uzorka za savijanje .....	52
Slika 53	Osnovni princip Vickers metode [20] .....	53
Slika 54	Uređaj za ispitivanje tvrdoće HV10 .....	54
Slika 55	Raspored mjerenja tvrdoće HV10 na uzorku.....	55
Slika 56	Uređaj za ispitivanje tvrdoće HV0,2 .....	56
Slika 57	Mjesta ispitivanja tvrdoće na uzorku.....	56

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Mehanička i fizikalna svojstva bakra [4].....	5
Tablica 2	Kemijski sastav i mehanička svojstva lijevanih mjedi [4] .....	11
Tablica 3	Kemijski sastav, mehanička svojstva lijevanih legura bakra s olovom i kositrom [4].....	15
Tablica 4	Kemijski sastav i mehanička svojstva berilijskih bronci [4] .....	17
Tablica 5	Kemijski sastav CuAl10Fe3Mn1,5 [9].....	20
Tablica 6	Proizvodi od aluminijske bronce [12] .....	27
Tablica 7	Rezultati vlačnog ispitivanja [13] .....	30
Tablica 8	Mehanička svojstva aluminijskih bronci [12, 14].....	33
Tablica 9	Parametri navarivanja.....	36
Tablica 10	Kemijska analiza osnovnog materijala i zavara.....	41
Tablica 11	Propisani kemijski sastav legure CuAl10Fe5Ni5 [17] .....	42
Tablica 12	Propisani kemijski sastav CuAl8Ni2Fe2Mn2 [18] .....	42
Tablica 13	Raspon testne sile [20].....	53
Tablica 14	Rezultati ispitivanja HV10 .....	55
Tablica 15	Rezultati ispitivanja HV0,2.....	57

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
$R_{p02}$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
$A_5$	%	Istezljivost
$HV$	-	Tvrdoća po Vickersu
$HB$	-	Tvrdoća po Brinellu
$F_m$	N	Vlačna sila
$\lambda$	W/mK	Toplinska vodljivost

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
FCC	<i>Face centered cube</i> – površinski centrirana kristalna rešetka
BCC	<i>Body centered cube</i> – unutarnje centrirana kristalna rešetka
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – zavarivanjem netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina

## SAŽETAK

U radu je provedena analiza kemijskog sastava i mikrostrukture te ispitivanje mehaničkih svojstava navara od aluminijske bronce oznake CuAl<sub>18</sub>Ni<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub> na osnovnom materijalu oznake CuAl<sub>10</sub>FeNi<sub>5</sub>.

U teorijskom dijelu rada opisan je bakar te njegove legure, a posebna pozornost je posvećena broncam i njihovoj primjeni.

U eksperimentalnom djelu rada utvrđen je kemijski sastav osnovnog materijala i metala navara koji odgovara propisanim kemijskim sastavima.

U mikrostrukтури osnovnog materijala vidljiva je  $\alpha$ -faza i eutektoid te precipitati  $\kappa$ -faze. Linija staljivanja je jasno izražena, dok je područje utjecaja topline relativno usko bez nepravilnosti. Metal navara ima tipičnu ljevačku dendritnu usmjerenu mikrostrukturu bez uočenih nepravilnosti.

Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u zoni utjecaja topline, 216 HV<sub>0,2</sub> i 220 HV<sub>10</sub>. Tvrdoća osnovnog materijala iznosila je 196 HV<sub>0,2</sub> i 191 HV<sub>10</sub>, a slična vrijednost je izmjerena i u prvom navarenom sloju, dok se tvrdoća u drugom i trećem navarenom sloju postupno smanjuje.

Također je utvrđeno da osnovni materijal i metal navara nemaju veliku sposobnost savijanja zbog pojave puknuća pri malom kutu savijanja.

Nakon provedene analize rezultata utvrđena je zadovoljavajuća kvaliteta navara pod uvjetom da područje navara tijekom eksploatacije ne bude savojno opterećeno.

Ključne riječi: aluminijska bronca, navar, mikrostruktura, tvrdoća, savijanje

## SUMMARY

In this thesis, an analysis of the chemical composition and microstructure was carried out, in addition, the mechanical properties of the overlay of aluminum bronze mark CuAl18Ni2Fe2Mn2 on the base material CuAl10FeNi5 were tested.

In the theoretical part of the thesis, copper and its alloys are described, and special attention is paid to bronzes and their applications.

In the experimental part of the thesis, the chemical composition of the base material and overlay metal was examined and proved to match the prescribed chemical compositions.

In the microstructure of the base material  $\alpha$ -phase, eutectoid and  $\kappa$ -phase precipitates are visible. The melting line is clearly defined, while the heat-affected zone is relatively narrow without irregularities. Overlay metal has a typical foundry dendritic-oriented microstructure without observed irregularities.

The highest hardness values were measured in the heat-affected zone, 216 HV0.2 and 220 HV10. The hardness of the base material was 196 HV0.2 and 191 HV10, and a similar value was measured in the first overlay layer, while the hardness in the second and third overlay layers gradually decreases.

It was also determined that the base material and overlay metal do not have great bending properties due to the appearance of cracks at small bending angle.

After the analysis of the results, the satisfactory quality of the overlay was determined, provided that the area of the overlay is not subjected to bending stress during exploitation.

Key words: aluminium bronze, overlay, microstructure, hardness, bend strenght

## 1. Uvod

Aluminijska bronca je jedna od najkorištenijih bakrovih legura zbog svoje čvrstoće, otpornosti na trošenje, otpornosti na atmosferske uvjete i otpornost na koroziju. Zbog dobrih mehaničkih i fizikalnih svojstava aluminijska bronca je materijal koji se koristi kod zahtjevnih primjena. Aluminijska bronca, kao i sve bakrove legure, je skup materijal stoga se dijelovi od aluminijske bronce kod oštećenja najčešće ne zamjenjuje nego repariraju. Jedan od najčešćih oblika reparacije je navarivanje novih slojeva. Navarivanje se koristi kada je potrebno na osnovni materijal nanijeti nekoliko slojeva dodatnog materijala kako bi se produžio vijek trajanja. Na taj način mogu se popraviti pukotine i oštećenja nastala tijekom eksploatacije. Osim za reparaciju, navarivanje se može koristiti kako bi se poboljšala površinska svojstva nekog alata ili strojnog dijela, kao što je prikazano na slici 1. U svrhu poboljšavanja korozijske postojanosti i otpornosti na trošenje često se koristi nikal aluminijska bronca. U odnosu na druge vrste bronce ova bronca tijekom skrućivanja ima manje izražene mikrostrukturne segregacije. Zbog toga ima homogeniju mikrostrukturu i bolja mehanička svojstva [1].



Slika 1 Navarivanje u svrhu poboljšavanja svojstva [2]

## 2. Bakar i bakrove legure

Bakar i njegove legure čovjek koristi već tisućama godina. Najbolji pokazatelj važnosti bakra kroz povijest čovječanstva je taj što se dva povijesna razdoblja nazivaju po ovom metalu – bakreno i brončano doba. Elementarni bakar je metal svjetlo crvene boje, prikazan na slici 2, koji ima kubično plošnu centriranu kristalnu rešetku (FCC), koja je prikazana na slici 3. U čistom stanju je relativno mekan i lako je obradiv stoga se u početku primjene bakar koristio za izradu alata, umjetnina i nakita, a jedan od primjera umjetnina nalazi se na slici 4. Iako se u početku koristio u svakodnevnoj upotrebi, danas se najviše koristi u uvjetima gdje do izražaja dolazi njegova visoka toplinska i električna vodljivost. Čisti bakar ima vrlo visoku električnu vodljivost na koju jako utječe stupanj legiranost i udio nečistoća. Na slici 5 prikazana je ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu legiranih elemenata. Zbog odlične otpornosti na koroziju i trošenje bakrene legure su najviše zastupljene u strojogradnji i brodogradnji. Dobra fizikalna i mehanička svojstva bakra koja treba posebno istaknuti jesu:

- toplinska i električna vodljivosti
- čvrstoća, otpornost na puzanje, otpornost na umor
- izvrsna duktilnost u žarenom stanju zbog čega su posebno pogodne za proizvodnju cijevi, duboko vučenje, kovanje i oblikovanje u toplom stanju
- dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskoj sredini stvaranjem „patine“ [4].

Važnija mehanička i fizikalna svojstva bakra prikazana su u tablici 1.

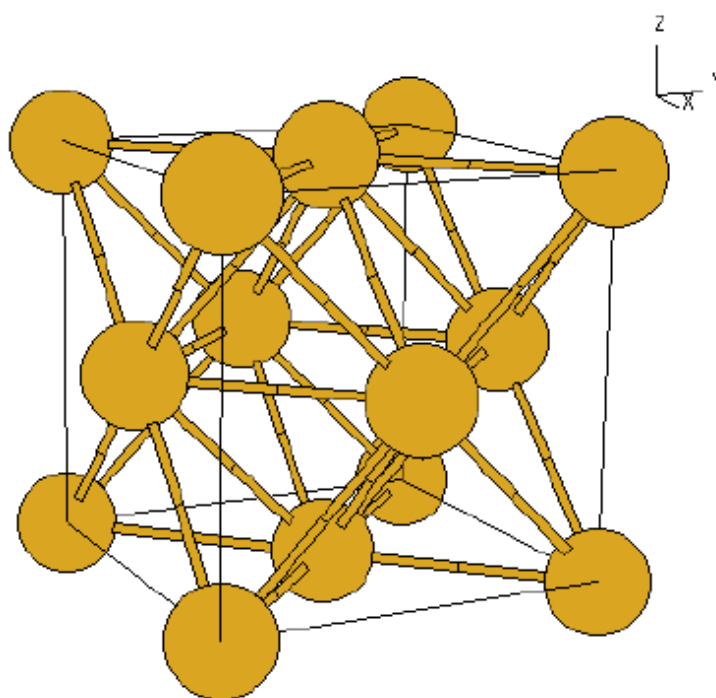
Bakar i njegove legure imaju i neke nedostatke poput:

- visoka cijena
- visoko talište
- otežano zavarivanje zbog visoke toplinske vodljivosti
- kod nekih legura pri zavarivanju postoji opasnost od pojave „vodikove bolesti“ koja može dovesti do velikog pada čvrstoće i žilavosti
- ne smije se koristiti u dodiru s hranom jer se prekrije otrovnom zelenom prevlakom (bakreni acetat) [4].





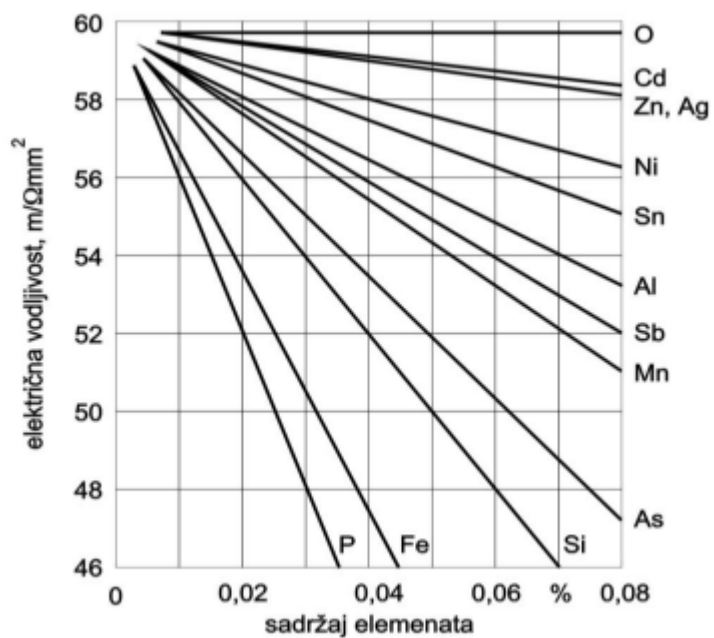
Slika 2 Elementarni bakar [3]



Slika 3 Kristalna struktura bakra [3]



Slika 4 Neo-sumeranski kip nastao između 2094 i 2047 godine pr. Kr [5]



Slika 5 Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu legirnih elemenata [7]

**Tablica 1 Mehanička i fizikalna svojstva bakra [4]**

Svojstvo	Mjerna jedinica	Vrijednost
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	8930
Talište	°C	1083
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	2125000
Toplinska rastezljivost	10 <sup>-6</sup> K	17
Električna vodljivost	m/Ωmm <sup>2</sup>	35 - 58
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	200 - 360
Toplinska vodljivost	W/mK	240 - 386

Bakar je u prirodi čest metal te se najčešće dobiva iskopavanjem ili razbijanjem sulfidnih i oksidnih ruda. Halkopirit je sulfidna ruda (CuFeS<sub>2</sub>) koja sadrži najveći udio braka i to oko 34,5 %. Osim u halkopiritu bakar se nalazi u oksidnim rudama kuprid (Cu<sub>2</sub>O) i karbonatnim rudama azurit (Cu<sub>3</sub>[OH-CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub>) i malahit (Cu<sub>2</sub>[OH-CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub>) [4].

Bakrove legure klasificiramo pomoću njihovih glavnih legiranih elemenata. Dvije glavne vrste su:

- legure bakra s cinkom
  - legure bakra s cinkom (> 50 %Cu i < 44 %Zn) – mjedi
  - legure bakra s niklom i cinkom (10 – 30 %) – novo srebro
- legure bakra bez cinka
  - legure bakra s kositrom (< 15 %Sn) – kositrene bronce
  - legure bakra s aluminijem (< 14 %Al) – aluminijske bronce
  - legure bakra s kositrom i/ili olovom (< 10 %Sn i/ili 25 %Pb) – olovno kositrene i olovne bronce
  - legure bakra s berilijem (< 2 %Be) – berilijske bronce
  - legure bakra s manganom te silicijem i manganom – manganske i silicijske bronce
  - legure bakra s niklom (< 45 %Ni) [4].

Najrasprostranjenije bakrove legure su mjedi i bronce. Mjedi su legure bakra gdje je glavni legirni element cink (Zn) te sadrži mali udio drugih legirnih elemenata poput željeza (Fe), nikla (Ni), olova (Pb), kositra (Sn), aluminijska (Al) i antimona (Sb).

Postoje dvije vrste mjedi:

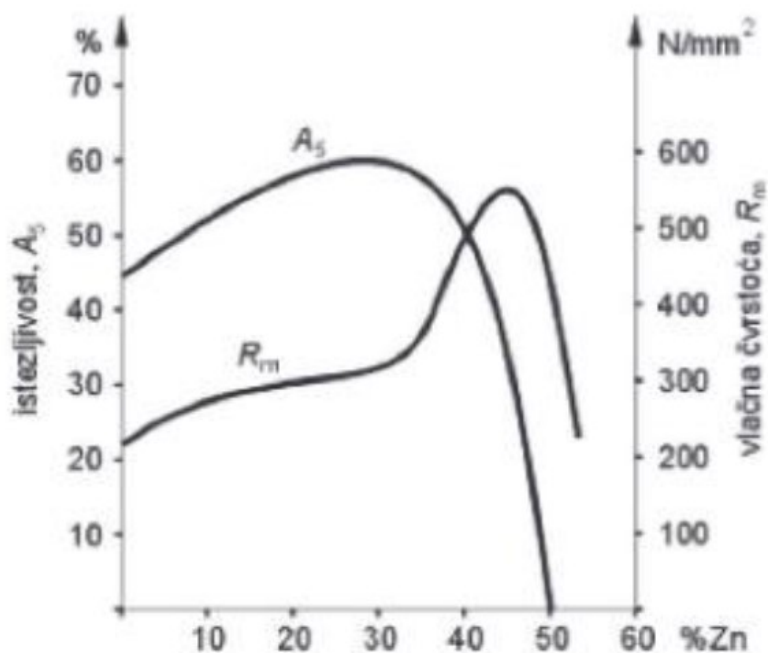
- $\alpha$ -mjedi koje su oblikovljive u hladnom stanju
- $(\alpha+\beta)$ -mjedi koje su oblikovljive u toplom stanju [4].

Broncom općenito nazivamo sve bakarne legure koje sadrže više od 60 % bakra uz dodatak jednog ili više legiranih elemenata. Najčešće bronce koje se koriste su legure bakra s kositrom, dok ostale vrste mogu sadržavati još cink, olovo, aluminij, željezo, berilij, silicij, mangan. Naziv dobivaju po elementu koji je uz bakar najviše prisutan. Stoga postoje aluminijska bronca, olovna bronca, kositrena bronca, berilijska bronca i legure [4].

## 2.1 Mjedi

Mjed je legura izrađena od bakra i cinka, a uključuje i mali udio drugih metala poput željeza, nikla, olova, kositra, aluminijska i antimona. Sastav čiste mjedi je 85 % bakra i 15 % cinka, pri čemu visok postotak bakra daje leguri duktilnost dok udio cinka povećava čvrstoću. U praksi udio cinka u leguri je u rasponu od 30 % do 42 % zbog zadovoljavajuće čvrstoće i duktilnosti. Ako je udio cinka veći od 42 % povećava se krhkost legure. Na slici 6 prikazano je kako se mijenjaju istežljivost i vlačna čvrstoća s povećanjem udjela cinka.

U usporedbi s bakrom, mjed ima nižu električnu vodljivost, ali veću čvrstoću. Čvrstoća mjedi može se povećati legiranjem s malim količinama mangana, cinka, aluminijska, željeza i nikla u cilju proizvodnje spojnice visoke čvrstoće, opruga, osovina pumpi itd. Dodavanjem legirnih elemenata poput nikla, željeza, kroma, niobija i/ili mangana može se povećati korozijska otpornost mjedi u svrhu proizvodnje npr. cijevi za brodske kondenzatore, ali i za druge razne primjene u morskom okolišu [6].

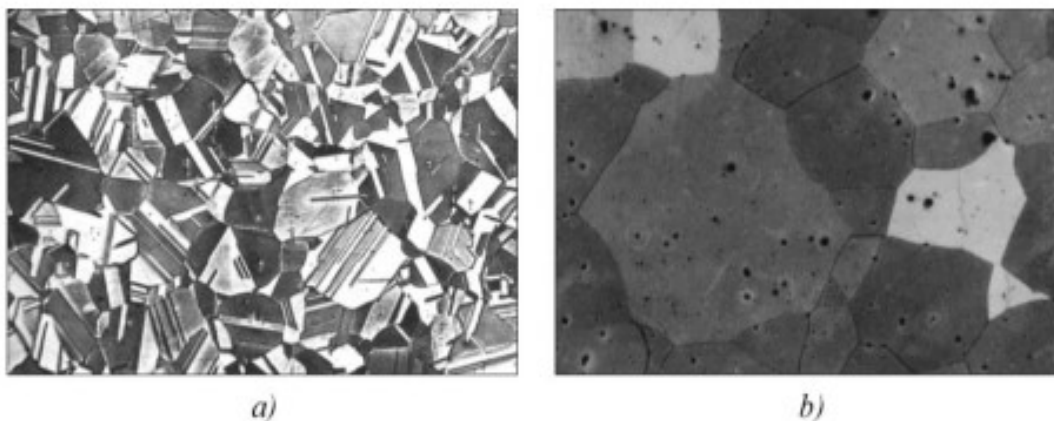


Slika 6 Utjecaj udjela cinka na svojstva mjedi [4]

### 2.1.1 Hladno gnječene mjedi

Hladno gnječene  $\alpha$ -mjedi su jednofazne homogene legure koje se primjenjuju zbog svoje dobre duktilnosti koja se ostvaruje ako je udio cinka u leguri do 30 %. Kako bi se postigla vrlo dobra duktilnost važno je da legura ima visoku čistoću. Ukoliko se u leguri nalaze uključci u vrlo maloj količini to će znatno utjecati na smanjenje duktilnosti. Zbog zahtjeva visoke čistoće,  $\alpha$ -mjedi su vrlo skupe.  $\alpha$ -mjedi su vrlo osjetljive na povišene temperature zbog mogućnosti naglog porasta zrna pa pri žarenju treba pažljivo kontrolirati temperaturu. Optimalna temperatura žarenja je do 600 °C, a ako se legura pregrije, porast zrna je izrazito brz te će se već prilikom sljedećeg postupka prešanja na površini pojaviti efekt zvan „narančina kora“. Veličina zrna može se tako povećati da se zrna mogu vidjeti golim okom. Osim na temperaturu žarenja,  $\alpha$ -mjedi su iznimno osjetljive i na napetosnu koroziju. Tijekom postupka hladnog oblikovanja na granicama zrna se skupljaju dislokacije te ta mjesta poprimaju stanje sa višom energijom. Korozija koja se javlja uz prisutnost vodljivog agresivnog medija prodire interkristalno zbog toga što se područja uz granicu zrna ponašaju kao „anodna“. Korozija uzrokuje slabljenje veze na granicama zrna i zbog zaostalih naprezanja pojavljuju se napukline. Ovaj problem može se ukloniti žarenjem za uklanjanje napetosti, na oko 250 °C, nakon prerade.

Na slici 7 prikazana je mikrostruktura  $\alpha$ -mjedi CuZn30 u hladno gnječenom stanju (slika a) te  $\alpha$ -mjedi CuZn20Pb u lijevanom i žarenom stanju (slika b) [4].



**Slika 7 Mikrostruktura CuZn30 (hladno gnječeno stanje) (a) i CuZn20Pb (lijevano i žareno stanje) (b) [4]**

### **2.1.2 Toplo gnječene mjedi**

Toplo gnječene ( $\alpha+\beta$ )-mjedi su legure koje sadrže više od 37 % cinka i 60 % bakra i oblikovljive su samo u toplom stanju, dok se  $\alpha$ -mjedi toplo obliku samo u početnoj fazi oblikovanja. Optimalno temperaturno područje za toplu preradu nalazi se između 650 °C i 750 °C. Mjed se nalazi u  $\beta$ -mikrostrukturnom području, a  $\alpha$ -faza je potpuno apsorbirana u  $\beta$ -fazi. Tijekom hlađenja dolazi do precipitacijske  $\alpha$ -faze u obliku sitnih čestica, na što jako utječe mehanička prerada. Na taj način se sprječava obnavljanje grubozrnate usmjerene Widmannstattenove mikrostrukture koja uzrokuje snižavanje mehaničkih svojstava. Smanjena žilavost i heterogenost povoljne jer poboljšavaju obradljivost ovih legura postupcima odvajanja čestica (tokarenje, bušenje, glodanje i blanjanje). Za dodatno poboljšavanje obradljivosti odvajanjem čestica leguri se dodaje olovo u udjelu od 1 % do 3 %. Kod ove vrste mjedi može se pojaviti specifična vrsta korozije koja se kolokvijalno naziva „korozija cinka“. Ona nastaje u vodenim otopinama uz prisustvo lokalne korozije. Korozija cinka nastaje zbog pomicanja elektrokemijskog potencijala na graničnoj površini između metala i otopine. U tim uvjetima plemenitiji bakar se krene taložiti, a  $\beta$ -faza nastavlja korodirati. Korozija se može spriječiti korištenjem posebnih mjedi [4].

### 2.1.3 Posebne mjedi

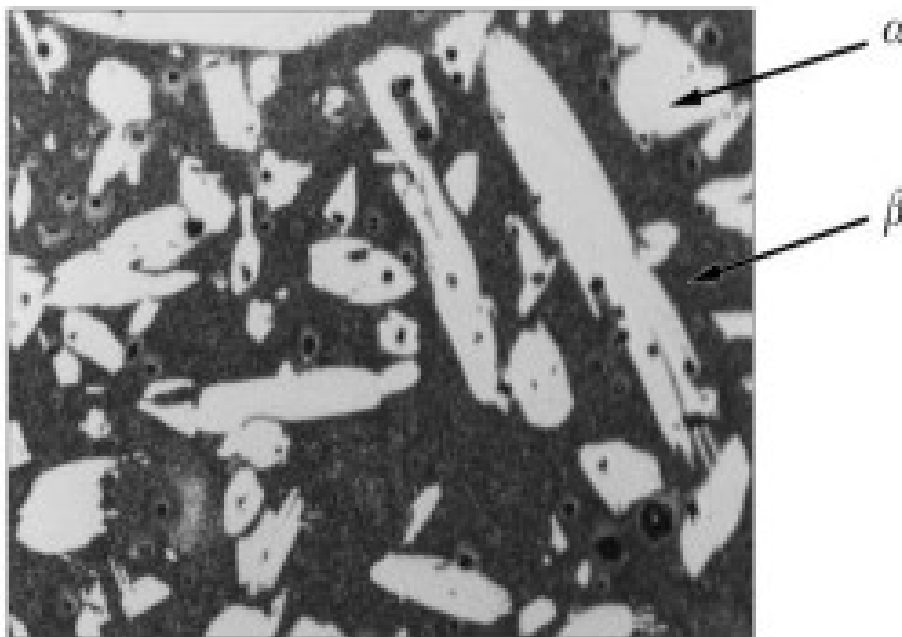
Posebne mjedi su legure koje sadrže od 54 % do 62 %Cu i do 7 % drugih elemenata, a ostatak legure čini cink. Legiranjem dodatnim elementima poboljšava se korozijska postojanost, ali i druga svojstva. Te legure su toplo oblikovljive, ali mogu se i lijevati. U lijevanom ili kovanom stanju, vlačna čvrstoća im se može povećati na više od 700 N/mm<sup>2</sup>.

Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na posebne mjedi je sljedeći:

- 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 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 [4].

### 2.1.4 Lijewane mjedi

Lijewane mjedi u pravilu sadrže od 36 % do 43 %Zn i od 1 % do 3 %Pb. a posebne lijevane mjedi mogu još i sadržavati udjele aluminija, željeza, kositra, nikla ili mangana Ova vrsta mjedi posjeduje uski interval skrućivanja i zbog toga ne dolazi do segregacija u zrnu. Zbog svoje heterogene ( $\alpha+\beta$ )-mikrostrukture nisu predviđene za hladno oblikovanje i stoga se primjenjuju u lijevanom stanju zbog povišene čvrstoće. Za specifične namijene mogu se lijevati i  $\alpha$ -mjedi. Na slici 8 prikazan je primjer mikrostrukture ( $\alpha+\beta$ )-mjedi. Neki primjeri lijevanih mjedi i posebno lijevanih mjedi s njihovim mehaničkim svojstvima i dodatnim podacima prikazani su u tablici 2 [4].



Slika 8 Mikrostruktura ( $\alpha+\beta$ )-mjedi (K. CuZn40Pb) u lijevanom stanju [4]



Tablica 2 Kemijski sastav i mehanička svojstva lijevanih mjedi [4]

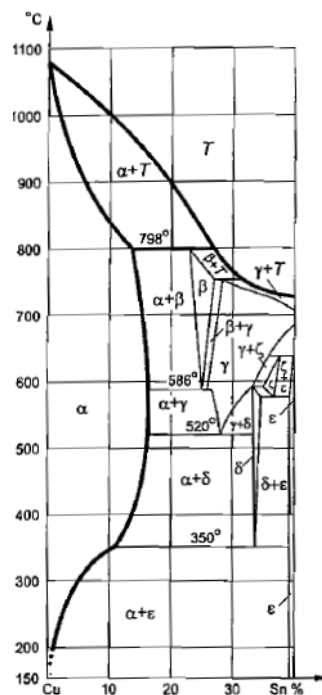
Oznaka legure	Kemijski sastav %	Mehanička svojstva (min. vrijednosti)			
		$R_{p02}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %	HV
CuZn15	Cu 84,0 - 86,0 Zn ostatak	220	310	22	95
CuZn30	Cu 69,0 - 71,0 Zn ostatak	230	350	30	110
CuZn37	Cu 62 - 64 Zn ostatak	250	370	27	110
CuZn40	Cu 59,5 - 61,5 Zn ostatak	250	410	20	120
CuZn36Pb3	Cu 60,0 - 62,5 Pb 2,5 - 3,5 Zn ostatak	250 - 352	400 - 460	18 - 12	115 - 140
CuZn39Pb3	Cu 57,0 - 59,5 Pb 2,5 - 3,5 Zn ostatak	250 - 390	430 - 500	15 - 11	125 - 145
CuZn40Pb2	Cu 57,0 - 59,5 Pb 1,5 - 2,5 Zn ostatak	250 - 390	430 - 500	15 - 11	125 - 145
CuZn31Si1	Cu 66,0 - 71,0 Si 0,7 - 1,3 Zn ostatak	200 - 290	440 - 490	22 - 15	120 - 150
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

## 2.2 Bronce

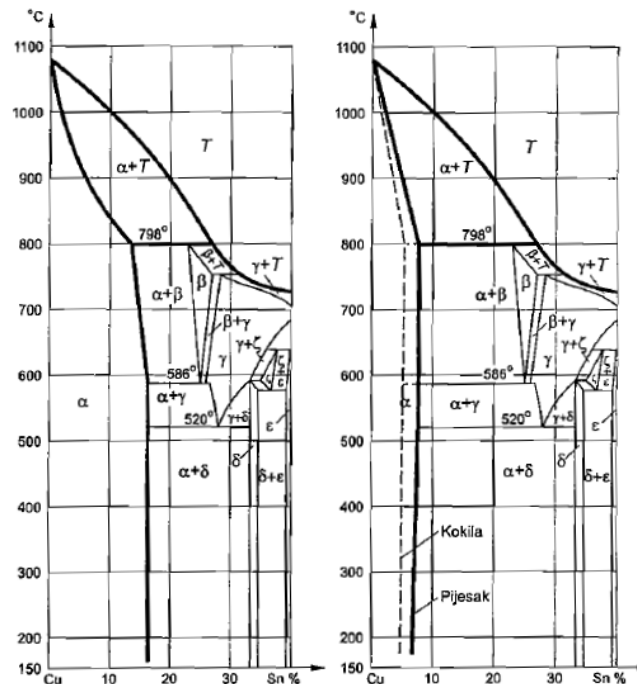
### 2.2.1 Kositrene bronce

Mikrostruktura kositrenih bronci direktno utječe na njihova svojstva. Taj utjecaj se može objasniti ravnotežnim dijagramom stanja koji je prikazan na slici 9. Velika udaljenost između likvidus i solidus linije uzrokuje veliku razliku u kemijskom sastavu taljevine i skrućenog dijela legure na bilo kojoj temperaturi. Brzina difuzije bakra i kositra mnogo je sporija od difuzije između bakra i cinka. Sve navedeno je razlog jake mikrosegregacija tijekom faze skrućivanja. Mikrostrukturne promjene ispod 400 °C protječu vrlo sporo i zbog toga za praktične svrhe možemo zanemariti dio dijagrama ispod 400 °C, odnosno mikrostruktura bronice nastala hlađenjem do 400 °C ostat će ista kao i na sobnoj temperaturi.

Na slici 10 prikazan je dijagram stanja kositrenih bronci u lijevanom i žarenom stanju.



Slika 9 Ravnotežno stanje Cu-Sn [4]



Slika 10 Dijagram stanja Cu-Sn: žareno stanje (lijevo) i lijevano stanje (desno) [4]

Kod kositrenih bronci  $\alpha$ -faza je čvrsta otopina, koja je duktilna i žilava. Zbog toga se bronca s  $\alpha$  mikrostrukturom može oblikovati hladnim deformiranjem. Ukoliko je udio kositra u legurama veći od 8 % u mikrostrukтури se javlja tvrda i krhka  $\delta$ -faza, intermetalni spoj sastava  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . Prisutnost  $\delta$ -faze čini  $(\alpha+\delta)$ -bronce krhkima. Ako je legura namijenjena za hladno oblikovanje,  $\delta$ -faza ne smije biti prisutna. Lijevane legure s udjelom kositra manjim od 6 % mogu sadržavati  $\delta$ -fazu po granicama  $\alpha$ -faze, a uzrok toga je jaka mikrosegregacija. Kako bi se ta legura mogla hladno deformirati potrebno je ukloniti  $\delta$ -fazu produljenim žarenjem na 700 °C. Žarenjem se ubrzava difuzija i preostaje jednolična  $\alpha$ -faza. Takva toplinska obrada omogućuje da se na taj način mogu hladno oblikovati bronce koje imaju do 14 %Sn. U industrijskoj praksi hladno se oblikuju samo legure koje imaju udio Sn do 7 %. Lijevati se mogu legure koje sadrže do 15 %Sn [4].

### 2.2.2 Lijevane kositrene bronce

Lijevane kositrene bronce imaju različite primjene, ovisno o udjelu kositra u metalu. Tako  $\text{CuSn1}$  ima dovoljnu električnu vodljivost te ima veliku primjenu u elektrotehnici. Bronce s visokom čvrstoćom poput legura  $\text{CuSn5}$  i  $\text{CuSn10}$  posjeduju dobru duktilnost i visoku korozijsku postojanost. Koriste se za izradu dijelova koji su izloženi velikom trošenju poput turbine, kompresora i za razna ojačanja. Bronca  $\text{CuSn12}$  koristi se za dijelove koji su podložni

velikim mehaničkim naprezanjima i trošenjima, poput zupčanika. Bronce CuSn10 i CuSn12 često se koriste i kao materijali za izradu ležajeva [6]. Na slici 11 može se vidjeti jedan primjer ležaja. Mikrostruktura lijevanih kositrenih bronci u potpunosti ispunjava uvjete za tu namjenu. Tvrde čestice  $\delta$ -faze, koje su otporne na trošenje, uložene su u matricu koju čini  $\alpha$ -faza koja je žilava i izrazito otporna na udarce [4].



Slika 11 Ležaj [8]

### 2.2.3 Olovna i olovnokositrena bronca

Olovne i olovnokositrene bronce su bakrove legure u kojima je kositar u potpunosti ili djelomično zamijenjen s olovom. Dodavanjem olova bakru poboljšavaju se klizna svojstva bez negativnog utjecaja na svojstvo toplinske vodljivosti [6]. Najčešće se broncima i mjedima dodaje do 3 %Pb kako bi se poboljšala rezljivost. Veće količine olova, do 25 %, dodaju se za specijalne namjene poput kliznih ležajeva. Takve bronce mogu podnijeti i do 20 % veća opterećenja nego „bijele kovine“ na bazi olova ili kositra. Mogu se primjenjivati i pri većim brzinama jer brzo odvede toplinu, zbog toga što im je toplinska vodljivost veća. Ukoliko se redovito podmazuju imaju izvanrednu otpornost na trošenje, ali i otpornost na zaribavanje im je velika budući da olovo djeluje kao privremeno sredstvo za podmazivanje, u slučaju da normalno podmazivanje izostane [4].

Za proizvodnju ležajeva koriste se dvije vrste bronce:

- bronce s niskim udjelom olova od 10 % do 20 % i udjelom kositra od 5 % do 10 %
- bronce bez kositra s visokim udjelom olova između 25 % i 30 %.

U prvoj vrsti olovo poboljšava klizna svojstva dok kositar poboljšava čvrstoću i otpornost na umor materijala. Ležajevi od ovog materijala najčešće se koriste u prašnjavom i korozivnom okolišu. Druga vrsta bronci ima nižu čvrstoću i tvrdoću, a koriste se kao prevlake za čelične dijelove. Ukoliko se bronca legira s malim količinama mangana, nikla, silicija i cinka (sveukupno do 2 %) moguće je poboljšati njezinu strukturu i svojstva. Najčešća primjena je za prevlačenje čeličnih dijelova radilice i klipnjače motora s unutarnjim izgaranjem [6].

U tablici 3 prikazani su kemijski sastavi i mehanička svojstva nekih olovnih i olovnokositrenih bronci.

Legura G-CuPb5Sn je otporna na koroziju, pare solne i sumporne kiseline. Koristi se za proizvodnju kliznih ležajeva s većim specifičnim opterećenjima i za armature koje su otporne na kiseline. G-CuPb10Sn je legura s dobrim kliznim svojstvima, otporna na trošenje i koroziju. Najčešće se koristi za ležajeve s većim površinskim opterećenjima poput ležaja vozila, valjačkih strojeva i sl. G-CuPb15Sn je legura koja se najčešće koristi za ležajeve koji nisu dobro podmazivani jer ima odlična klizna svojstva. Zadnja legura navedena u tablici je bronca G-CuPb15Sn. Koristi se za ležajeve s najboljim kliznim svojstvima koji su izloženi vrlo visokim specifičnim opterećenja i rade pri malim brzinama. Ova legura je otporna na sumpornu kiselinu, ali je slabije livljivosti nego legura CuPb15Sn. Najčešća primjena je kod izrade ležajeva za mlinove, crpke i valjaonice za hladno valjanje lima ili folija.

**Tablica 3** Kemijski sastav i mehanička svojstva lijevanih legura bakra s olovom i kositrom [4]

Oznaka legure	Kemijski sastav %	Mehanička svojstva (min. vrijednosti)		
		$R_{p02}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %
G-CuPb5Sn	Cu 84,0 - 87,0 Pb 4,0 - 6,0	130	240	15
G-CuPb10Sn	Cu 78,0 - 82,0 Pb 8,0 - 11,0 Sn 9,0 - 11,0	80	180	8
G-CuPb15Sn	Cu 75,0 - 79,0 Pb 8,0 - 11,0 Sn 7,0 - 9,0	170	180	8
G-CuPb20Sn	Cu 69,0 - 76,0 Pb 18,0 - 23,0 Sn 4,0 - 6,0	90	160	6

#### 2.2.4 Berilijska bronca

Iako se legure poput berilijske bronce, s malim postotkom legirnih elemenata do 5 %, uvrštavaju u skupinu nisko legiranog bakra, zbog svoje važnosti uvrštava se u bakrove. Glavna karakteristika berilijskih bronci je njihova odlična električna vodljivost. Ova legura sadrži oko 2 % berilija, a može sadržavati i mali postotak kobalta ili nikla. U slučaju da se legira s kobaltom ili niklom, udio berilija se mijenja. Berilijska bronca ima vrlo kompleksnu toplinsku obradu i ona zahtijeva izrazito preciznu kontrolu. Ako je toplinska obrada dobro provedena, dobiva se legura s najvećom čvrstoćom od oko 1350 N/mm<sup>2</sup>. Dobra mehanička svojstva poput već navedene dobre električne vodljivosti, otpornosti na trošenje, kemijske postojanosti i nemagnetičnosti omogućuju ovoj bronci da bude materijal koji se najviše koristi za izradu opruga kod preciznih alata i alata za lijevanje polimernih materijala. Posebnu primjenu ima kod alata koji ne smiju proizvoditi iskre prilikom rada, poput opreme za rudarenje [4].

U tablici 4 prikazan je kemijski sastav i mehanička svojstva koja su testirana na šipkama napravljenim od berilijske bronce. Dvojne vrijednosti su iskazane za neka svojstva jer svojstva uvelike ovise o postupku toplinskog očvršćivanja. U gornjem redu prikazani su podaci za uzorke koji nisu toplinski obrađeni, dok su u donjem redu toplinski očvršćeni uzorci. Iz tablice se može vidjeti da su prve dvije legure, CuBe<sub>2</sub> i CuBe<sub>2</sub>Pb, vrlo čvrste legure s visokom tvrdoćom. Te legure su otporne na trošenje pri povišenim temperaturama, a smatraju se srednjim dobrim vodičima električne energije. Zbog otpornosti na trošenje pri povišenim temperaturama koriste se za izradu svih vrsti opruga i kalupa za lijevanje polimernih materijala. Legura CuCo<sub>2</sub>Be je također legura visoke čvrstoće i tvrdoće koja ima osrednju električnu vodljivost, ali visoku mehaničku otpornost na trošenje pri povišenim temperaturama. Od nje se proizvode elektrode za točkasto i ostale vrste zavarivanja, osovine, ležajevi vodiča te kokile i alati za rad pri povišenim temperaturama.

Tablica 4 Kemijski sastav i mehanička svojstva berilijskih bronci [4]

Oznaka legure	Kemijski sastav %	Mehanička svojstva (min. vrijednosti)			
		$R_{p02}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %	HV
CuBe2	Be 1,8 - 2,1 Ni + Co 0,2 - 0,6 Cu ostatak	140 - 210	420 - 600	35	90 - 125
CuBe2Pb	Pb 0,2 - 0,6	500 - 1400	600 - 1500	-	180 - 430
CuCo2Be	Be 0,4...0,7 Co 2,0...2,8 Ni + Fe 0,5 Cu ostatak	140 - 210 380 - 880	250 - 370 450 - 950	20 -	70 - 100 130 - 260

### 2.2.5 Silicijska i manganska bronca

Silicijska bronca je podobna za hladnu i toplu preradu, ima dobru kemijsku postojanost, visoku žilavost i prosječnu čvrstoću. Najčešće, osim silicija sadrži mangan, nikal, cink ili željezo, a to najviše ovisi o podrijetlu legure. Silicijska bronca je rijetko dvokomponentna legura [4].

Manganska bronca je izrazito otporna na morsku koroziju i odlično prigušuje vibracije, a nedostaci su joj visoka cijena i loša rezljivost. Najčešće se lijeva, ali može se hladno i toplo oblikovati [4].

### 3. Aluminijske bronce

Aluminijske bronce su legure bakra u kojima je aluminij glavni legirni element. Za tehničke svrhe najvažnije su legure koje sadrže ispod 12 % aluminija.

#### 3.1 Mikrostruktura aluminijske bronce

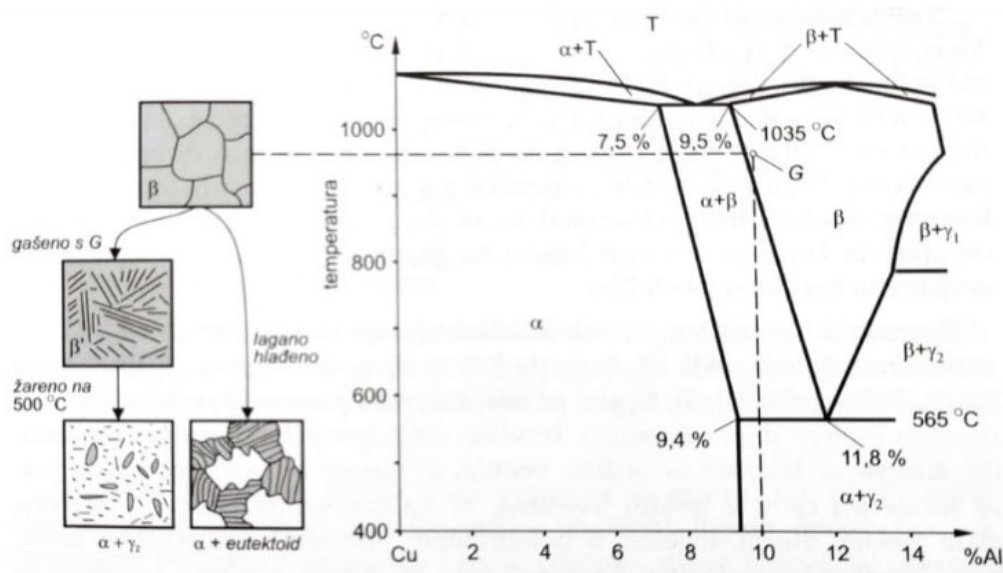
Zbog spore difuzije zanemarujemo mikrostrukturne promjene ukoliko je hlađenje ispod 400 °C, kao i kod kositrenih bronci. Dijagram stanja je kompliciran i sličan je dijagramu stanja kositrenih bronci. Udio aluminija koji može biti u aluminijskoj bronci na sobnoj temperaturi je 7,3 %, ali udio aluminija može rasti s povišenjem temperature do 9,4 %. Na dijagramu stanja može se vidjeti da se do udjela od 9,4 % aluminija na sobnoj temperaturi, pojavljuje samo  $\alpha$ -faza.  $\alpha$ -faza aluminijske bronce ima BCC kristalnu rešetku sa sličnim mehaničkim svojstvima kao i  $\alpha$ -faza kod mjedi. Ona je relativno mekana i lako oblikovljiva. U proizvodnji će se rijetko dogoditi da legura sadrži samo  $\alpha$ -fazu, najčešće će se u strukturi naći i mali udio  $\beta$ -faze. Kako bi se postigla što veća homogenost, udio aluminija u leguri mora biti između 7,5 % i 8,5 %. Ako je udio aluminija između 7,3 % i 9,4 % mikrostruktura će sadržavati osim  $\alpha$ - ili  $\beta$ -faze još i eutektik. Tijekom hlađenja eutektična faza nestaje, stoga se njen utjecaj na mikrostrukturu aluminijske bronce ne može odrediti. Tijekom hlađenja  $\alpha$  i  $\beta$  kristali se mijenjaju s obzirom na skrućivanje taline.  $\beta$ -faza je čvrsta otopina  $\text{Cu}_3\text{Al}$  s FCC strukturom. Ona je tvrda i krhka.  $\beta$ -faza nastaje iz taline s udjelom aluminija od 9,5 % do 12 % tijekom procesa kristalizacije. Tijekom sporog hlađenja  $\beta$ -faza se na eutektoidnoj temperaturi od 550 °C pretvara u lameralni eutektoid ( $\alpha+\gamma_2$ ).  $\gamma_2$  faza je intermetalna faza sastava  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  koja ima povećanu tvrdoću, ali i krhkost. Nakon rekristalizacije u čvrstom stanju sporo hlađena taljevina koja sadrži udio aluminija između 9,4 % i 12 % je heterogena. Kristalna struktura se sastoji od  $\alpha$  kristala i eutektoida ( $\alpha+\gamma_2$ ) [6].

Heterogene strukture koriste se češće od homogenih jer im se toplinskom obradom mogu poboljšati mehanička svojstva. Legure koje sadrže udio aluminija od 10 % do 12 % mogu se toplinski obraditi sa sličnim postupcima kao i čelik. Martenzitna transformacija se može ostvariti kada je eutektoidna transformacija onemogućena brzinom hlađenja iz  $\beta$  ili ( $\alpha+\gamma_2$ ) faze. Nakon brzog hlađenja mikrostruktura sadrži čvrste iglice  $\beta_1$  faze s BCC kristalnom rešetkom. Kada se  $\beta$ -faza ohladi ispod temperature nastanka martenzita  $M_s$ , nastat će struktura nalik igličastom martenzitu ( $\beta'$ ) koja ima BCC strukturu[6].



### 3.1.1 Mikrostrukturne promjene

Na primjeru bronce s 10 % aluminija mogu se objasniti mikrostrukturne promjene nastale pri hlađenju. Nakon hlađenja na temperaturi okoliša, legura s 10 %Al ima mikrostrukturu koja se sastoji od  $\alpha$ -faze i eutektoida ( $\alpha+\gamma_2$ ). Ukoliko ponovno zagrijemo eutektoid on će se iznad eutektoidne temperature početi transformirati u čvrstu otopinu  $\beta$ . Daljnjim zagrijavanjem do 900 °C  $\alpha$ -faza će se potpuno otopiti u  $\beta$ -fazi i tako će se postići potpuno monofazna čvrsta otopina  $\beta$ . Gašenjem te legure u vodi nastaje mikrostruktura koja se sastoji od  $\beta'$  faze. Ova faza nije prikazana u dijagramu jer je nije ravnotežna kao i martenzit kod čelika. Poput martenzita,  $\beta'$  je krhka i tvrda te ima sličnu mikrostrukturu. Popuštanjem na oko 500 °C doći će do precipitacije finih nakupina  $\alpha$ -i  $\gamma_2$ -faze, što je slično kao popušteni martenzit kod čelika koji je toplinski obrađen na sličan način. Ako nakon popuštanja aluminijsku broncu s 10 %Al iz  $\beta$ -faze hladimo na zraku nastat će mikrostruktura bainitnog tipa s fino precipitiranom  $\gamma_2$ - ili  $\beta'$ -fazom. Ukoliko se želi postići  $\alpha$  i  $\gamma_2$  mikrostruktura nakon žarenja, ona se može postići jedino hlađenjem u peći do okolne temperature. Slika 12 prikazuje dijagram stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnih promjena [4].



Slika 12 Dijagram stanja Cu-AL s prikazom mikrostrukturne promjena [4]

### 3.1.2 Utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturne promjene

U znanstvenom radu [9] provedeno je eksperimentalno istraživanje u kojem se promatrao utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu legure aluminijske bronce CuAl10Fe3Mn1,5. Kemijski sastav ispitnog materijala naveden je u tablici 5. Istraživanje je provedeno na 20 cilindričnih uzoraka duljine 15 mm.

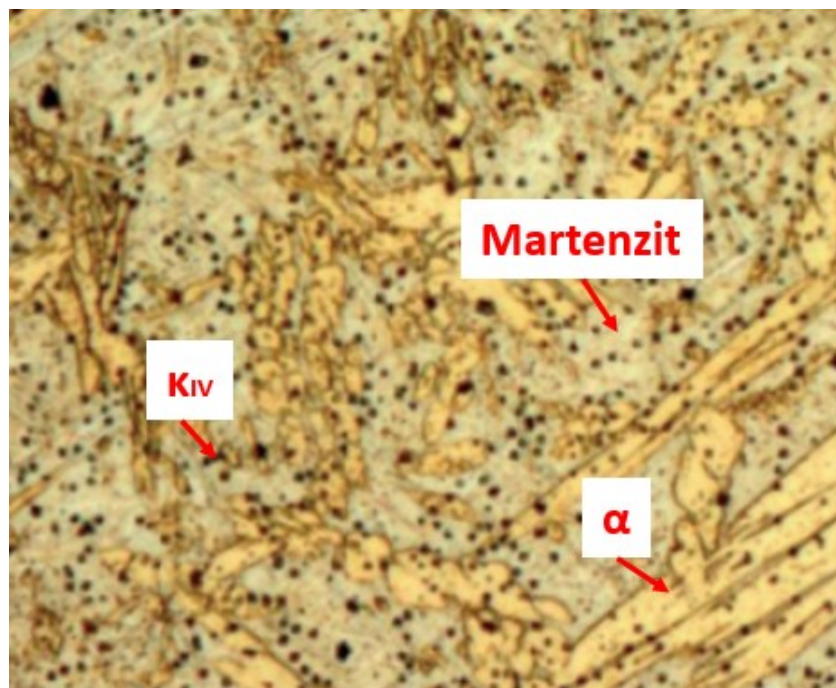
**Tablica 5 Kemijski sastav legure CuAl10Fe3Mn1,5 [9]**

Kemijski sastav, %							
Al	Fe	Mn	Pb	Sn	P	Ni	Zn
9,67	3,46	1,31	0,003	0,021	0,001	0,081	0,024

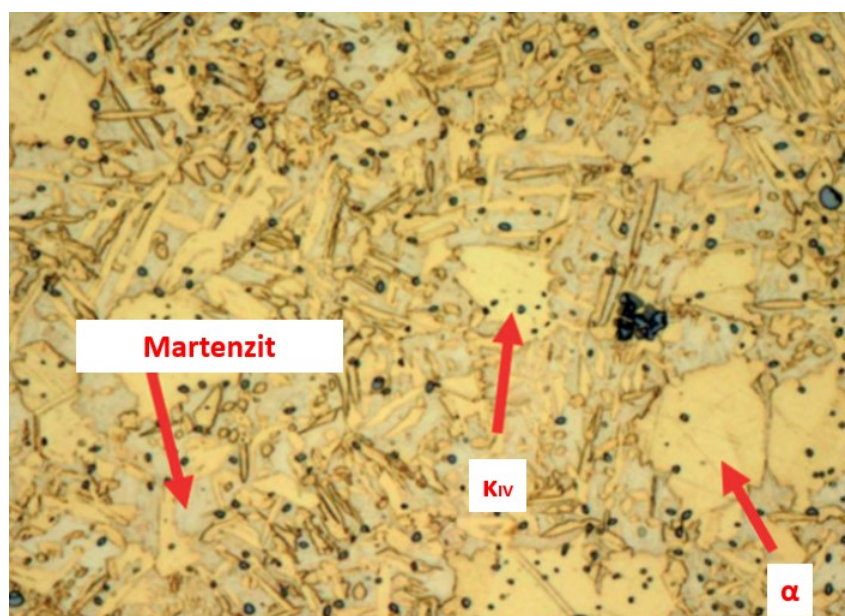
Uzorci su podvrgnuti zagrijavanju na 700 °C, 850 °C i 1000 °C, zatim hlađeni u vodi, ulju, na zraku i u peći. Uzorci su zagrijavani u električnoj peći bez zaštitne atmosfere. Zagrijavanje do 1000 °C je trajalo 90 min, do 850 °C 75 min i do 700 °C 60 min. Svi uzorci su jednako dugo ostavljeni na temperaturi grijanja.

Postignuta mikrostruktura nakon hlađenja u vodi ovisi o temperaturi grijanja i vremenu. Nakon hlađenja s najviše temperature (1000 °C) dobivena mikrostruktura sastoji se od dominantne martenzitne faze i malog udjela iglica  $\alpha$ -faze. Mikrostruktura je prikazana na slici 13. Duž martenzitnih pločica nalaze se precipitati  $\kappa_{IV}$ -faze, koji su nejednoliko distribuirani. To su nikal–željezo–aluminijski precipitati nastali od  $\beta$ -faze kao okrugle ili dendrične rozete bogate željezom.  $\kappa_{IV}$  je fini precipitat obogaćen željezom [10].  $\kappa$  precipitati su nejednoliko raspoređeni i manji od 1  $\mu\text{m}$ . Kod uzorka koji su zagrijavani do 850 °C transformacija u  $\beta$ -fazu nije završena. Poliedarska zrna ove faze čine skoro jednu trećinu mikrostrukture. Nakon hlađenja u vodi, neka zrna su u obliku zrna blizanaca. Prostor između zrna je ispunjen sitnim  $\alpha$ -zrnima, slika 14. Čestice  $\kappa_{IV}$  precipitata su znatno veće nego kod uzorka zagrijavanog na 1000 °C.

Na nižoj temperaturi zagrijavanja (700 °C) udio eutektoidne  $\beta$  transformacije postaje manji, što uzrokuje povećanje udjela  $\alpha$ -faze do otprilike 70 %.

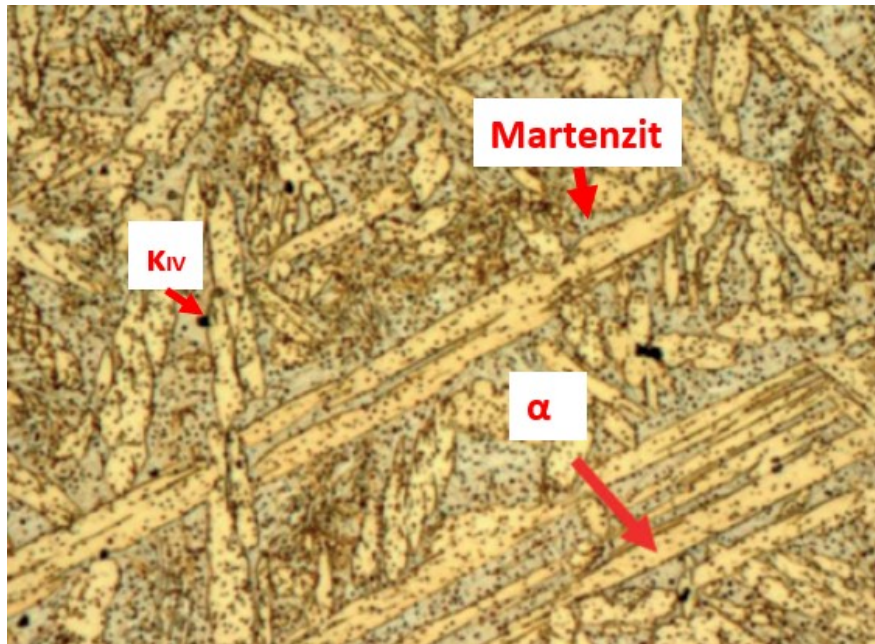


Slika 13 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u vodi [9]



Slika 14 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 850 °C i hlađenog u vodi [9]

Kod uzoraka koji su hlađeni u ulju na najvišoj temperaturi (1000 °C) pojavljuje se mikrostruktura slična onoj kao kod uzoraka koji su hlađeni u vodi. Razlika je u tome što ovi uzorci sadrže veća zrna  $\alpha$ -faze. Između iglica nalazi se struktura slična martenzitu, ali i povećana  $\alpha$ -zrna. Također pojavljuje se veći broj  $\kappa_{IV}$  precipitata nego u uzorku koji je hlađen u vodi. Mikrostruktura je prikazana na slici 15.

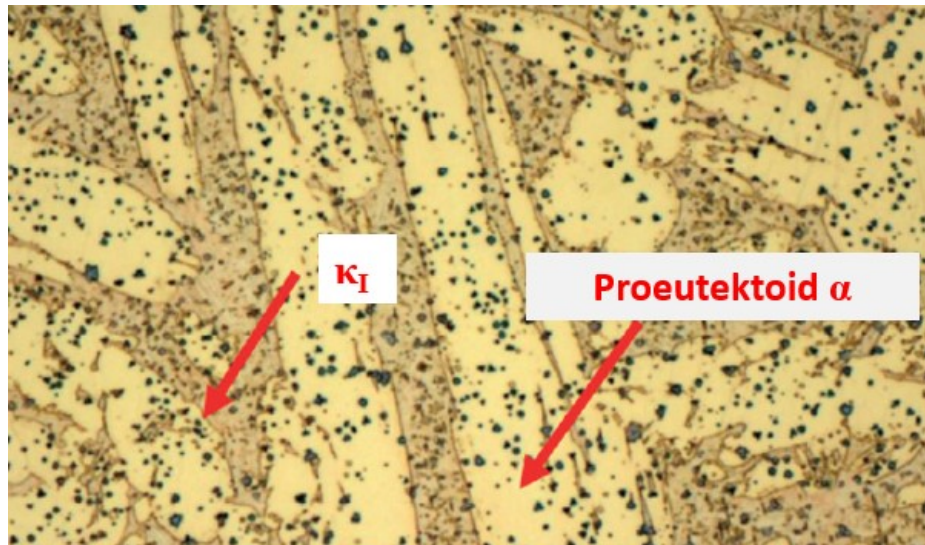


Slika 15 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u ulju [9]

Udio  $\alpha$ -faze u mikrostrukturi uzorka nakon hlađenja u ulju s temperature od 850 °C ostaje konstantan. Zrna su grublja i neka su u obliku zrna blizanaca. Uz njihove granice postoje fini okrugli precipitati, vjerojatno  $\kappa_{IV}$  precipitati. Osim  $\kappa_{IV}$  precipitata pojavljuju se i  $\kappa_I$ .  $\kappa_I$  precipitati su oblika rozete, a sadrže 6 %Al, 8 %Ni, 69 %Fe, 13 %Cu [8].

Kod uzoraka koji su zagrijavani na 700 °C nema velike razlike u odnosu na one koje su hlađene u vodi s iste temperature.

Uzorcima koji su zagrijavani na 1000 °C i hlađeni na zraku mikrostruktura najviše slična Widmanstättenovu strukturu. U ovim uzorcima udio proeutektoidne  $\alpha$ -faze je veći nego u uzorcima koji su hlađeni u ostalim medijima. Mikrostruktura također sadrži veliki udio  $\kappa_I$  i  $\kappa_{IV}$  precipitata, slika 16.

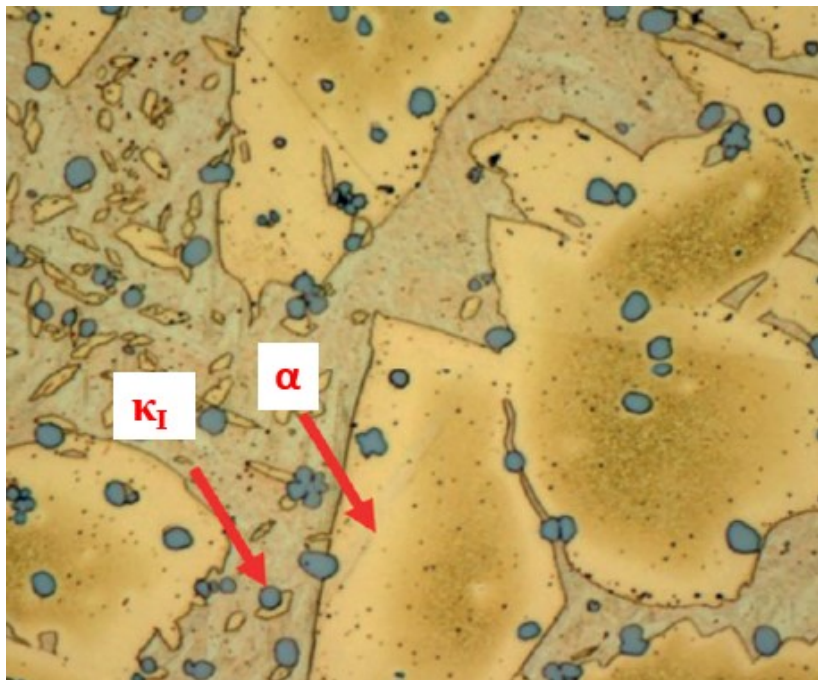


Slika 16 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog na zraku [9]

Promjene u mikrostrukturi nakon hlađenja s 850 °C su jasno vidljive. Udio  $\alpha$ -faze se povećao i zrna su poliedarska za razliku od uzorka koji je ohlađen u vodi.

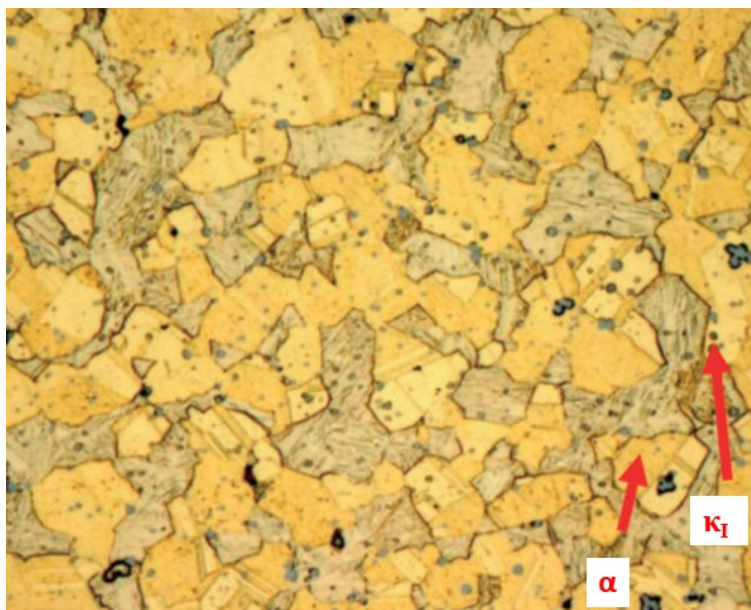
Prilikom hlađenja sa 700 °C mikrostruktura ima vidljive promjene. Povećan je udio  $\alpha$ -faze, a prostor između zrna počinje sličiti na diskontinuiranu mrežu. Također vidljivi su i  $\kappa_I$  precipitati.

Kod uzoraka koji su hlađeni u pećima najveća promjena se vidi prilikom hlađenja sa temperature od 1000 °C. Nakon hlađenja struktura izgleda kao gruba Widmanstättenova struktura. Udio proeutektoidne  $\alpha$ -faze je više prisutan nego u uzorcima koji su hlađeni s iste temperature u drugim medijima. Mikrostruktura je prikazana na slici 17. Mikrostruktura sadrži veliki broj  $\kappa_I$  i  $\kappa_{IV}$  precipitata. Gruba zrna  $\alpha$ -faze su sada okruglija. Mikrostruktura sadrži veliki broj  $\kappa_I$  precipitata, koji imaju veliki udio željeza i počinju se oblikovati u oblik rozete. Prostor između zrna je ispunjen  $\alpha$ -česticama i produktima nastalim eutektičkom dekompozicijom  $\beta$ -faze.



Slika 17 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 1000 °C i hlađenog u peći [9]

Temperatura zagrijavanja od 850 °C je također promijenila mikrostrukturu. Poliedarska zrna također sadrže kristale blizance. Boja diskontinuirane mreže sugerira da je povećan udio željeza u mikrostrukтури. Unutar zrna nalaze se okrugli  $\kappa_{IV}$  precipitati dok su  $\kappa_I$  precipitati neravnomjerno raspoređeni po cijeloj mikrostrukтури, koja je prikazana na slici 18.



Slika 18 Mikrostruktura uzorka zagrijanog na 850 °C i hlađenog u peći [9]

Mikrostruktura uzorka ohlađenog sa 700 °C ne razlikuje se puno od onog ohlađenog sa 850 °C. Razlika je u tome što su prisutna finija zrna  $\alpha$ -faze i zasebne čestice između zrna umjesto mreže čestica.

### 3.2 Kemijski sastav aluminijskih bronci

Zbog različitih kemijskih sastava aluminijske bronce možemo podijeliti u dvije skupine:

- elementarne (jedno komponentne) legure, Cu-Al legure bez legirnih elemenata
- kompleksne (višekomponentne) legure koje osim Al legure sadrže i ostale legirne elemente poput željeza, nikla i magnezija, čiji udio nikad ne prelazi 6 %.

Željezo se često dodaje aluminijskim broncama zato što se do udjela od 2 % otapa u  $\alpha$ -fazi i time poboljšava čvrstoću. Željezo s aluminijem stvara  $\text{FeAl}_3$  intermetalnu fazu koja uzrokuje poboljšavanje strukture.

Mangan se dodaje u višekomponentnu leguru zbog svog deoksidirajućeg efekta u metalnim talinama. Do 12 % mangana može se otopiti u  $\alpha$ -fazi. Kao i željezo služi za poboljšavanje strukture.

Nikal je kemijski element koji se najčešće dodaje u legure aluminijske bronce. Pozitivno utječe na korozivnu postojanost u agresivnim vodenim medijima i morskoj vodi. Do oko 5 %Ni može se otopiti u  $\alpha$ -fazi. Aluminij u kombinaciji s niklom stvara intermetalnu fazu  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , koja ima učinak precipitacijskog očvršćivanja.

### 3.3 Primjena aluminijskih bronci

Postoje brojne i raznolike primjene aluminijske bronce. Raznovrsna primjena najbolje odražava svestranost inženjerskog materijala. Aluminijske bronce sve veću primjenu nalaze u petrokemijskoj, kemijskoj, pomorskoj, zrakoplovnoj, automobilskoj i još mnogim drugim industrijama. Svestranost aluminijske bronce se najviše pripisuje odličnim mehaničkim svojstvima koja proizlaze iz mogućnosti lijevanja odljevaka visoke čistoće i mogućnosti kovanja. Industrija u kojoj se aluminijska bronca najviše koristi je pomorska industrija zbog odličnog ponašanja u morskoj vodi [12].

Glavna primjena aluminijske bronce u industriji je zbog sljedećih karakteristika:

- pri povišenim temperaturama ima visoku otpornost na oksidaciju
- posjeduje visoku otpornost na trošenje
- ima izvrsnu otpornost na koroziju

- pri povišenim temperaturama zadržava čvrstoću koja se može poboljšati dodavanjem određenih kemijskih elemenata
- gotovi proizvod ima lijepu boju koja se može koristiti u dekorativne svrhe, posebno u izradi nakita kao zamjena za zlato.

Homogene aluminijske bronce su čvrste i primjerene za hladno i toplo oblikovanje. Heterogene legure su čvršće i tvrđe, ali se teže hladno oblikuju u usporedbi s homogenim legurama. Heterogene legure su primjerene za toplo oblikovanje i imaju dobra svojstva lijevanja. Dobra čvrstoća, čak i pri povišenim temperaturama, je svojstvo aluminijskih bronci po kojem su prepoznatljive. Također posjeduju izvrsnu otpornost na trošenje i odličnu korozivsku postojanost u niz medija.

Hladno gnječene  $\alpha$ -legure sadrže od 4 % do 8 % aluminijske i najčešće oko 4 % nikla. Kao što je već rečeno nikal poboljšava korozivsku postojanost i zbog toga se hladno gnječene legure koriste za proizvodnju kondenzatorskih cijevi i izmjenjivača topline. Zbog uvjeta primjene zahtijevaju visoku čvrstoću i korozivsku postojanost do temperatura oko 300 °C. Svojstvo zbog kojeg su ove legure još popularnije jest mogućnost prilagođavanja boje, boji 18-karatnog zlata. Zbog toga se limovi od ove legure koriste u proizvodnji dekorativnih predmeta, ali velika konkurencija su proizvodi od anodiziranog aluminijske. Najčešće korištena hladno gnječena aluminijska bronca je legura CuAl15. Ona je dostupna u raznim oblicima poput limova, šipki, žica i cijevi. U mekanom stanju ova legura može imati čvrstoću od 380 MPa, duktilnost od 40 % i tvrdoću od 70 do 110 HB. Koristi se u kemijskoj industriji i prehrambenoj industriji, industriji proizvodnje papira i kao materijal za izgradnju brodova.

Toplo gnječene i lijevane legure imaju kemijski sastav koji sadrži od 8 % do 12 % aluminijske s mikrostrukturom sastavljenom od  $\alpha$ -kristala mješanaca i  $\gamma_2$ -faze. Najčešći legirani elementi su nikal, željezo i mangan. Toplo oblikovljive legure oblikuju se kovanjem ili valjanjem, ovisno o kasnijoj primjeni. Legirni elementi se dodaju u udjelu do 5 %. Toplo gnječene legure najčešće se koriste u kemijskoj industriji i za one primjene gdje je potrebno imati visoku korozivsku otpornost.

Neke od legura koje se koriste su:

- CuAl9Mn2 – koristi se za proizvodnju ojačanja i primjenjuju do 250 °C
- CuAl9Fe3 – koristi se u proizvodnji ležajeva i ventila
- CuAl10Fe3Mn1,5 – legura s pojačanom čvrstoćom i tvrdoćom, a koristi se za izradu ležajeva, te zamjenjuje olovne bronce za primjene do 600 °C



- CuAl10Fe4Ni4 – koristi se za primjene kada nikal mora zamijeniti mangan jer nikal pozitivno utječe na mehanička svojstva i korozivsku postojanost
- CuAl10Fe4Ni4 – koristi se kod lijevanih proizvoda, posebno za vodene turbine, pumpe, ventile, ispušne ventile i općenito tamo gdje radna temperatura povišena i također u kemijskoj industriji.

Nedostatak aluminijske bronce su poteškoće koje se javljaju prilikom lijevanja. Na visokim temperaturama (iznad 1100 °C) aluminij lako oksidira te se stvara oksidni sloj i troska koja može dospjeti u kalup tijekom lijevanja. Oksidiranje aluminija može se izbjeći, ako se koriste metode lijevanja bez turbulencija što uzrokuje poskupljivanje proizvoda [4].

Neki od najčešćih primjera primjene aluminijske bronce prikazani su u tablici 6.

**Tablica 6 Primjeri primjene aluminijske bronce [12]**

Lijevani proizvodi		Kovani proizvodi	
Ventilatori	Ležajevi	Otkivci kovani u kalupu	Ventilatori
Propeleri	Neprskajući alati	Cijevne stijene	Oštrice kompresora
Vratila	Kalupi za staklo	Tlačne posude	Zupčanici
Pumpe i ventili	Kompresori hlađeni vodom	Lanci	Osovine

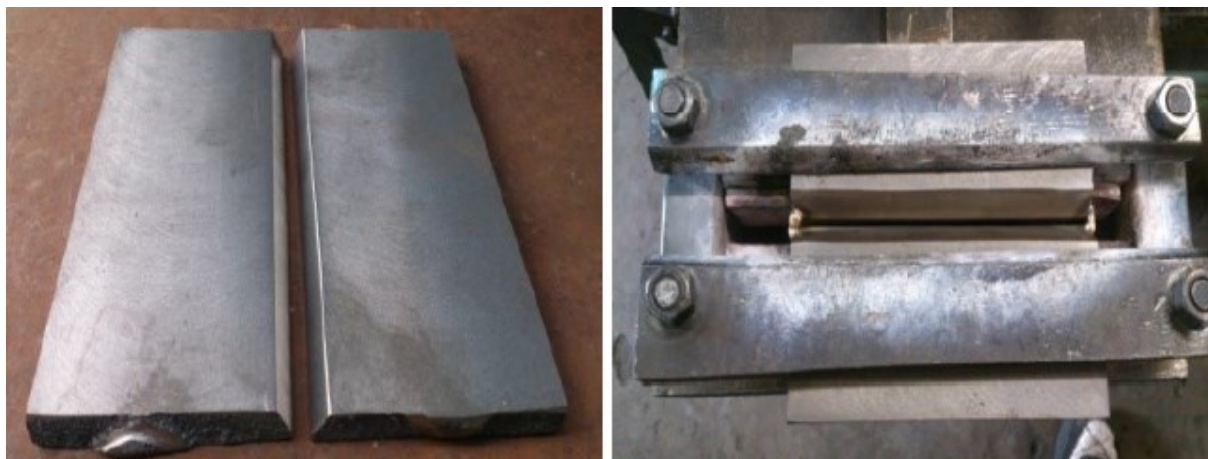
### 3.3.1 Primjena aluminijskih bronci prilikom popravka kapula za lijevanje

Provedeno je istraživanje u kojem se htjelo otkriti koji je materijal najbolji za popravak pukotina i oštećenja na kalupima od crvičastog ili vermikularnog lijeva [13]. Popravak je izveden tvrdim lemljenjem slojeva s tri odabrana materijala, TIG metodom lučnog lemljenja. Materijali koji su izabrani za reparaciju su mjed ( $\text{CuZn40SnSi}$ ), silicijska bronca ( $\text{CuSi3Mn1}$ ) i aluminijska bronca ( $\text{CuAl10Fe}$ ). Faktori koji su uzeti u obzir prilikom odabira materijala su čvrstoća spoja, jednostavnost popravka, vrijeme koje je potrebno za popravak i ekonomski aspekt popravka. Osim tvrdog lemljenja, repariranje se može izvesti i hladnim zavarivanjem s elektrodama od Ni ili Ni-Fe elektrodama. Glavna razlika između tvrdog lemljenja i zavarivanja je u maksimalnoj temperaturi rada (ako se koristi bakrena legura kao materijal za popunjavanje temperatura je između  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ukoliko se popravljiva odljevaka velikih dimenzija i mase najbitnije je postići dobru temperaturu predgrijavanja ( $650 - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). To je minimalna temperatura za pravilno vlaženje osnovnog materijala tijekom tvrdog lemljenja ukoliko je dodatni metal bakrena legura. S pravilnim procesom lemljenja može se ostvariti čvrstoća spoja i do  $280\text{ MPa}$ , koja u određenim slučajevima može biti i veća od čvrstoće osnovnog materijala.

Lučno lemljenje je relativno poznata tehnologija najčešće korištena u automobilskoj industriji (robotsko lemljenje MIG postupkom). TIG lučno lemljenje nije toliko istražena tehnologija u lemljenju vermikularnog lijeva.

Na sposobnost tvrdog lemljenja vermikularnog lijeva utječu mnogi faktori. Ukoliko je temperatura lemljenja veća od temperature eutektičnih promjena u osnovnom materijalu, nastat će promjene u mikrostrukturi i porast će udio cementita. Ukoliko osnovni materijal ima nisku toplinsku vodljivost, značajno toplinsko širenje i nisku plastičnost, korištenjem neodgovarajuće temperature mogu se pojaviti visoka toplinska naprezanja u spoju. Na sposobnost lemljenja također utječe čistoća površine materijala koji se lemi. Ako površina nije dobro očišćena od oksidnih slojeva lemljenje neće biti moguće.

U svrhu istraživanja odlučeno je da će se dva uzorka lemiti tehnologijom TIG lučnog lemljenja dok će se jedan uzorak lemiti tehnologijom lemljenja plamenom. Istraživanje je provedeno na pločama vermikularnog lijeva veličine  $150 \times 100 \times 10\text{ mm}$ . Spoj koji se lemi bio je V-spoj s kutom od  $60^{\circ}$  za TIG postupak i V-spoj s kutom od  $90^{\circ}$  za lemljenje plamenom. Jedan od uzoraka je prikazan na slici 19.



**Slika 19** Uzorci spremni za lemljenje [13]

Odabir dodatnog materijala i tehnologije lemljenja napravljen je prema normi EN ISO 17672. Legure dodatnih materijala CuSi3Mn1 i CuAl10Fe lemljene su TIG postupkom dok je dodatni materijal CuZn40SnSi lemljen postupkom lemljenja s plamenom. Na slici 20 prikazani su uzorci nakon lemljenja.

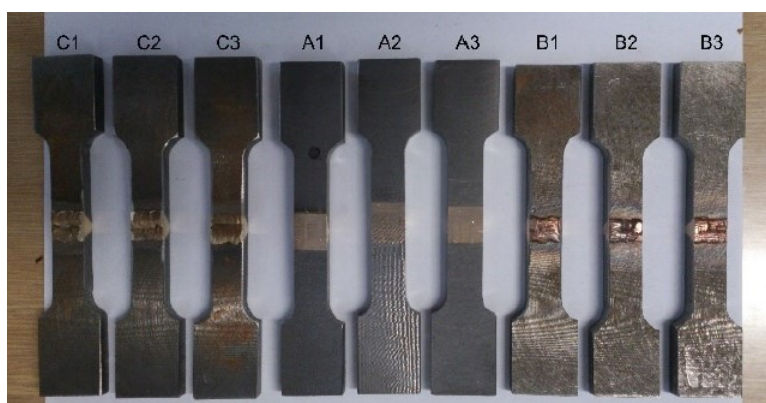
Nakon lemljenja uzorci su ohlađeni u suhom pijesku na sobnoj temperaturi.



**Slika 20** Prikaz prednje strane lemljenog spoja [13]

Kvaliteta spojeva je ispitana na više načina. Najvažniji kriterij bio je integritet spoja i njegova vlačna čvrstoća. Stoga su spojevi prvo bili podvrgnuti nerazornim ispitivanjima. Osim

vizualnog pregleda uzorci su pregledani korištenjem obojanog penetranta kako bi se vidjelo ima li kakvih pukotina koje su spojene s površinom. Za nerazorna ispitivanja korištene su različite procedure koje su opisane standardima (EN ISO 6520, EN ISO 5817, EN ISO 18279, EN ISO 17637, EN ISO 12799). Nakon toga, uzorci su podvrgnuti ispitivanju vlačne čvrstoće koje je provedeno u skladu s normom EN ISO 4136. Uzorci za statičko vlačno ispitivanje prikazani su na slici 21. Slovom A označeni su uzorci dodanog materijala CuZn40SnSi, slovom B uzorci od CuSi3Mn1 i slovom C uzorci od CuAl10Fe. U tablici 7 prikazani su rezultati vlačnog ispitivanja. Kao referenca za uzorke dodani su i uzorci od osnovnog materijala (D1 i D2).



Slika 21 Uzorci za statičko vlačno ispitivanje [13]

Tablica 7 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja [13]

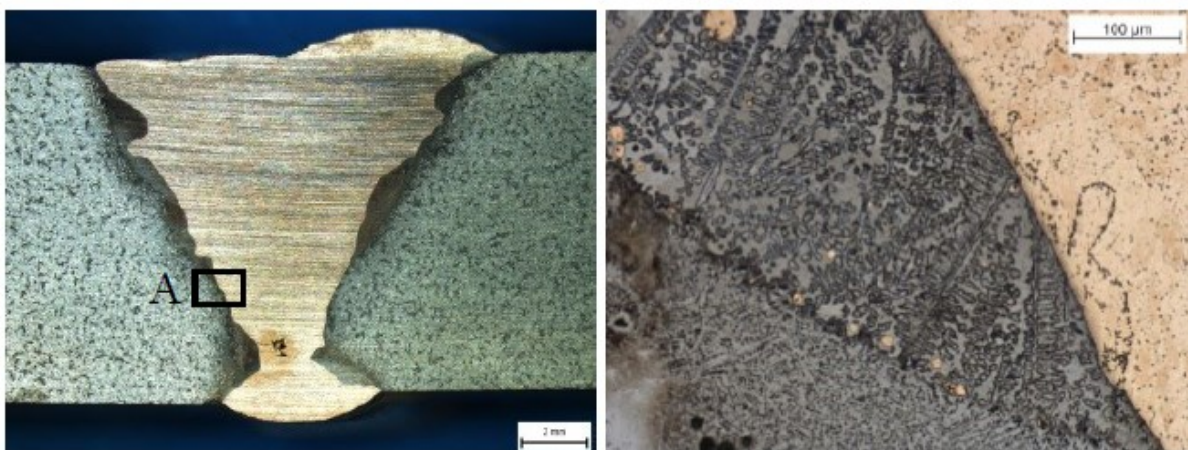
Testni uzorak	$F_m$ , kN	$R_m$ , MPa
A1	-	-
A2	7,24	59
A3	4,4	34
B1	16,1	135
B2	9,65	90
B3	-	-
C1	29,59	266
C2	28,29	247
C3	34,72	299
D1	37,3	280
D2	39,02	287

Rezultati uzoraka lemljenih legurom CuZn40SnSi nisu zadovoljili, jedan od razloga je što postupak lemljenja plamenom nije dobro izveden. Najbolje rezultate je ostvario uzorak zalemljen legurom CuAl10Fe.

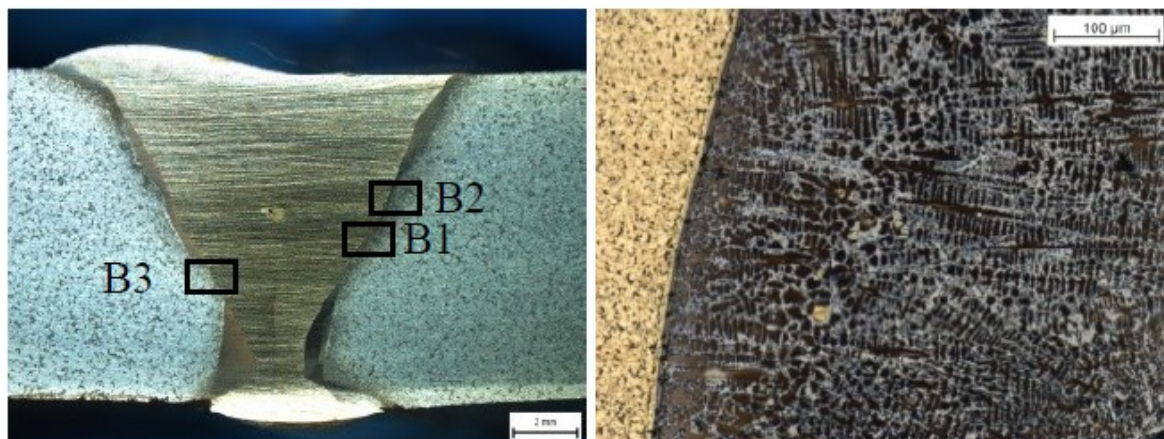
Na uzorcima je prevedno i metalografsko ispitivanje. Uočeno je da su rubovi osnovnog materijala mjestimice rastaljeni iako se to tijekom lemljenja ne bi trebalo dogoditi. Ovo je posebno vidljivo kod dodatnog materijala CuSi3Mn1. Mikrostruktura ovog spoja zbog temperaturnih ciklusa je bila zagrijavana iznad eutektičke temperature (1147 °C), što skupa sa naglim hlađenjem uzrokuje nastanak ledeburita na mjestima gdje se osnovni materijal spaja s dodatnim materijalom. Zbog novog toplinskog ciklusa pri stavljanju novog sloja nastao je „prežareni ledeburit“, prikazano na slici 22.

Kod uzorka gdje je dodatni materijal bio CuAl10Fe ledeburit je također prisutan što je vidljivo na slikama 23 i 24. Također se može vidjeti i martenzitno-perlitna struktura. Posebno je zanimljivo područje B3, na slici 24, gdje se mogu uočiti minimalne promjene na osnovnom materijalu.

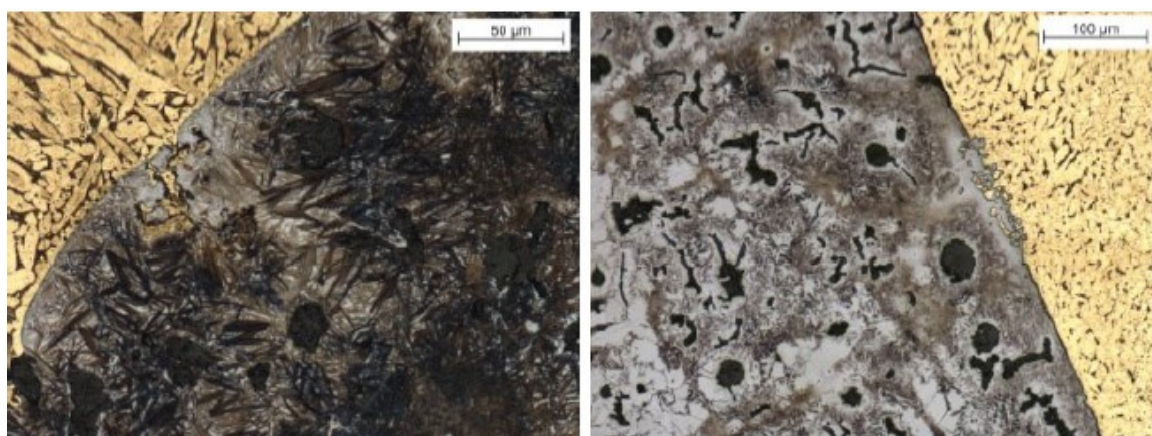
Uzorci kojima je dodatni materijal bio CuZn40SnSi nemaju vidljivo taljenje osnovnog materijala. Na fotografiji makrostrukturne, slika 25, mogu se točno vidjeti rubovi uzorka. Pri većem povećanju na fotografiji mikrostrukture može se vidjeti kako je mjestimice dodatni materijal ušao u osnovni materijal zbog pora nastalih u osnovnom materijalu.



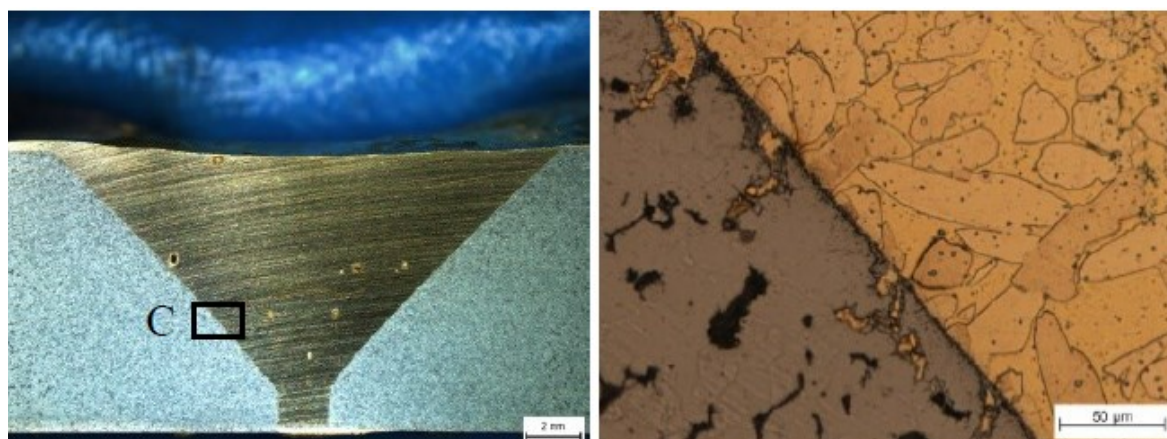
**Slika 22 Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokacija A za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal bio CuSi3Mn1 (desno) [13]**



Slika 23 Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokacija B1 za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal bio CuAl10Fe (desno) [13]



Slika 24 Mikrostruktura od lokacije B2 (lijevo) i B3 (desno) za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal CuAl10Fe [13]



Slika 25 Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura na lokaciji C za lemljeni spoj gdje je dodatni materijal CuZn40SnSi (desno) [13]

Zaključak istraživanja je da aluminijska bronca CuAl10Fe jest preporučljiv materijal kao materijal za ispunu pukotina na vermikularnom lijevu. Optimalna temperatura lemljenja mora biti manja od 250 °C i predgrijavanje uzorka nije potrebno. Metoda nanošenja koja se preporuča je tvrdo lemljenje TIG postupkom.

### 3.4 Mehanička svojstva aluminijskih bronci

Neke od aluminijskih bronci usporedive su čvrstoće kao i niskouglični čelici i čvršći od većine nehrđajućih čelika. Čvrstoća im je postojana i na povišenim temperaturama te se neznatno smanjuje na niskim temperaturama dok im je duktilnost postojana.

U tablici 8 prikazane su neke aluminijske bronce s njihovim mehaničkim svojstvima.

**Tablica 8 Mehanička svojstva aluminijskih bronci [12, 14]**

Oznaka legure	Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	Produljenje %	Tvrdoća HV
CuAl10Ni5Fe4	700 - 850	350 - 600	15 - 25	190 - 260
CuAl9Ni3Fe2	660 - 770	260 - 400	17 - 22	180 - 220
CuAl8Fe3	480 - 620	200 - 310	35 - 45	120 - 180
CuAl6Si2Fe	550 - 620	230 - 370	30 - 40	150 - 200

### 3.5 Korozijska postojanost

Aluminijske bronce imaju izvrsnu otpornost prema koroziji u različitim medijima i morskom okruženju zbog stvaranja tankog, ali čvrstog površinskog filma od aluminijevog oksida. Ovaj zaštitni film je samoobnavljajući i jednom kad se formira, ne ljušti se i sprječava daljnju oksidaciju. Legure aluminijske bronce s niklom imaju izvrsnu otpornost na napetosnu koroziju i umor nastao od korozije. Dobra prionjivost oksida u kombinaciji s korozijskom postojanošću te otpornost na umor i puzanje pri višim temperaturama čini aluminijsku broncu idealnim materijalom za visokotemperaturne uvjete. Također su otporne na rupičastu i selektivnu koroziju [12].

### **3.6 Otpornost na trošenje**

Aluminijske bronce pokazuju odličnu otpornost na trošenje u lijevanom i kovanom stanju. Često se sloj aluminijske bronce prskanjem ili navarivanjem nanosi na čelične dijelove kako bi im se poboljšala otpornost na trošenje [12].



## 4. Eksperimentalni dio

### 4.1 Cilj rada i provođenje istraživanja

Osnovni cilj rada je karakterizacija navara od aluminijske bronce CuAl8Ni2Fe2Mn2 na osnovnom materijalu od bakrove legure CuNiAl. U okviru karakterizacije provest će se sljedeća ispitivanja:

- analiza kemijskog sastava osnovnog materijala i materijala navara
- analiza mikrostrukture osnovnog materijala i materijala navara
- mjerenje makrotvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2
- savojno ispitivanje prema normi HRN EN ISO 7438:2008.

### 4.2 Materijal za ispitivanje

Na slici 26 prikazan je uzorak osnovnog materijala s navarom na kojem su provedena sva potrebna ispitivanja. Prema navodima proizvođača osnovni materijal ima oznaku CuAl10Fe5Ni5 dok je materijal žice za navarivanje bakrova legura oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2. Navar je nanešen na osnovni materijal MIG postupkom zavarivanja pod zaštitom plina (Ar 99,9 %). Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 9. Navar je na osnovni materijal u obliku ploče debljine 30 mm, nanešen u 3 sloja. Visina navara iznad ploče bila je oko 5 mm.



Slika 26 Uzorak osnovnog materijala s navarom

Tablica 9 Parametri navarivanja

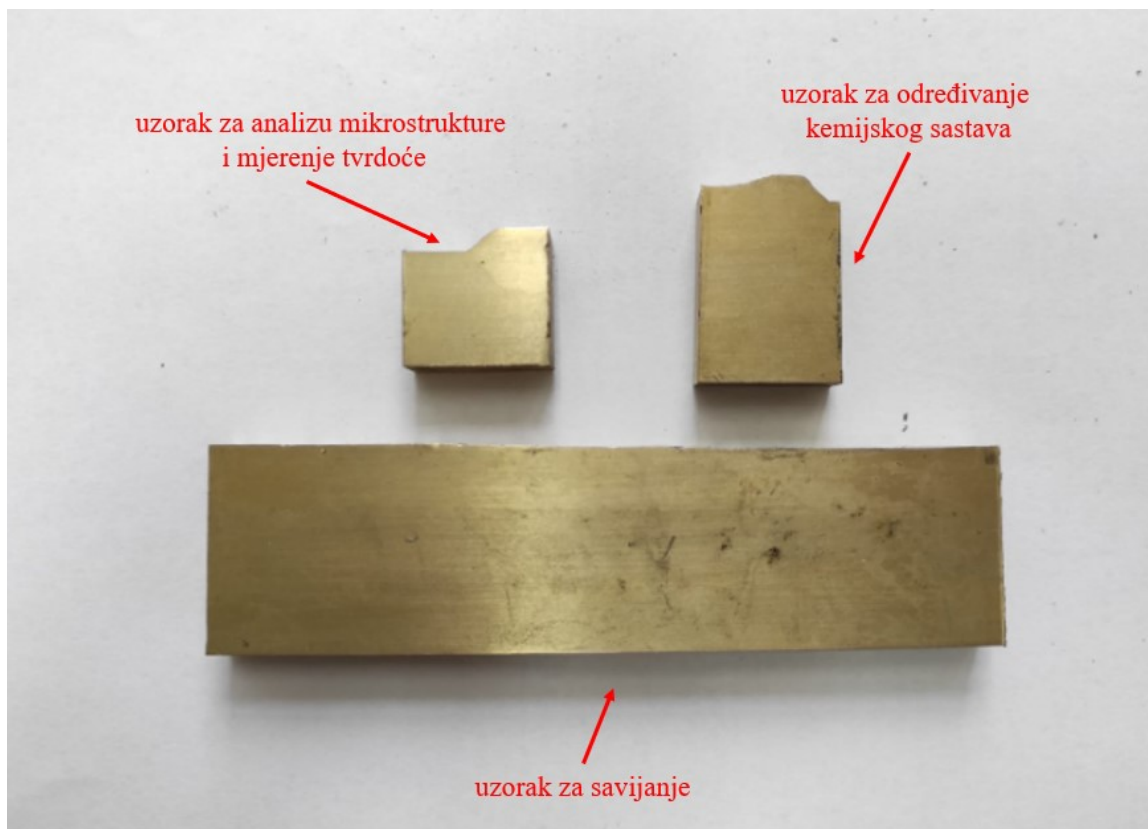
PARAMETRI ZAVARIVANJA							
Prolaz Br./N	Oznaka postupka	Debljina dodatnog materijala mm	Jakost struje A	Napon V	Brzina žice m/min	Brzina zavarivanja mm/min	Unos topline KJ/mm
1-n	131	UTP A 3422 Φ1,2	240	22	9	560	0,50

### 4.3 Priprema uzoraka za ispitivanje

Kako bi se na uzorku mogla provesti sva potrebna ispitivanja potrebno ga je prvo pripremiti. Uzorak je rezan strojnom pilom, prikazanom na slici 27, na manje dijelove koji će se kasnije koristiti za pojedina ispitivanja. Izrezani uzorci prikazani su na slici 28.



Slika 27 Rezanje uzorka pilom



**Slika 28** Uzorci za ispitivanja

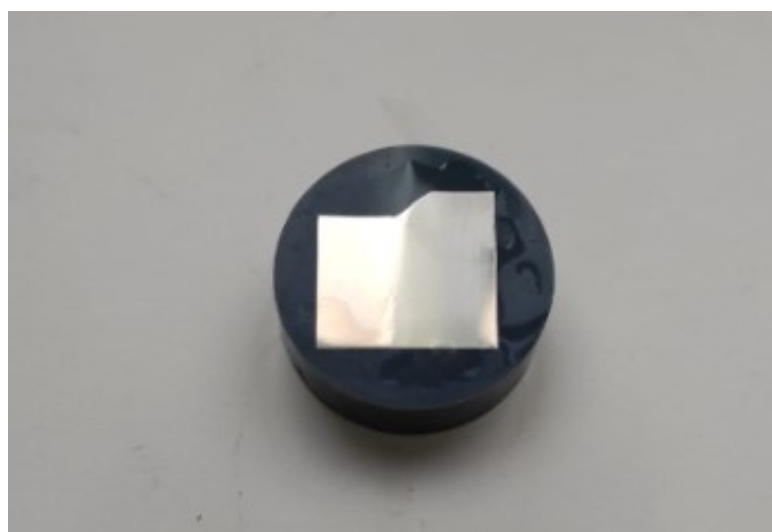
Nakon rezanja, uzorak za mikrostrukturu i mjerenje tvrdoće je brušen i poliran. Brušenje se obavlja na stroju brzinom od 300 o/min, a nakon svakog kruga brušenja mijenja se brusni papir. Prvi krug brušenja kreće sa papirom granulacije 320 zatim se svaki put granulacija poveća (600, 1000, 2400) i završava s granulacijom 4000. Tijekom brušenja voda teče po brusnom papiru, hladi uzorak i služi kao lubrikant. Brušenje metalografskog uzorka prikazano je na slika 29, a uzorak nakon brušenja prikazan je na slici 30.

Nakon brušenja slijedi poliranje koje se sastoji od dva koraka. U prvom koraku na tkaninu za poliranje stavlja se dijamantna pasta od 3  $\mu\text{m}$ , slika 31, koju s uzorkom razmažemo po tkanini za poliranje. Tijekom poliranja za hlađenje i podmazivanje koristi se lubrikant. Na slici 32 prikazan je postupak poliranja. Podloga za poliranje okreće se brzinom od 150 o/min. Za drugi korak poliranja koristi se tekućina za poliranje s abrazivnim česticama od 0,03  $\mu\text{m}$ .

Nakon što su oba koraka poliranja završena uzorak je spreman za analizu na svjetlosnom mikroskopu, slika 33.



Slika 29 Brušenje uzorka



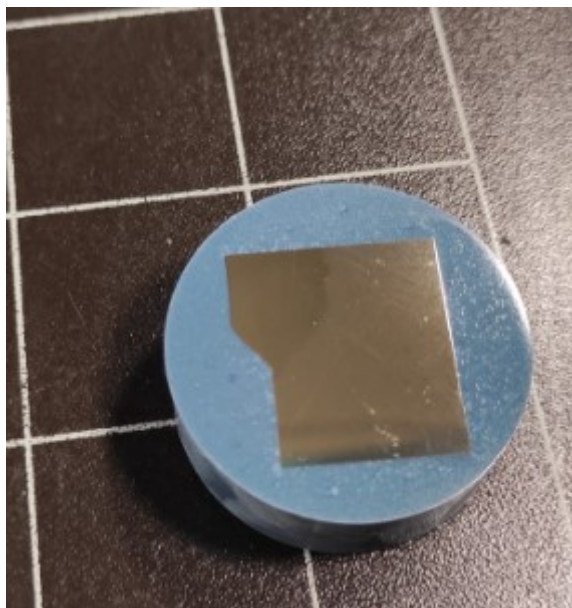
Slika 30 Uzorak nakon brušenja



Slika 31 Stavljanje dijamantne paste na tkaninu za poliranje



Slika 32 Poliranje uzorka



**Slika 33 Poliran uzorak**

Nakon poliranja površina uzorka analizira se na svjetlosnom mikroskopu, a nakon toga se nagriza u sredstvu za nagrivanje i ponovno se analizira u nagrivenom stanju. S obzirom na kemijski sastav osnovnog materijala i metala navara, korišteno je sredstvo za nagrivanje poznato pod nazivom Cu4B kompleks. Otopina se sastoji od 5 g  $\text{FeCl}_3$ , 30 ml HCl i 100 ml destilirane vode. Nakon nagrivanja postaje vidljiva mikrostruktura osnovnog i dodatnog materijala. Metalografski uzorak nakon nagrivanja prikazan je slici 34.



**Slika 34 Nagriženi uzorak**

#### 4.4 Analiza kemijskog sastava

Kvantitativna kemijska analiza uzorka provedena je u Laboratoriju za analizu metala u sklopu Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Metoda određivanja bila je optička emisijska spektrometrija. Optička emisijska spektrometrijska analiza je najraširenija skupina metoda za ispitivanje materijala i tvari anorganskog podrijetla, kao i primjesa u organskim tvarima. U metalurškim i metaloprerađivačkim poduzećima u svijetu, ova skupina metoda ispitivanja zajedno s rendgensko fluorescentnom analizom predstavlja od 60 do 80 % ukupnog broja ispitivanja [15]. Kemijska analiza je provedena na optičkom emisijskom spektrometru GDS 850A, LECO, slika 35. Analiziran je kemijski sastav osnovnog materijala i metala navara.

Dobiveni rezultati za kemijski sastav oba materijala prikazani su tablici 10.



Slika 35 Optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO [16]

Tablica 10 Kemijska analiza osnovnog materijala i zavara

	Masni udio elemenata, %							
	Pb	Sn	Mn	Fe	Ni	Al	Zn	Cu
Osnovni materijal	0,27	0,56	1,41	4,35	4,16	8,55	0,88	ostatak
Navar	<0,2	<0,2	1,73	1,81	2,47	8,36	<0,2	ostatak

Kada se uspoređi propisani kemijski sastav osnovnog materijala CuAl10Fe5Ni5 (tablica 11) sa rezultatima analize, vidljivo je da se u uzorku nalazi povišeni udio olova dok udio ostatka legiranih elemenata odgovara propisanom sastavu.

**Tablica 11 Propisani kemijski sastav legure CuAl10Fe5Ni5 [17]**

	Masni udio elemenata, %								
	Cu	Pb	Sn	Mn	Fe	Ni	Al	Zn	Ostalo
CuAl10Fe5Ni5	76,0-83,0	0,03 max	-	2,5 max	4,0-5,5	4,0-6,0	8,5-10,5	-	ostatak

Rezultati kemijske analize navara pokazuju da udio kemijskih elemenata odgovara kemijskom sastavu koji je normom propisan za standardnu žicu za zavarivanje. Propisani kemijski sastav prikazan je u tablici 12.

**Tablica 12 Propisani kemijski sastav CuAl8Ni2Fe2Mn2 [18]**

	Masni udio elemenata, %							
	Pb	Sn	Mn	Fe	Ni	Al	Zn	Cu
CuAl8Ni2Fe2Mn2	<0,02	<0,2	0,5-2,5	0,5-2,5	0,5-3,0	7,0-9,5	<0,2	ostatak

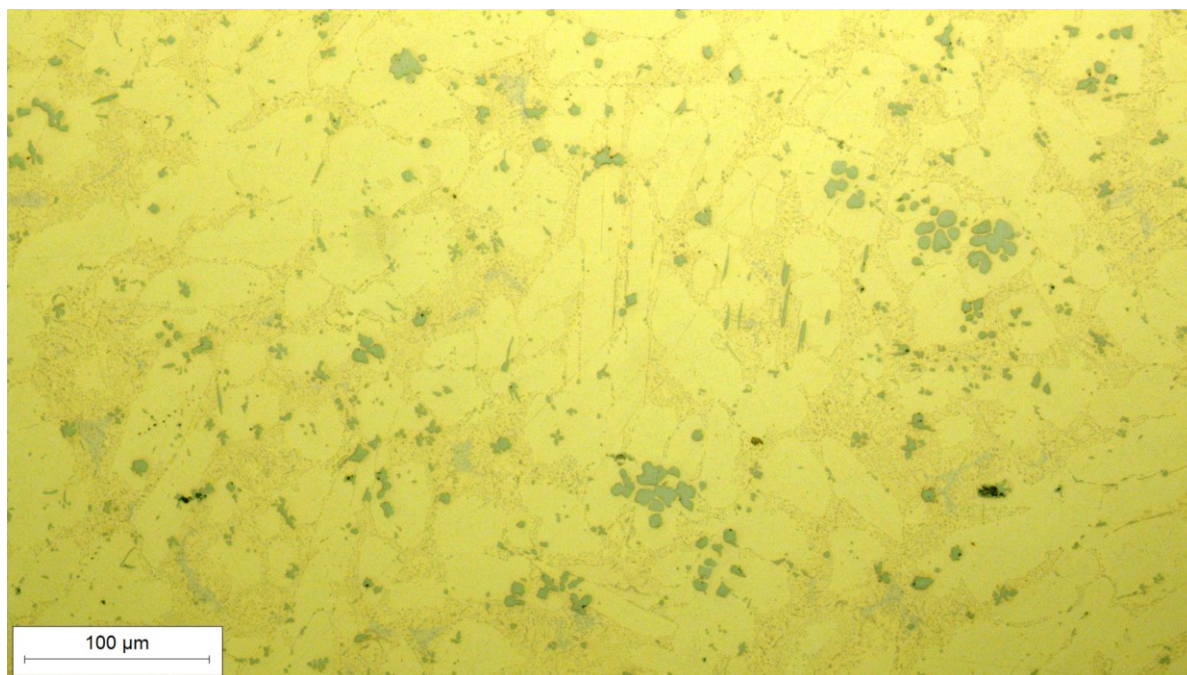
#### 4.5 Mikrostruktura uzorka

Mikrostruktura uzorka promatrana je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, u poliranom i nagriženom stanju. U osnovnom materijalu već i prije nagrižanja jasno se mogu vidjeti kristali mješanci  $\alpha$ -faze, eutektoidna zrna sačinjena od  $\alpha$ - i  $\gamma_2$ -faze te sitnih precipitata koji su prema literaturi vrlo vjerojatno takozvani  $\kappa$ -precipitati koji su obogaćeni željezom. Na slikama 36 i 37 vidi se opisana mikrostruktura u poliranom stanju.

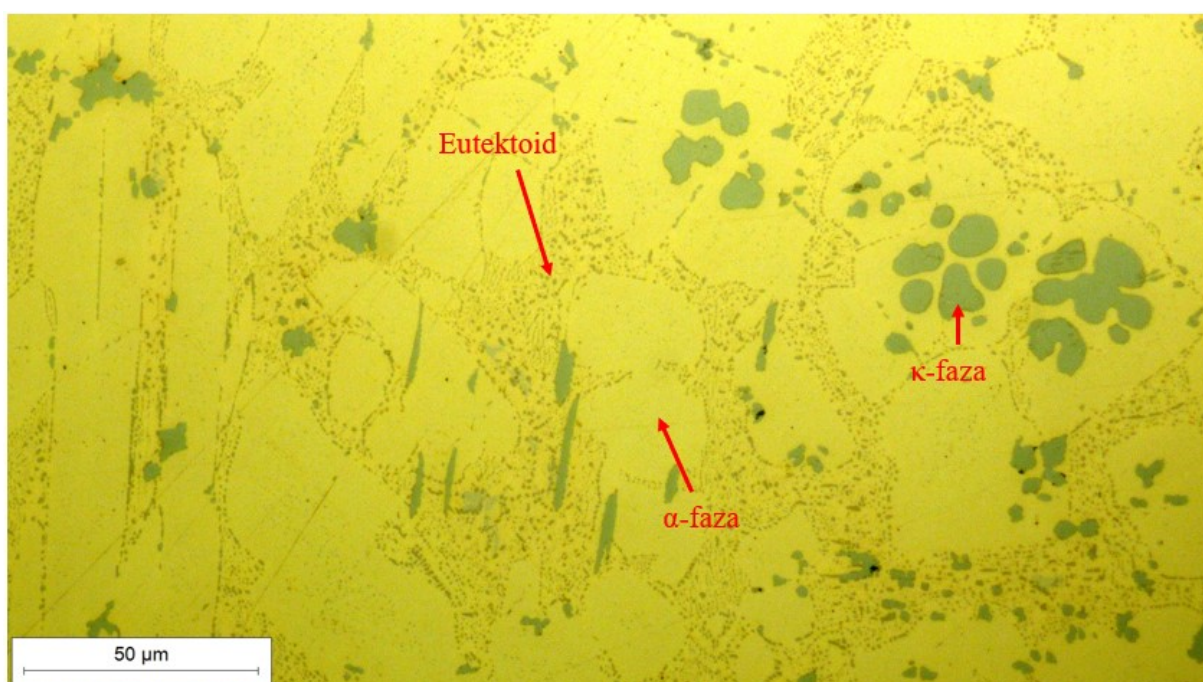
Na slici 38 prikazana je zona utjecaja topline u poliranom stanju gdje se može naslutiti linija staljivanja.

U navaru se, u poliranom stanju, ne može razlučiti mikrostruktura, ali se sporadično mogu vidjeti sitnije pore, što je i prikazano na slici 39.

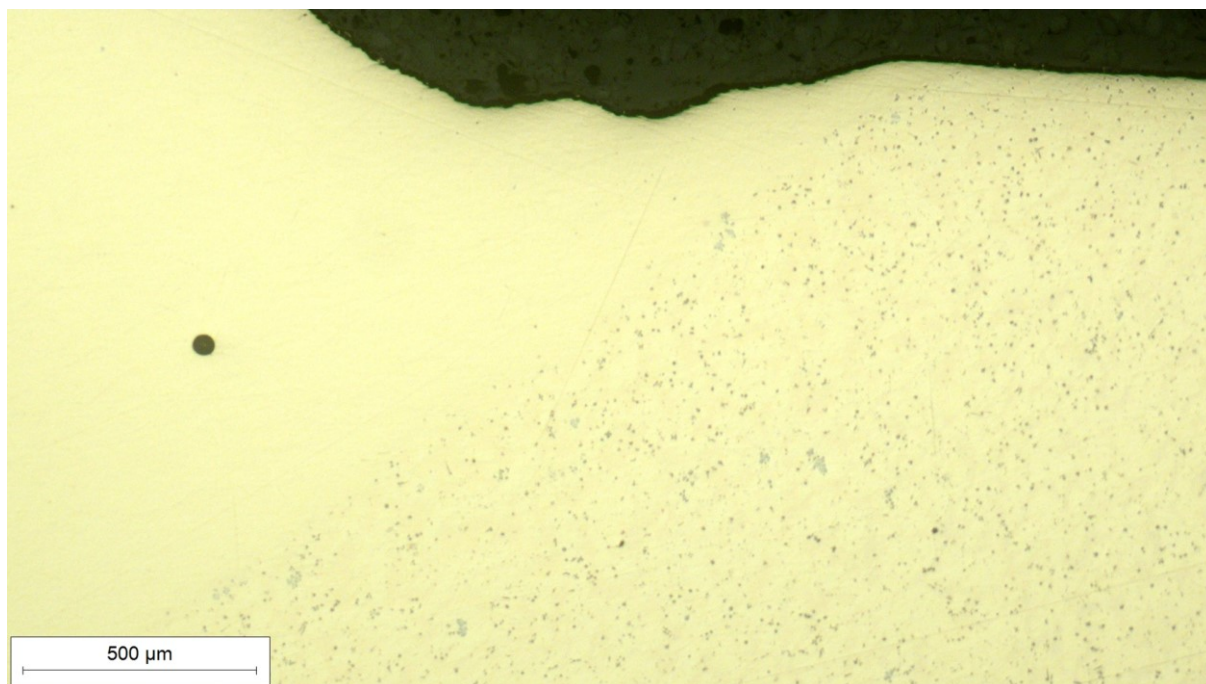




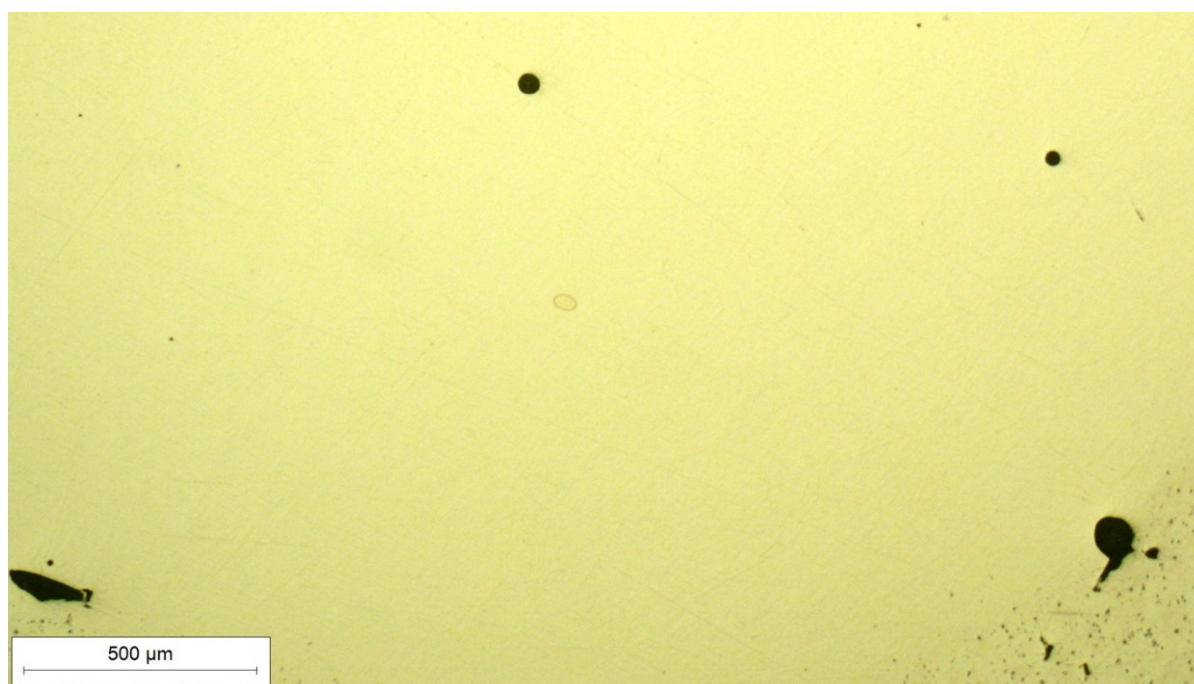
Slika 36 Osnovni materijal, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 200×)



Slika 37 Osnovni materijal, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 500×)

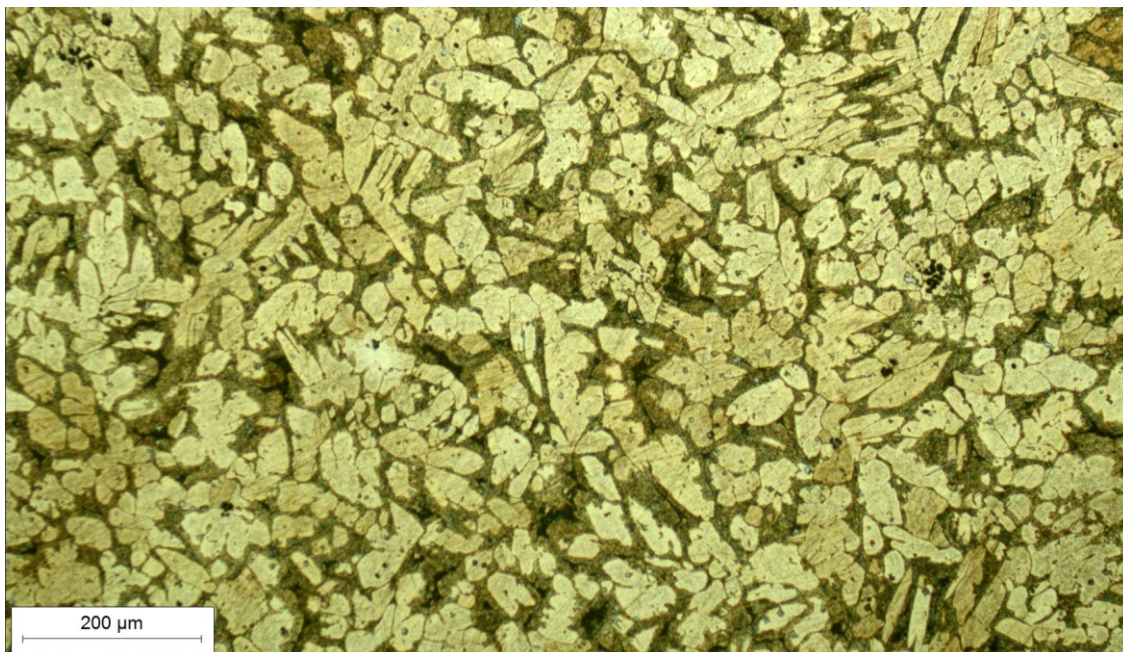


**Slika 38** Zona utjecaja topline, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 50×)

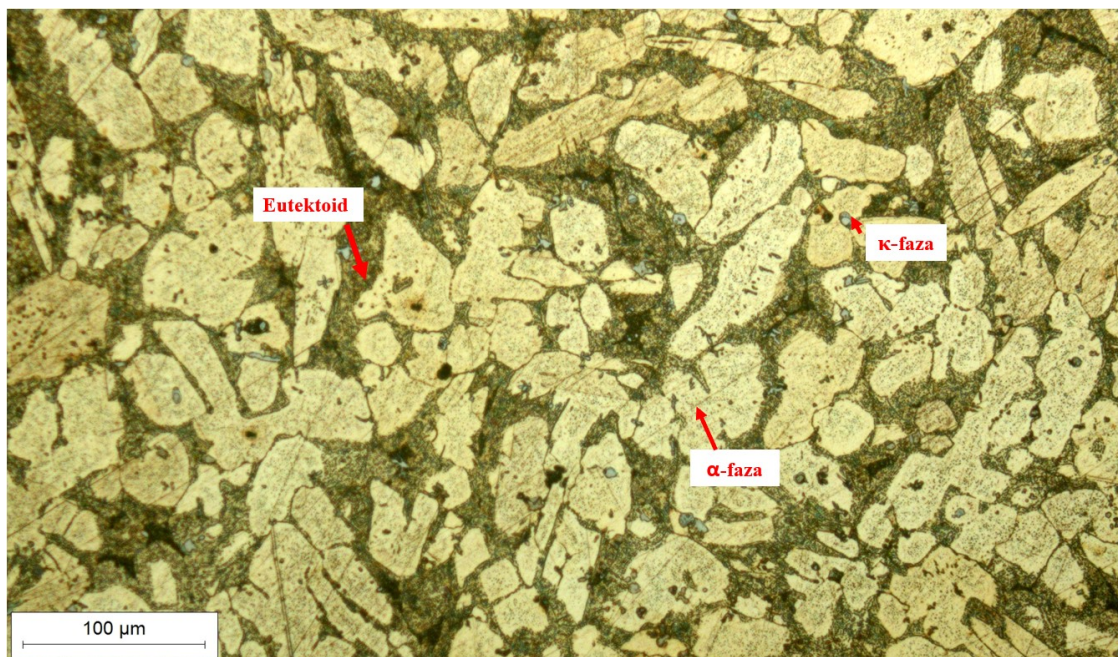


**Slika 39** Navar, polirano stanje (snimljeno pri povećanju 50×)

Iako je mikrostruktura osnovnog materijala vidljiva u poliranom stanju, mikrostruktura zone utjecaja topline i navara nije. Stoga je provedena analiza mikrostrukture u nagriženom stanju. U osnovnom materijalu pri većem povećanju jasno se vidi  $\alpha$ -faza i eutektoid te precipitati  $\kappa$ -faze (slika 40 i 41).



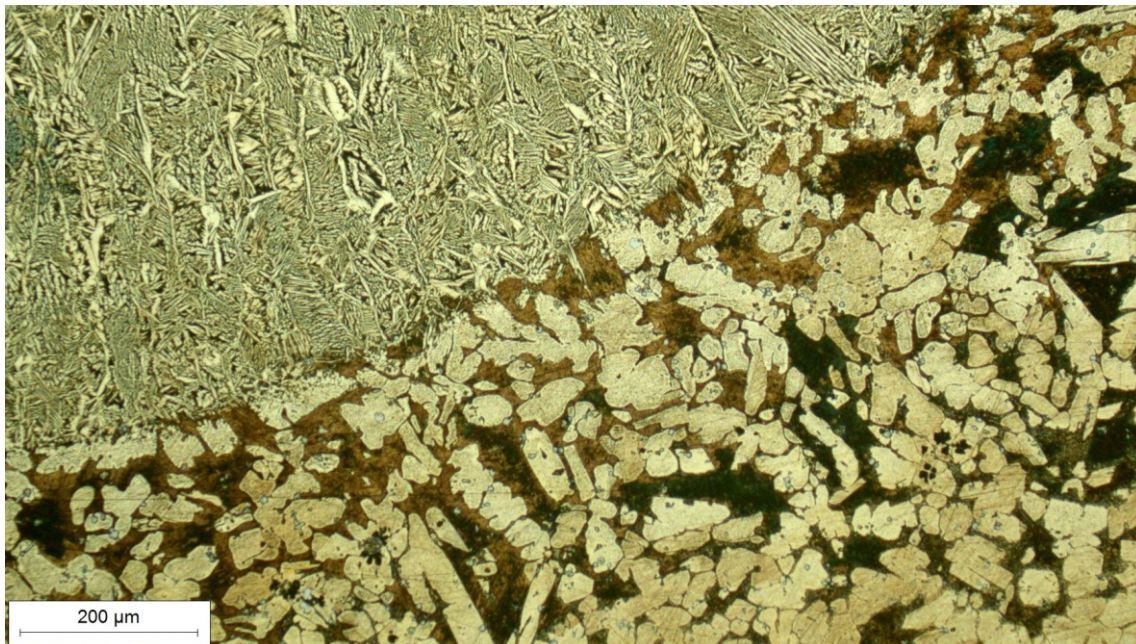
Slika 40 Osnovni materijal, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×)



Slika 41 Osnovni materijal, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 500×)

Na slici 42 vidi se područje zone utjecaja topline u nagriženom stanju. Linija staljivanja je jasno izražena, a jasno se vide mikrostruktura osnovnog materijala i mikrostruktura navara.

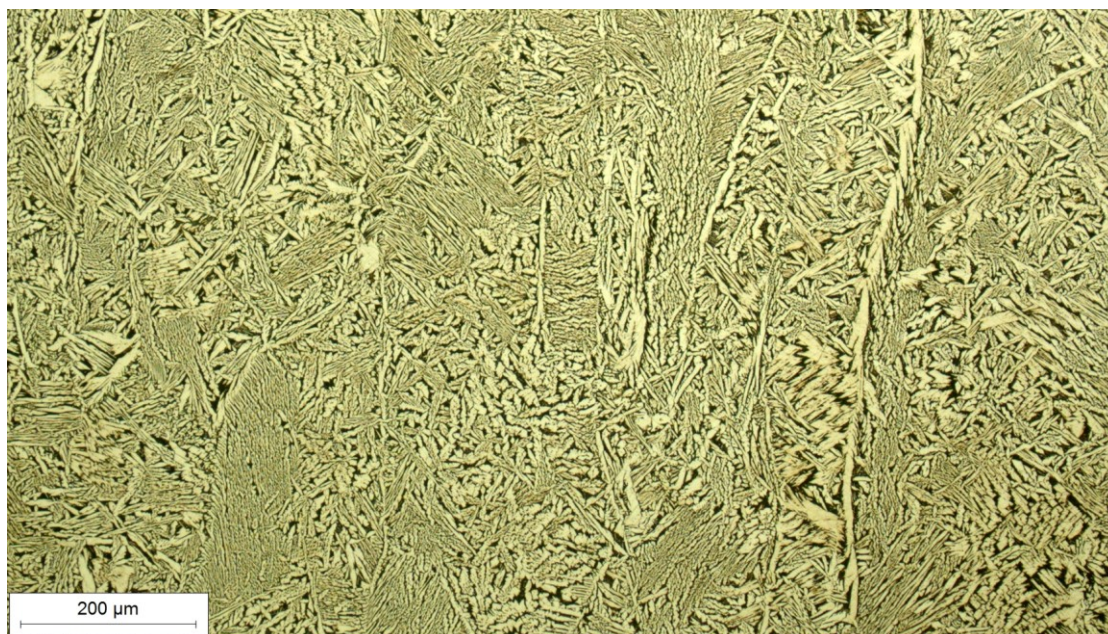
Metal navara ima tipičnu ljevačku, dendritnu, usmjerenu mikrostrukturu bez uočenih nepravilnosti. Na slikama 43, 44 i 45 prikazane su mikrostrukture triju navarenih slojeva. Nije uočena razlika u mikrostrukтури pojedinih slojeva.



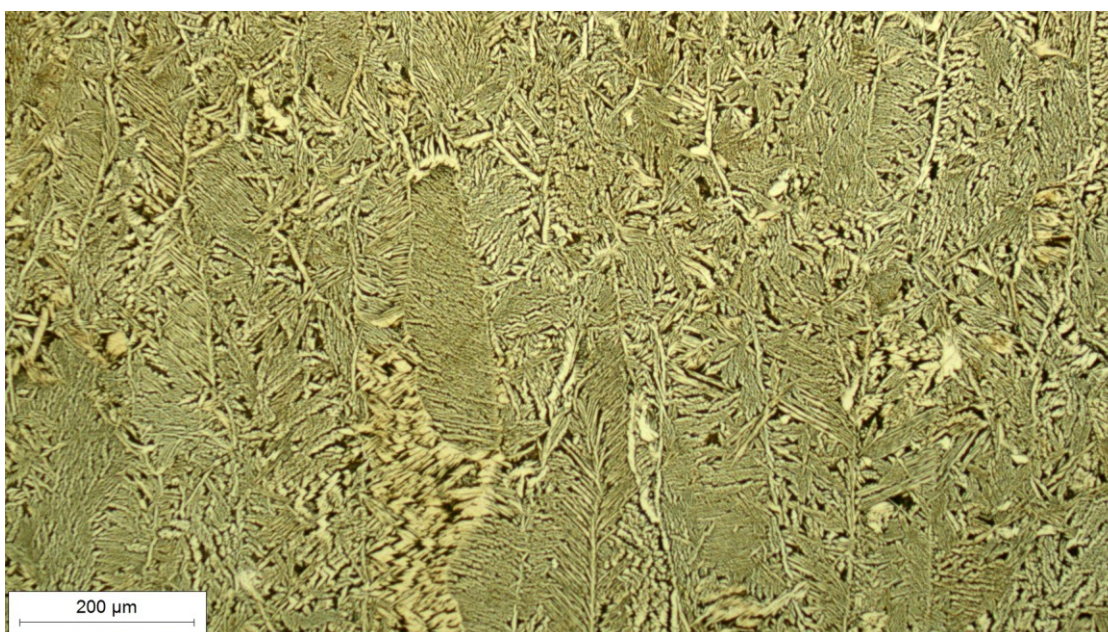
**Slika 42** Zona utjecaja topline, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×)



**Slika 43** Prvi sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×)



**Slika 44** Drugi sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×)



**Slika 45** Treći sloj navara, nagriženo stanje (snimljeno pri povećanju 100×)

#### 4.6 Savijanje uzorka

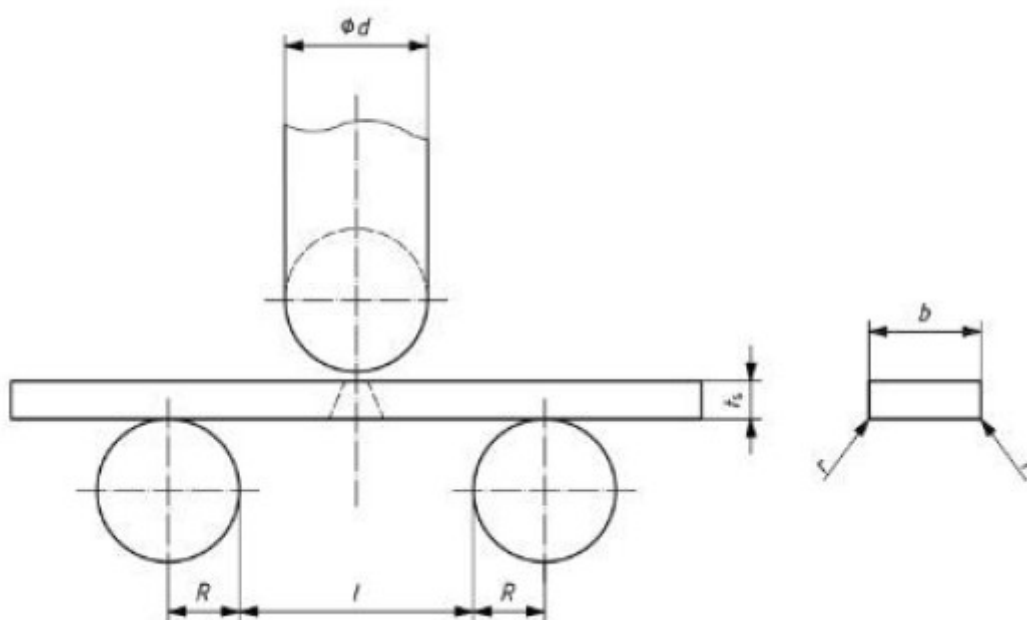
Uzorak je podvrgnut savijanju po normi HRN EN ISO 7438:2008. Norma zahtijeva da uzorak, prije nego što je podvrgnut ispitivanju, bude pripremljen na način da se ne utječe na osnovni materijal i metal navara. Nikakva naknadna toplinska obrada uzorka nije dopuštena osim ako je postojalo posebno odobrenje za to, ali treba biti zavedeno u testnoj dokumentaciji. Nakon što je uzorak za savijanje pripremljen određuje se metoda ispitivanja. Metode ispitivanja se dijele na dvije vrste:

- longitudinalno savijanje – savija se zavar po dužini
- transverzalno savijanje – zavar se nalazi u sredini ispitnog uzorka

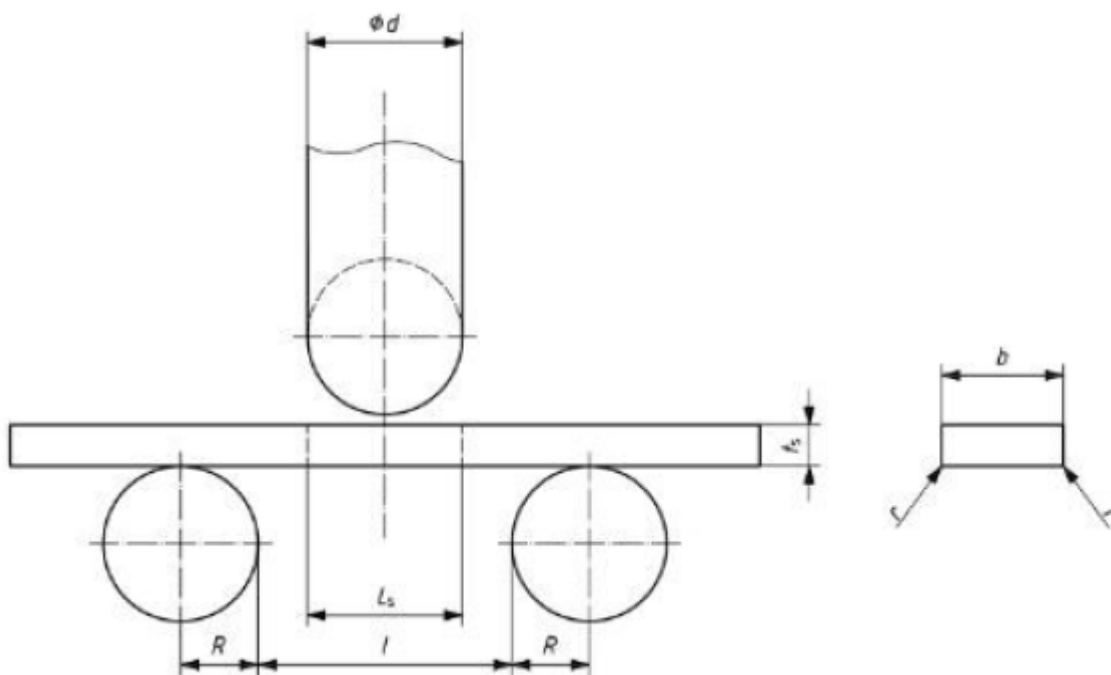
Još jedan bitan faktor ispitivanja je na koji dio zavara se primjenjuje sila:

- korijen zavara
- vrh zavara
- cijela površina zavara

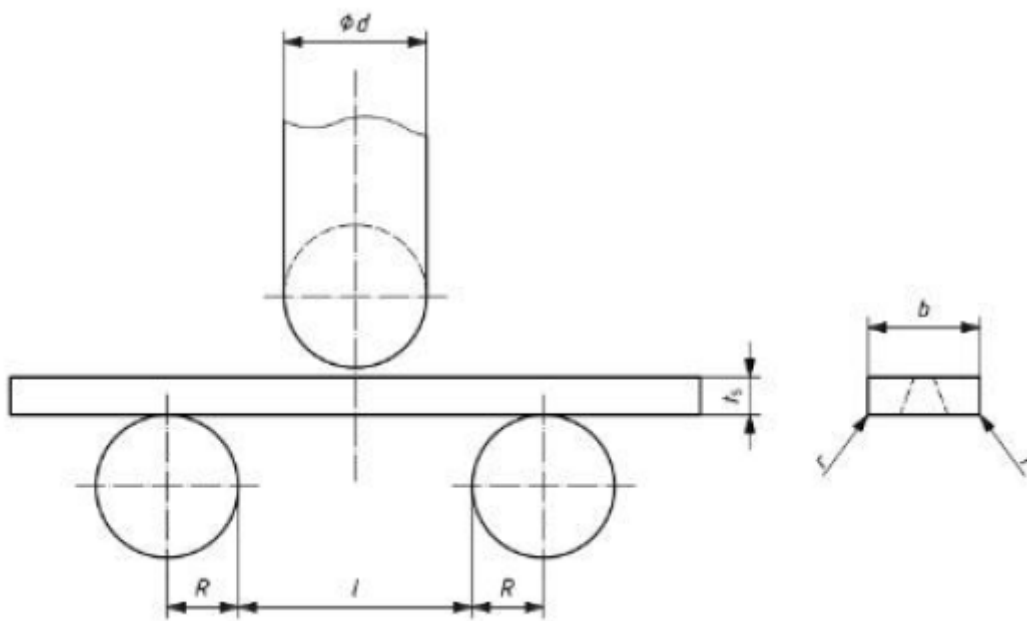
Na sljedećim slikama prikazane su sheme postavljanja uzorka za savijanje. Transverzalni test savijanja u vrhu ili korijenu shematski je prikazan na slici 46, transverzalni test savijanja po površini zavara vidi se na slici 47 i longitudinalni test savijanja u korijenu zavara na slici 48 [19].



Slika 46 Transverzalni test savijanja u vrhu ili korijenu [19]



Slika 47 Transverzalni test savijanja po površini zavara [19]

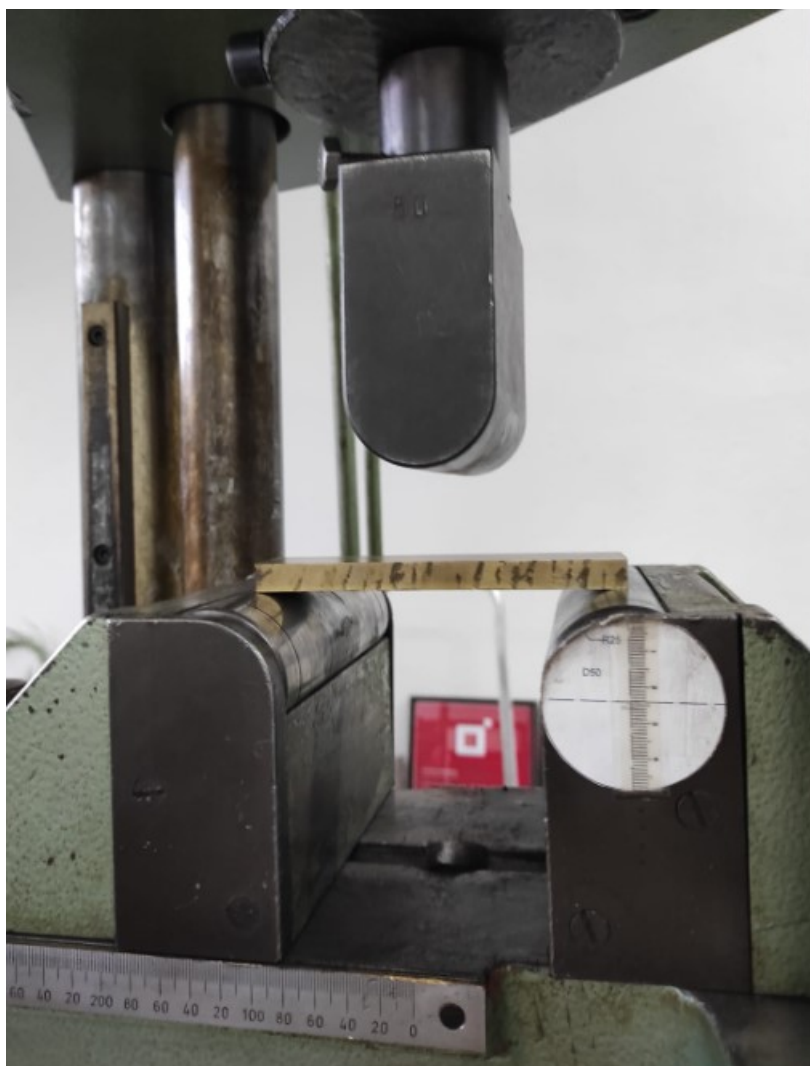


Slika 48 Longitudinalni test savijanja u korijenu zavara [19]

Svrha ispitivanja na savijanje je odrediti pri kojem kutu dolazi do pojave pukotina i koliko su te pukotine relevantne za primjenu.

#### 4.6.1 Provođenje savojnog ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na ispitnoj temperaturi od 18,3 °C, što je u rasponu koji je definiran normom i koji iznosi  $23 \pm 5$  °C [15]. Promjer trna preko kojeg djeluje savojna sila iznosi 50 mm, a razmak između oslonaca bio je 80 mm. Na slici 49 prikazan je uzorak postavljen na oslonce prije savijanja. Ispitivanje je provedeno u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o.



Slika 49 Ispitivanje savijanja

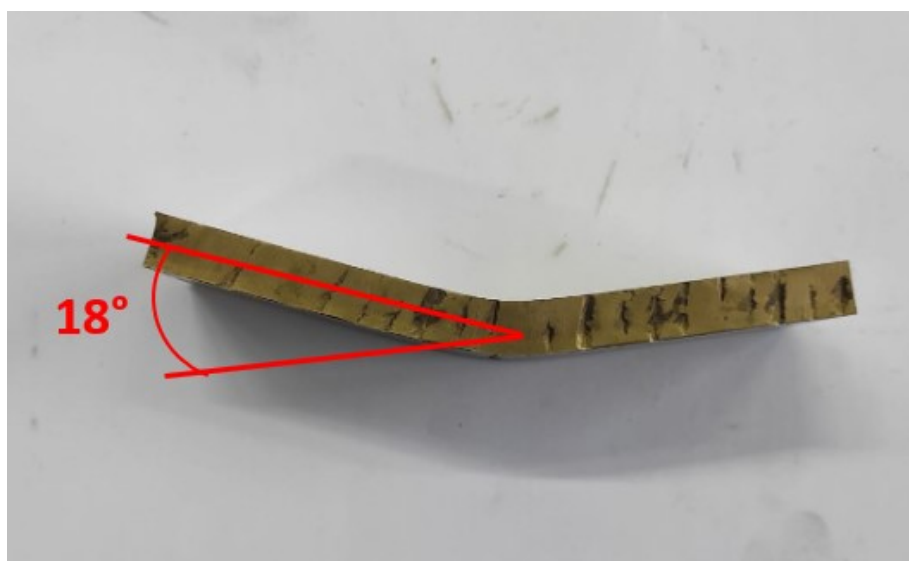
Uzorak nije dugo izdržao savijanje jer se nakon par sekundi pojavila pukotina i ispitivanje je prekinuto, slika 50. Zaključak ispitivanja je da su se prve pukotine veće od 3 mm pojavile već pri kutu savijanja od 18° po cijeloj dužini materijala. Na slici 51 vidi se uzorak nakon provedenog ispitivanja, a na slici 52 pukotina na površini savijenog uzorka. S obzirom na



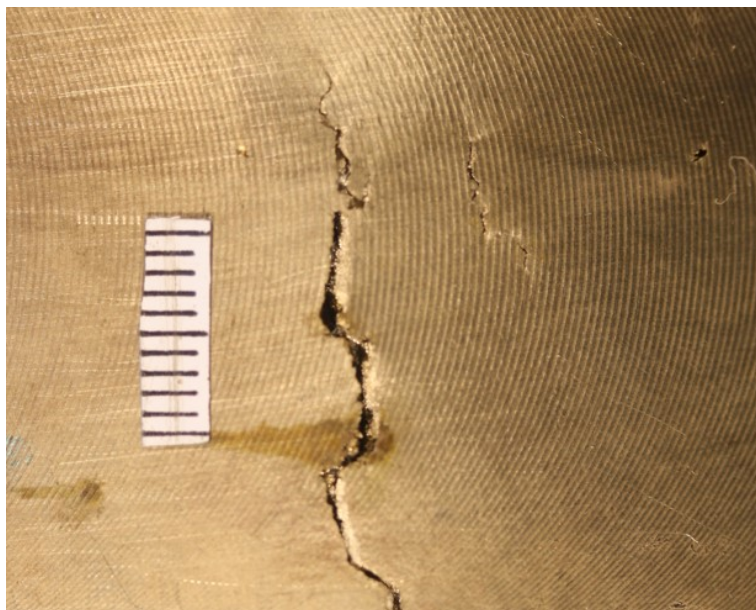
veličinu pukotina i na mali kut pri kojem su se pojavile, može se zaključiti da materijal nema veliku sposobnost savijanja.



**Slika 50** Pojava pukotine tijekom savijanja



**Slika 51** Uzorak nakon završetka ispitivanja



**Slika 52** Pukotina na površini uzorka za savijanje

#### 4.7 Ispitivanje tvrdoće

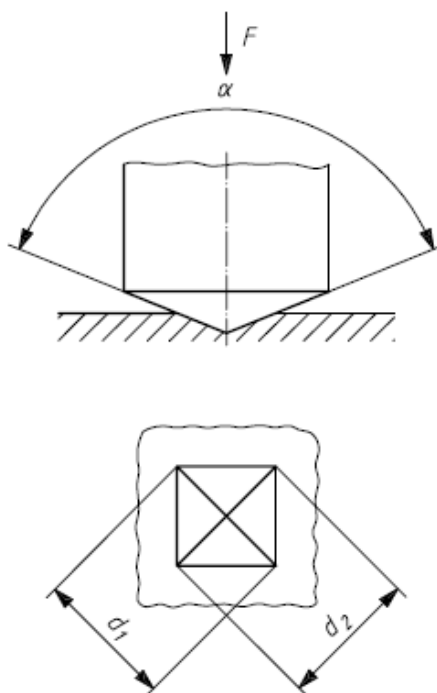
Ispitivanje tvrdoće provedeno je prema normi HRN EN ISO 6507 – 1:2008, metodom po Vickersu.

Tvrdoća po Vickersu se mjeri ovisno o rasponu sile koja se primjenjuje, a raspon sile i oznake koje se koriste prikazane su u tablici 13.

**Tablica 13 Raspon testne sile [20]**

Raspon sile, $F$ N	Oznaka tvrdoće
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV}5$
$1,961 \leq F < 49,03$	$\text{HV}0,2$ do $< \text{HV}5$
$0,09807 \leq F < 1,961$	$\text{HV}0,01$ do $< \text{HV}0,2$

Ispitivanje se provodi na način da se dijamanti utiskivač, koji je u obliku piramide s kvadratnom bazom i kutom od  $136^\circ$ , utisne u uzorak te se izmjeri dijagonalna udaljenost otiska, slika 53 [20].



**Slika 53 Osnovni princip Vickers metode [20]**

Nakon što se izmjeri udaljenost kroz formulu se dobije iznos tvrdoće:

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

gdje je:

$HV$  – oznaka za tvrdoću po Vickersu

$F$  – sila opterećenja, N

$d$  – aritmetička sredina dviju dijagonala, mm.

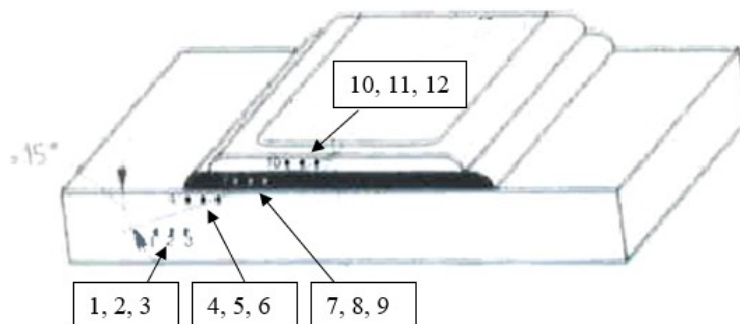
#### 4.7.1 Ispitivanje tvrdoće na osnovnom materijalu i navaru

Na osnovnom materijalu i navaru izmjerene su makrotvrdoća HV10 i mikrotvrdoća HV0,2. Ispitivanje tvrdoće HV10 provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o., na tvrdomjeru prikazanom na slici 54.



Slika 54 Uredaj za ispitivanje tvrdoće HV10

Napravljena su po tri mjerenja u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline, u prvom sloju navara i u drugom sloju navara. Na slici 55 vidi se raspored mjerenja tvrdoće HV10 na uzorku.



Slika 55 Raspored mjerenja tvrdoće HV10 na uzorku

Rezultati mjerenja i srednje vrijednosti tvrdoće HV10 u pojedinim područjima prikazani su tablici 14. Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u zoni utjecaja topline (220 HV10), a najmanje u drugom sloju navara (177 HV10). Osnovni materijal i prvi sloj navara imaju podjednaku tvrdoću (191 HV10).

Tablica 14 Rezultati ispitivanja HV10

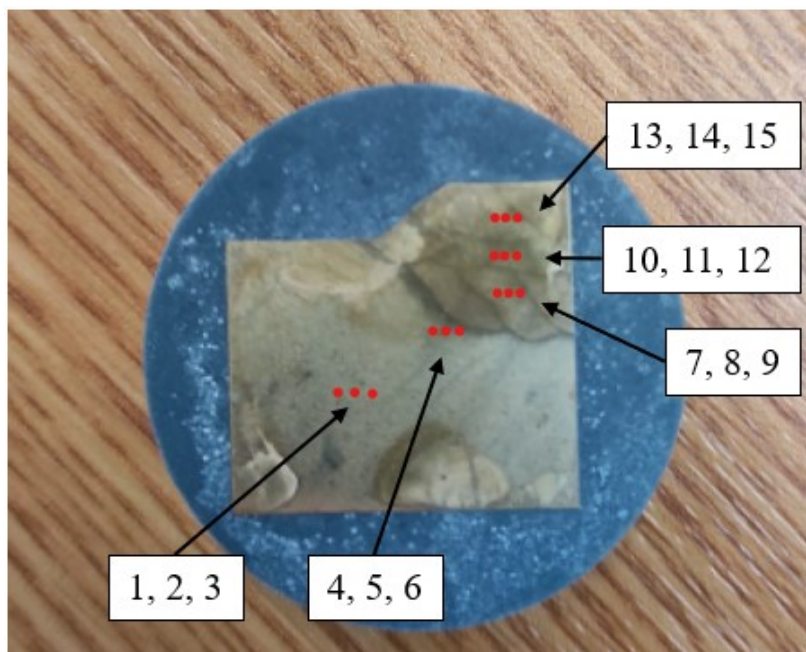
Broj mjerenja	Područje mjerenja	Tvrdoća HV10	
			$\bar{x}$
1	osnovni materijal	187	191
2		193	
3		193	
4	ZUT	220	220
5		220	
6		220	
7	prvi sloj navara	187	191
8		193	
9		193	
10	drugi sloj navara	176	177
11		176	
12		178	

Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na uređaju PMT, prikazanom na slici 56. Po tri mjerenja napravljena su u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline te u prvom, drugom i trećem navarenom sloju.

Na slici 57 vidi se raspored mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 na metalografskom uzorku.



Slika 56 Uređaj za ispitivanje tvrdoće HV0,2



Slika 57 Mjesta ispitivanja tvrdoće na uzorku

Rezultati mjerenja i srednje vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u pojedinim područjima prikazani su u tablici 15. Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u zoni utjecaja topline (216 HV0,2), a najmanje u trećem sloju navara (155 HV0,2). Osnovni materijal (196 HV0,2) i prvi sloj navara (195 HV0,2) imaju podjednaku tvrdoću, dok nešto nižu tvrdoću ima drugi sloj navara (180 HV0,2).

**Tablica 15      Rezultati ispitivanja HV0,2**

Broj mjerenja	Područje mjerenja	Tvrdoća, HV0,2	
			$\bar{x}$
1	osnovni materijal	196	196
2		193	
3		199	
4	ZUT	216	216
5		221	
6		212	
7	prvi sloj navara	191	195
8		202	
9		193	
10	drugi sloj navara	176	180
11		183	
12		181	
13	treći sloj navara	163	155
14		150	
15		151	

## 5. Zaključak

Na temelju rezultata dobivenih pri karakterizaciji navara od aluminijske bronce na osnovnom materijalu od legure CuAlNi, a koja je uključivala analizu kemijskog sastava, analizu mikrostrukture i ispitivanja mehaničkih svojstava, može se zaključiti sljedeće:

- Kemijski sastav osnovnog materijala CuAl10Fe5Ni5 i materijala navara CuAl8Ni2Fe2Mn2 odgovara propisanom kemijskom sastavu od strane proizvođača.
- U mikrostrukтури osnovnog materijala jasno je vidljiva  $\alpha$ -faza i eutektoid te precipitati  $\kappa$ -faze. Linija staljivanja je jasno izražena, a područje zone utjecaja topline je relativno usko i bez vidljivih nepravilnosti. Mikrostruktura metala navara ima tipičnu ljevačku, dendritnu usmjerenu mikrostrukturu bez uočenih nepravilnosti.
- Osnovni materijal i metal navara nemaju veliku sposobnost savijanja s obzirom na veličinu pukotina i na mali kut savijanja pri kojem su pukotine nastale.
- Srednja vrijednost mikrotvrdoće osnovnog materijala iznosi 196 HV<sub>0,2</sub>. Slična mikrotvrdoća izmjerena je i u prvom navarenom sloju, a mikrotvrdoća u drugom i trećem navarenom sloju postupno se smanjuje (180 HV<sub>0,2</sub> i 155 HV<sub>0,2</sub>). Najviše vrijednosti mikrotvrdoće HV<sub>0,2</sub> izmjerene su u zoni utjecaja topline (216 HV<sub>0,2</sub>).
- Vrijednosti makrotvrdoće HV<sub>10</sub> u osnovnom materijalu i navarenim slojevima slične su vrijednostima dobivenim pri mjerenju mikrotvrdoće HV<sub>0,2</sub>.

Prema svemu navedenom kvaliteta navara je zadovoljavajuća, unatoč slabim rezultatima kod savojnog ispitivanja, ukoliko područje navara tijekom eksploatacije neće biti savojno opterećeno.



## LITERATURA

- [1] Tao, X.P., Zhang S., Wu C.L., Zhang C.H., Zhang J.B., Liu Y., Thermal stability and corrosion resistance in a novel nickel aluminum bronze coating by laser cladding, *Material research express*, Vol 5, issue 11, 2018
- [2] <https://www.westermans.com/blog/description-of-the-weld-clad-overlay-process/> - dostupno 27.11.2022
- [3] Collini L., editor: *Copper Alloys-Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes*. InTech, 2012.
- [4] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. : *Svojstva i primjena materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] <https://www.themorgan.org/exhibitions/founding-figures> - dostupno 18.9.2022
- [6] Kumar Jha S., Balakumar D., Palachamy R. : EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER AND BRASS BASED ALLOYS, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* – June 2015
- [7] T. Filetin: BAKAR I BAKROVE LEGURE (Tema 2.21), IWE tečaj, FSB, Zavod za materijale
- [8] <http://www.bronzebearingcompany.com/en/product/fb090/> - dostupno 13.11.2022
- [9] Hajek J., Križ A., Chocholatý O., Pakula D. : Effect of heat treatment of microstructural changes in aluminium bronze, *Arch. Metall. Mater.*, Vol. 61 (2016), No 3, p. 1271 - 1276
- [10] Cuplan E.A., Rose G. : Microstructural characterization of cast nickel aluminium bronze, *Journal of materials science* 13 (1978) 1647-1657
- [11] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/widmanstätten-structure> - dostupno 18.11.2022
- [12] Copper Development Association: *Aluminium Bronze Alloys for Industry*, CDA Publication No 83, 1986
- [13] Mičian M., Konar R. : Repairs of Damaged Castings Made of Graphitic Cast Iron by Means of Brazing, *Archives of foundry engineering* Vol. 17 (2017), Issue: 3, p. 91-96

- 
- [14] <https://www.aalco.co.uk/literature/files/aalco-copper-brass-bronze.pdf> - dostupno 18.11.2022
- [15] Tomljanović M.: Instrumentalne kemijske metode, U.G.Hijatus, Zenica, 2000
- [16] <https://www.leco.com/product/gds850> - dostupno 20.11.2022
- [17] <https://www.awfraser.co.nz/AWFraser/files/9d/9d135b9a-439e-4b53-9698-79722c785585.pdf> - dostupno 22.11.2022
- [18] <https://portal.totalmateria.com/en/search/quick/materials/3262046/composition> - dostupno 22.11.2022
- [19] ISO Standard: Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests, ISO 5173:2009
- [20] ISO Standard: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method (ISO 6507-1:2008)