

# Određivanje parametara žarenja legure mjedi u svrhu postizanja visoke deformabilnosti

---

Zorić, Kristian

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:235:406140>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported / Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Kristian Zorić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr.sc. Božidar Matijević, dipl. ing.

Student:

Kristian Zorić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Božidaru Matijeviću na stručnoj pomoći, utrošenom vremenu i trudu tijekom izrade ovog rada.

Hvala svim profesorima, asistentima i ostalim djelatnicima fakulteta na prenesenom znanju tijekom cjelokupnog studija.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom cijelog studija.

Kristian Zorić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Zorić Kristian**

Mat. br.: 0035213367

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje parametara žarenja legure mjedi u svrhu postizanja visoke deformabilnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of annealing parameters of brass alloy to achieve high deformability**

Opis zadatka:

Legure mjedi uz dobra korozivna svojstva imaju također i dobra mehanička svojstva. Primjenjuju se u različitim slučajevima kao konstrukcijski elementi. Veoma česta primjena mjedi je za izradu proizvoda plastičnom deformacijom, najčešće dubokim vučenjem. U inozemnoj literaturi te legure se nazivaju „catridge brass“. Prilikom plastične deformacije dolazi do očvrnuća legure što otežava daljnju plastičnu deformaciju a u nekim slučajevima čak i pojave pukotina. Kako se u ponekim slučajevima primjene postavlja zahtjev odgovarajuće deformabilnosti legure to se postiže toplinskom obradom žarenja.

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati mjedi (sastav, namjenu, primjere primjene) a u eksperimentalnom dijelu rada na uzorcima mjedi potrebno je provesti toplinsku obradu uzoraka te odrediti parametre toplinske obrade kod koje se postiže najbolja deformabilnost. Uspješnost provedene toplinske obrade potvrditi analizom mikrostrukture te mehaničkih svojstava uzoraka.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Datum predaje rada:

**1. rok:** 18 veljače 2021.

**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.

**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 22.2. – 26.2.2021.

**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.

**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	7
2. BAKAR I BAKRENE LEGURE.....	8
2.1 Svojstva i primjena mjedi .....	10
2.2 Proizvodnja mjedi [6] .....	12
2.3 Vrste mjedi .....	13
2.3.1 Alfa mjedi.....	13
2.3.2 Alfa-beta mjedi.....	14
2.3.3 Beta mjedi .....	15
2.3.4 „Patron mesing“ [11].....	15
3. ŽARENJE.....	17
3.1 Žarenje mjedi .....	17
3.2 Vakuumska peć [13].....	19
3.2.1 Konstrukcija vakuumske peći .....	19
3.2.2 Grijaći materijali koji se koriste u vakuumskim pećima.....	20
3.2.3 Princip rada vakuumske peći.....	20
3.2.4 Funkcije vakuumske peći .....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	22
4.1 Cilj rada .....	22
4.2 Materijali za ispitivanje .....	22
4.3 Provođenje ispitivanja .....	24

4.3.1	Toplinska obrada mjedenih uzoraka u vakuumskoj peći .....	24
4.3.2	Metalografska ispitivanja mjedenih uzoraka.....	25
4.3.3	Analiza mikrostrukture.....	28
4.3.4	Mjerenje mikrotvrdoće HV0,1 .....	30
4.4	Rezultati provedenih ispitivanja .....	33
ZAKLJUČAK .....		34
LITERATURA.....		35

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Različiti strojni dijelovi od mjedi [12].....	7
Slika 2.	Bakrene legure: a) Nikal-srebrna legura [16], b) Bakar-nikalna legura [17], c) Berilijev bakar [18] .....	10
Slika 3.	Mjedeni predmeti sa izraženim slojem patine [19].....	11
Slika 4.	Mjedene gredice [20] (lijevo) i ploče [21] (desno) .....	12
Slika 5.	Mikrostruktura $\alpha$ – mjedi [22] .....	14
Slika 6.	Mikrostruktura $(\alpha+\beta)$ – mjedi [23].....	15
Slika 7.	Patrone načinjene od mesinga 70-30 [24].....	16
Slika 8.	Utjecaj temperature žarenja na čvrstoću mjedi [25] .....	18
Slika 9.	Komora vakuumske peći [26].....	20
Slika 10.	Vakuumska peć za lemljenje pri visokim temperaturama [27].....	21
Slika 11.	Osnovni uzorak od mjedene legure CuZn20.....	23
Slika 12.	Uzorak žaren na 750 °C (2), 850 °C (3) i 900 °C (4).....	23
Slika 13.	Vakuumska peć VFC25 (Proizvođač: IpsenGmbH, Njemačka).....	24
Slika 14.	Osnovni i 3 žarena uzorka u očvrstoj polimernoj smjesi .....	25
Slika 15.	Laboratorijski uređaj za brušenje Minitex 233.....	26
Slika 16.	Uređaj za poliranje Struers Pedemin .....	26
Slika 17.	Digestor .....	27
Slika 18.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	27
Slika 19.	Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 200x .....	28
Slika 20.	Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 500x .....	28
Slika 21.	Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 1000x .....	29
Slika 22.	Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće Tukon 2100B.....	30
Slika 23.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzoraka .....	32



**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Osnovna svojstva bakra, bakrovih legura, aluminija i čelika [15] .....	8
Tablica 2.	Kemijski sastav legure mjedi oznake CuZn20 [28] .....	22
Tablica 3.	Svojstva legure mjedi oznake CuZn20 [29] .....	22
Tablica 4.	Materijali nad kojima su vršena ispitivanja.....	23
Tablica 5.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 1 .....	30
Tablica 6.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 2 .....	31
Tablica 7.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 3 .....	31
Tablica 8.	Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 4 .....	31
Tablica 9.	Ispitivanje stlačivanja i progiba uzorka 3.....	33
Tablica 10.	Ispitivanje stlačivanja i progiba uzorka 4.....	33

## **SAŽETAK**

Mjedi su legure bakra i cinka koje mogu sadržavati i manje količine drugih metala. Zbog dobrih mehaničkih svojstava, lake obradivosti i otpornosti na koroziju mjedi imaju vrlo široku primjenu. U prošlosti, legure mjedi su se masovno proizvodile u vojnoj industriji za izradu streljiva, najčešće za izradu čahura raznih kalibara. U današnje se vrijeme od njih najviše izrađuju limovi, cijevi i šipke koje se koriste u građevinarstvu i strojogradnji. U teorijskom dijelu rada opisan je sastav i namjena mjedi, uz primjere njegove primjene. U eksperimentalnome dijelu ovog rada mjedeni uzorci su podvrgnuti toplinskoj obradi žarenjem, te su određeni parametri toplinske obrade kod koje se postizala najviša deformabilnost. Nakon provedene toplinske obrade, uspješnost postupka je potvrđena analizom mikrostrukture i mehaničkih svojstava uzoraka.

Ključne riječi: mjed, toplinska obrada žarenjem, visoka deformabilnost

## **SUMMARY**

Brass is an alloy of copper and zinc with small amount of other alloying metals (in some cases). Due to brass good mechanical properties, easy machinability and corrosion resistance brass have a very wide applications. Brass alloys used to be widely used in the military industry in the production of ammunition, most commonly for making cartridge cases of different calibers. Nowadays, they are most used for sheets, pipes and rods used in construction and mechanical engineering. The theoretical part of the paper describes the composition and implications of brass alloys, with examples of its application. In the experimental part, samples were subjected to annealing heat treatment with the purpose of finding optimal parameters at which the highest deformability can be achieved. After the heat treatment, the success of the procedure was analysed by the microstructure and mechanical properties of the samples.

Key words: brass, annealing heat treatment, high deformability

## 1. UVOD

Mjedi su naziv za skupinu lijevanih i kovanih bakrenih legura s različitim kombinacijama svojstava. Izrađene su od bakra i cinka, a sadržavaju i manji udio drugih elemenata. Olovo je uobičajeni dodatak mjedi koji povećava njegovu obradivost, te se olovni mesing uzima kao standard po kojem se procjenjuje obradivost ostalih materijala. Dostupan je u vrlo širokom rasponu oblika i veličina kako bi se omogućila minimalna obrada do krajnjih dimenzija. Mjed ne postaje lomljiv na niskim temperaturama poput ugljičnog čelika, te je nemagnetan.[1,2]

Jedno od najvažnijih svojstava mjedi je njegova toplinska vodljivost, što ga čini prvim izborom za izmjenjivače topline (radijatore). Tamo gdje visoka električna vodljivost čistog bakra nije potrebna, kovane ili lijevane mjedene komponente pružaju isplativo rješenje za električne kontakte i terminale (Slika 1.).[2]

Valjanje i naknadno žarenje su najčešći postupci izrade mjedenih limova. Naknadnim žarenjem omogućava se rekristalizacija kojom se dobiva željena veličina zrna i svojstva. Također, žarenjem se mogu vratiti formabilnost i duktilnost mjedi, svojstva koja se gube tijekom postupka hladnog valjanja.[3]



Slika 1. Različiti strojni dijelovi od mjedi [12]

## 2. BAKAR I BAKRENE LEGURE

Bakar i legure bakra nude niz beskonačno reciklirajućih materijala pružajući mnoštvo kombinacija svojstava prilagođenih širokom spektru primjena koje olakšavaju i poboljšavaju svakodnevni život. Učinak bakra se može proširiti legiranjem tako da odgovara mnogim industrijskim primjenama. Dobra električna i toplinska vodljivost, čvrstoća, duktilnost i izvrsna otpornost na koroziju samo su neka svojstva koja bakar i njegove legure nude. Legure bakra grupirane su u nekoliko skupina ovisno o njihovom sastavu. Postoji više od 400 bakrenih legura, svaka s jedinstvenom kombinacijom sastava, koja odgovara mnogim primjenama, proizvodnim procesima i okruženjima. [2]

Čisti bakar ima najbolju električnu i toplinsku vodljivost od bilo kojeg komercijalnog metala. Međutim, u elementarnom stanju bakar je vrlo mekan i niske čvrstoće. Stoga se radi poboljšanja tvrdoće i čvrstoće, a bez previše smanjenja električne vodljivosti, bakru dodaju sitni dodaci legirajućih elemenata poput srebra, kositra, željeza i fosfora. Primjer za to je legura bakra i srebra koja se koristi za nadzemne žice vodiča na elektrificiranim tračnicama. Danas se više od polovice proizvedenog bakra koristi u električnim i elektroničkim primjenama, što dovodi do prikladne klasifikacije bakra na električni i neelektrični. [1,2]

**Tablica 1. Osnovna svojstva bakra, bakrovih legura, aluminija i čelika [15]**

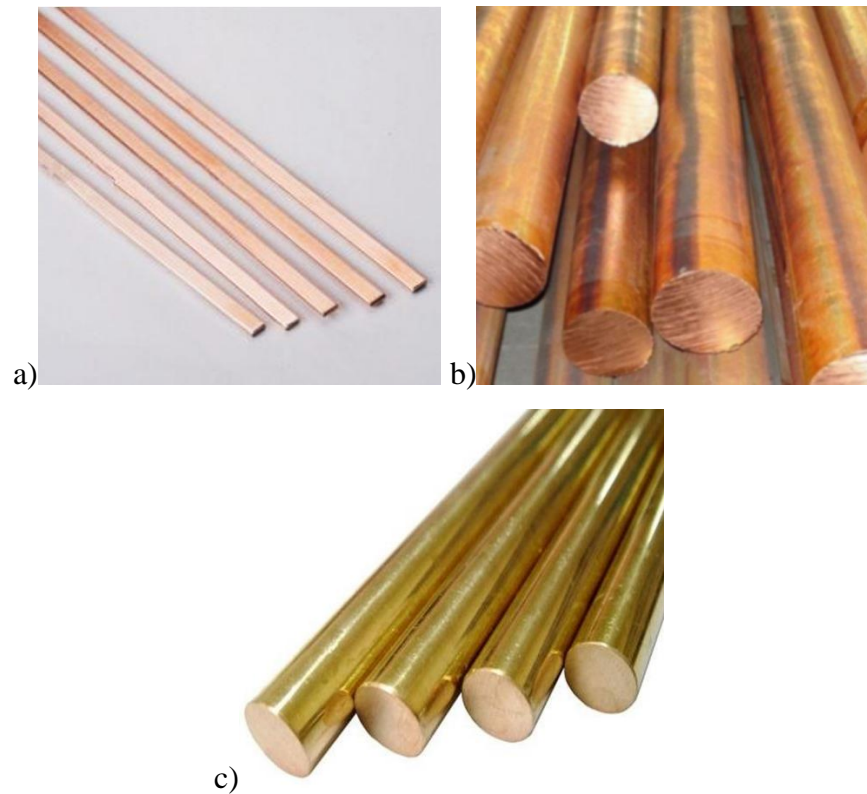
Materijal	Toplinska vodljivost, $W/mK$	Električna vodljivost, $m/\Omega mm^2$	Modul elastičnosti, $GPa$	Vlačna čvrstoća, $MPa$	Tvrdoća, $HV$
bakar	385	58	110	210	50
mjed	150	16	106	430	65
bronca	85	7	112	490	171
aluminij	237	37	68	310	15
niskougljični čelik	17	1	193	505	129
ugljični čelik	54	5	203	987	265

Usporedimo li svojstva mjedi sa nekim drugim materijalima, često korištenim u strojogradnji, možemo vidjeti kako mjed uistinu jest najbolji izbor za izmjenjivače topline. Iako srodni mu bakar, u čistom stanju, ima najvišu toplinsku vodljivost od svih materijala, nema široku komercijalnu primjenu. Razlog tome je njegova cijena, ali i lošija mehanička svojstva. Međutim, legiranjem bakra sa kositrom da dobijemo broncu, odnosno cinkom za dobivanje mjedi, njegova primjena se uvelike proširuje. Iz Tablica 1. je vidljivo kako su materijali na bazi bakra bolji vodiči topline i elektriciteta, odnosno boljih fizikalnih svojstava od čelika, te da mjed i bronca čak mogu parirati niskougljičnom čeliku u kategoriji tvrdooće i vlačne čvrstoće.

Pošto su u Tablica 1. uzete samo prosječne vrijednosti iz nešto šireg raspona, ova tablica služi samo kao referenca za okvirnu usporedbu. Vrijednosti variraju ovisno o kemijskom sastavu, temperaturi, vrsti obrade i stanju ispitivanog materijala.

Bakar oblikuje legure jednostavnije od većine metala i sa širokim rasponom legirajućih elemenata daje sljedeće legure [2]:

- **Mjed** je naziv za niz bakreno-cinkovih legura s različitim kombinacijama svojstava, uključujući čvrstoću, obradivost, duktilnost, otpornost na habanje, tvrdoću i dr. (Slika 1.)
- **Brončane legure** izrađene su od bakra i kositra i prve su razvijene prije cca. 4000 godina. Bile su toliko važne da su dovele do vremenskog razdoblja nazvanog brončano doba.
- **Bakar-nikalne legure** (Slika 2.b) imaju visoku toplinsku vodljivost, te su otporne na koroziju uzrokovanu morskom vodom. Dodatak nikla bakru poboljšava čvrstoću i otpornost na koroziju, a zadržava se dobra duktilnost.
- **Nikal-srebrne legure** (Slika 2.a) izrađene su od bakra nikla i cinka i mogu se smatrati posebnim mjedima. Imaju atraktivan srebrnasti izgled, a ne tipičnu mesinganu boju.
- **Berilijev bakar** (Slika 2.c) je najtvrđa i najčvršća legura bakra, u potpuno toplinski obrađenom i hladno obrađenom stanju. Po mehaničkim svojstvima sličan je mnogim legiranim čelicima visoke čvrstoće, ali u usporedbi s čelicima ima bolju otpornost na koroziju.



Slika 2. Bakrene legure: a) Nikal-srebrna legura [16], b) Bakar-nikalna legura [17], c) Berilijev bakar [18]

## 2.1 Svojstva i primjena mjedi

Ove metalne legure bakra i cinka, u kojima je bakar glavni element, imaju najrasprostranjeniju primjenu od svih bakrovih legura. Zahvaljujući svojstvima poput dobre toplinske i električne vodljivosti, otpornosti na koroziju i dobrim mehaničkim karakteristikama, mjed svoju primjenu nalazi u različitim granama struke. Koristi se u građevinarstvu za cijevi, limove i plinovode, u strojarstvu i strojogradnji za izradu brava, zupčanika, ležajeva, ventila, itd. [1,3,4]

Zbog privlačne boje mjed se još od antike koristio kao dekorativni materijal. Mjed često ima izgled svijetlog zlata, međutim, može biti i crvenkasto-zlatno ili srebrno-bijelo. Veći postotak bakra daje ružičastu nijansu, dok povećanje udjela cinka čini leguru srebrnom. Rimljani su koristili mjedi kod izrade šljemova, jer su bili lakši od čeličnih. U to je vrijeme bilo teško izraditi leguru mjedi zbog relativno visokog tališta cinka od 420 °C. To je otežavalo postupak legiranja sve do 18.-og stoljeća. Do tada se mjed proizvodio u loncu miješanjem mljevene cinkove rude sa bakrom. U loncu bi para cinka prodirala u bakar, što bi rezultiralo mesingom. Rimska legura mjedi sastojala se od 20% cinka i 80% bakra, što je i dan danas sastav za kojim postoji velika potražnja. [5]

Točna svojstva mjedi ovise o sastavu mjedene slitine, posebno omjeru bakar-cink. Općenito su sve mjedi cijenjene zbog svoje obradivosti i lakoće s kojom se metal može oblikovati u željene oblike i forme uz zadržavanje visoke čvrstoće. Iako postoje razlike između mjedi s visokim i niskim udjelom cinka, sve mjedi smatraju se oblikovljivima i duktilnima, tim više što je udio cinka manji. Zbog niskog tališta, mjed se također može relativno lako lijevati. Međutim, za aplikacije lijevanja obično se daje prednost visokom sadržaju cinka. [6]

Mjedi sa manjim udjelom cinka lako je obrađivati hladnim postupkom, zavarivati i lemiti. Visok sadržaj bakra također omogućuje metalu da na svojoj površini tvori zaštitni oksidni sloj (patinu) koji štiti od daljnje korozije, što je dragocjeno svojstvo u primjenama koje metal izlažu vlazi i vremenskim utjecajima, a može se vidjeti na Slika 3. [6]

Metal ima dobru toplinsku i električnu vodljivost (električna vodljivost može biti od 23% do 44% od čistog bakra), otporan je na habanje i iskrenje. Poput bakra, njegova su bakteriostatska svojstva rezultirala uporabom u kupaonskim uređajima i zdravstvenim ustanovama. Mjed se smatra legurom slabog trenja i nemagnetskim metalom, dok su njegova akustična svojstva rezultirala uporabom u mnogim glazbenim instrumentima „limene glazbe“. Umjetnici i arhitekti cijene estetska svojstva metala, jer se može proizvoditi u rasponu boja, od tamnocrvene do zlatno žute. [6]



Slika 3. Mjedeni predmeti sa izraženim slojem patine [19]



## 2.2 Proizvodnja mjedi [6]

Mjed se najčešće proizvodi od otpadnog bakra i cinkovih ingota. Otpadni bakar odabire se na temelju njegovih nečistoća, jer su potrebni određeni dodatni elementi kako bi se dobila točna vrsta mjedi koja je potrebna.

Budući da cink počinje kipjeti i isparavati na 907 °C, ispod temperature taljenja bakra (1083 °C), bakar se prvo mora rastaliti. Jednom rastopljen, cink se dodaje u omjeru koji odgovara stupnju proizvedenog mesinga. Iako se još uvijek uzimaju u obzir gubici cinka do isparavanja. U ovom trenutku, bilo koji drugi metali poput olova, aluminijska, silicija ili arsena, dodaju se u smjesu kako bi se stvorila željena legura. Nakon što je rastaljena legura spremna, ulijeva se u kalupe gdje se skrutne u velike ploče ili gredice.



Slika 4. Mjedene gredice [20] (lijevo) i ploče [21] (desno)

Gredice – najčešće od  $(\alpha+\beta)$ -mjedi – mogu se izravno preraditi u žice ili cijevi vrućim istiskivanjem, što uključuje provlačenje zagrijanog metala kroz matricu ili vruće kovanje. Ako se ne istisnu ili iskuju, gredice se zatim ponovo zagrijavaju i provode kroz čelične valjke. Taj se postupak naziva vruće valjanje. Rezultat vrućeg valjanja su ploče debljine do 13 milimetara. Nakon hlađenja, mesing se zatim obrađuje pomoću glodalice ili skalpera, koji režu tanki sloj od metala kako bi se uklonili nedostaci na površinskom lijevanju i oksid.

U plinskoj atmosferi, radi sprječavanja oksidacije, legura se ponovno zagrijava i valja, postupak poznat pod nazivom žarenje, prije nego što se ponovo kotrlja na hladnijim temperaturama (hladno valjanje) na ploče debljine oko 2,5 milimetara. Postupak hladnog valjanja deformira unutarnju strukturu zrna mjedi rezultirajući puno čvršćim i tvrđim metalom. Ovaj se korak može ponavljati dok se ne postigne željena debljina ili tvrdoća.

Konačno, limovi se pile i sijeku kako bi se postigla potrebna širina i duljina. Svi limovi, lijevani, kovani i ekstrudirani mjedeni materijali dobivaju kemijsku kupku, obično napravljenu od klorovodične i sumporne kiseline, za uklanjanje kamenca crnog bakrenog oksida i mrlja.

## 2.3 Vrste mjedi

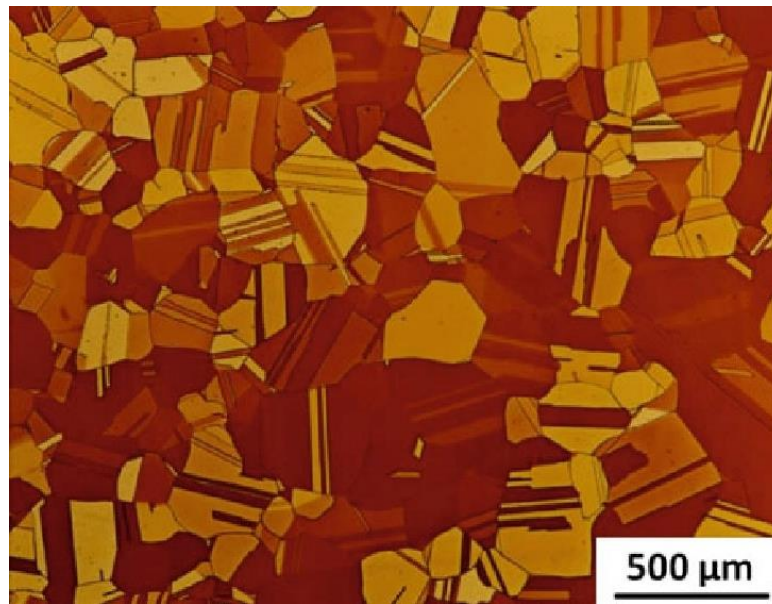
„Mjed“ je generički pojam koji se odnosi na širok raspon bakreno-cinkovih legura. Zapravo, postoji više od 60 različitih vrsta mjedi utvrđenih prema EN (European Norm) standardima. Te legure mogu imati širok raspon različitih sastava, ovisno o svojstvima potrebnim za određenu primjenu. Mjedi se također mogu klasificirati na razne načine, uključujući njihova mehanička svojstva, kristalnu strukturu, sadržaj cinka i boju. [7]

Bitna razlika između različitih vrsta mjedi određena je njihovom kristalnom strukturom. To je zato što kombinaciju bakra i cinka karakterizira peritektičko skrućivanje, što govori da komponente imaju veliku razliku u temperaturama tališta. Također, ova dva elementa imaju i različite atomske strukture zbog čega se kombiniraju na jedinstvene načine, ovisno o omjeru sadržaja i temperaturama. Kao posljedica ovih čimbenika mogu nastati tri različite vrste kristalne strukture [1]:

- $\alpha$ -mjedi
- $(\alpha+\beta)$ -mjedi
- $\beta$ -mjedi

### 2.3.1 Alfa mjedi

$\alpha$ -mjed sadrži manje od 37% cinka otopljenog u bakru. Kristalna struktura ovih mjedi je plošno centrirana kubična (FCC) rešetka koja se može oblikovati hladnim postupkom. Ime je dobio zbog stvaranja homogene (alfa) kristalne strukture (Slika 5.). Alfa kristalna struktura nastaje kad se cink otapa u bakru tvoreći čvrstu otopinu jednolikog sastava. Takve su mjedi mekše i duktilnije od drugih vrsta i stoga ih je lakše hladiti, zavarivati, valjati, vući, savijati ili lemiti. Najčešća vrsta alfa mesinga sadrži 30% cinka i 70% bakra. Nazvana mesingom „70/30“ ili „patron mesing“ (UNS legura C26000), ova mesingana legura ima idealnu kombinaciju čvrstoće i duktilnosti za hladno vučenje. Također, ima veću otpornost na koroziju od mesinga s većim udjelom cinka. Alfa legure se obično koriste za proizvodnju predmeta kao što su klinovi, vijci, izmjenjivači topline, pričvršćivači, zakovice, kao i za opružne kontakte u električnim utičnicama. [7,8]



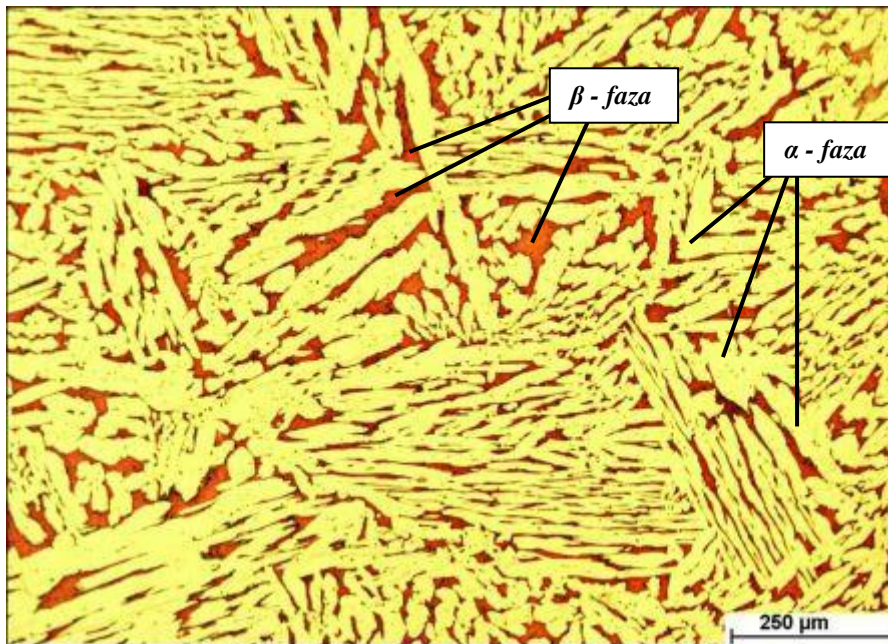
Slika 5. Mikrostruktura  $\alpha$  – mjedi [22]

### 2.3.2 Alfa-beta mjedi

$(\alpha+\beta)$ -mjedi – poznate i kao „duplex mjed“ ili „toplo obrađene mjedi“ – sadrže između 37-45% cinka. Sastoje se od alfa i beta zrnastih struktura prikazanih na Slika 6., a odnos između alfa i beta faze određuje se sadržajem cinka. Uključivanje elemenata poput aluminija, silicija ili kositra također može povećati količinu mesinga beta faze prisutnog u leguri.  $(\alpha+\beta)$ -mjedi imaju veću tvrdoću i čvrstoću, te manju duktilnost od  $\alpha$ -mjedi. Ove mjedi su i jeftinije od  $\alpha$ -mjedi zbog većeg sadržaja cinka u leguri. [7,8]

Kod  $(\alpha+\beta)$ -mjedi može nastupiti vrsta korozije koja se naziva „korozija cinka“, odnosno „otcinkavanje“. Ovaj tip korozije nastaje u vodenim otopinama uz lokalnu koroziju. Elektrokemijski potencijal, napredovanjem otapanja cinka i bakra, pomiče se na graničnoj površini metala i otopine. Time nastaju uvjeti uz koje se ponovno taloži plemenitiji bakar, a  $\beta$ -faza, koja je manje plemenita, korodira. [1]

Iako su na sobnoj temperaturi lošije obradivi od  $\alpha$ -mjedi,  $(\alpha+\beta)$ -mjedi su znatno obradivi pri visokim temperaturama. Čak i kada je olovo prisutno radi poboljšanja obradivosti, takve mjedi su otporne na pucanje. Kao rezultat,  $(\alpha+\beta)$ -mesing se obično vruće obrađuje ekstruzijom, štancanjem ili lijevanjem.  $(\alpha+\beta)$ -mjedi pogodni su za upotrebu u proizvodnji šarki, plinskih uređaja, radijatorskih ventila, slavina i cjevovoda. [7,8]



Slika 6. Mikrostruktura ( $\alpha+\beta$ ) – mjedi [23]

### 2.3.3 Beta mjedi

Iako se puno rjeđe koriste od  $\alpha$ -mjedi ili ( $\alpha+\beta$ )-mjedi,  $\beta$ -mjedi čine treću skupinu slitine koja sadrži više od 45% sadržaja cinka. Takve mesinge tvore kristalne  $\beta$  strukture koje su tvrđe i čvršće i od  $\alpha$ -mjedi i od ( $\alpha+\beta$ )-mjedi. Kao takvi mogu biti samo vruće obrađeni ili lijevani. Ove mjedi imaju prostorno centriranu kubičnu (BCC) rešetku. Najčešće se koriste za izradu odljevaka za dijelove složenih oblika, slavine za vodu, ukrasne fontane te replikaciju antičkih i arhitektonskih obilježja. [7,8]

### 2.3.4 „Patron mesing“ [11]

„Patron mesing“ je podvrsta  $\alpha$ -mjedi koja sadrži oko 30% masenog udjela cinka, zbog čega se u literaturi često naziva i 70-30 mesing. Jednostavan je za proizvesti i ekonomski isplativ, pošto cink košta manje od bakra. Ovaj najpopularniji mesing ima atraktivna svojstva za stezaljke, opruge, prekidače, kontakte i druge dijelove konektora. To je ujedno i najrasprostranjenija bakrena legura u obliku trake potrebna za utiskivanje komponenata konektora.

Kao što joj i samo ime govori, „patron mesing“ se koristio i koristi se još uvijek za patrone za streljivo (Slika 7.). Koristi se i za brojne električne primjene kao što su sklopke i utičnice. Postoji najmanje šesnaest različitih mjedi, sa sadržajem cinka u rasponu od 5% do 39%. Od njih su legure koje sadrže 5, 15 i 30% cinka najpopularnije za elektroničke primjene.

Za razliku od kategorizacije kristalne strukture, identifikiranje mjedenih legura po njihovim svojstvima omogućuje nam razmatranje učinka legiranja metala na mesing. Utjecaj legirnih elemenata je slijedeći [1]:

- *Aluminij* se dodaje za povećanje čvrstoće, dok istezljivost ostaje nepromijenjena. Na površini mjedi nastaje oksidni sloj koji štiti leguru od oksidacije. Dodavanjem 2% aluminija, mjed se štiti od oksidacije na povišenim temperaturama.
- *Nikal* povećava otpornost na koroziju, čvrstoću i djeluje na usitnjenje zrna pri žarenju.
- *Željezo* povećava čvrstoću tako što usitnjuje zrno.
- *Mangan* povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi i vodenoj pari, solima i kiselinama. Uz sadržaj mangana do 4%, čvrstoća mjedi raste bez promjene žilavosti. Više od 4% mangana u leguri, smanjuje se istezljivost i žilavost.
- *Silicij* povećava žitkost kod zavarivanja stvaranjem topljive troske i smanjuje zaostala naprezanja.
- *Kositar* povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi. Pri udjelu do 1% povećava čvrstoću bez smanjenja istezljivosti



Slika 7. Patrone načinjene od mesinga 70-30 [24]

### 3. ŽARENJE

Žarenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od sporog zagrijavanja materijala do određene temperature, držanja na toj temperaturi te polaganog hlađenja do temperature okoline. Ovisno o temperaturi na kojoj držimo zagrijani obradak, postupke žarenja dijelimo u dvije glavne skupine: žarenja I. i žarenja II. vrste. Granica koja dijeli postupke I. i II. vrste je temperatura  $A_1$ . Svako žarenje na temperaturi ispod  $A_1$  spada u postupke I. vrste, dok se za postupke koji zahtijevaju višu temperaturu zagrijavanja kaže da su II. vrste. Stoga u postupke žarenja I. vrste ubrajamo sferoidizacijsko (meko) žarenje, rekristalizacijsko žarenje i žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. Postupci žarenja II. vrste su normalizacijsko žarenje, žarenje na grubo zrno i homogenizacijsko žarenje. Svaki od navedenih postupaka ima točno određenu svrhu djelovanja na materijal i propisan je u određenom temperaturnom pojasu.

#### 3.1 Žarenje mjedi

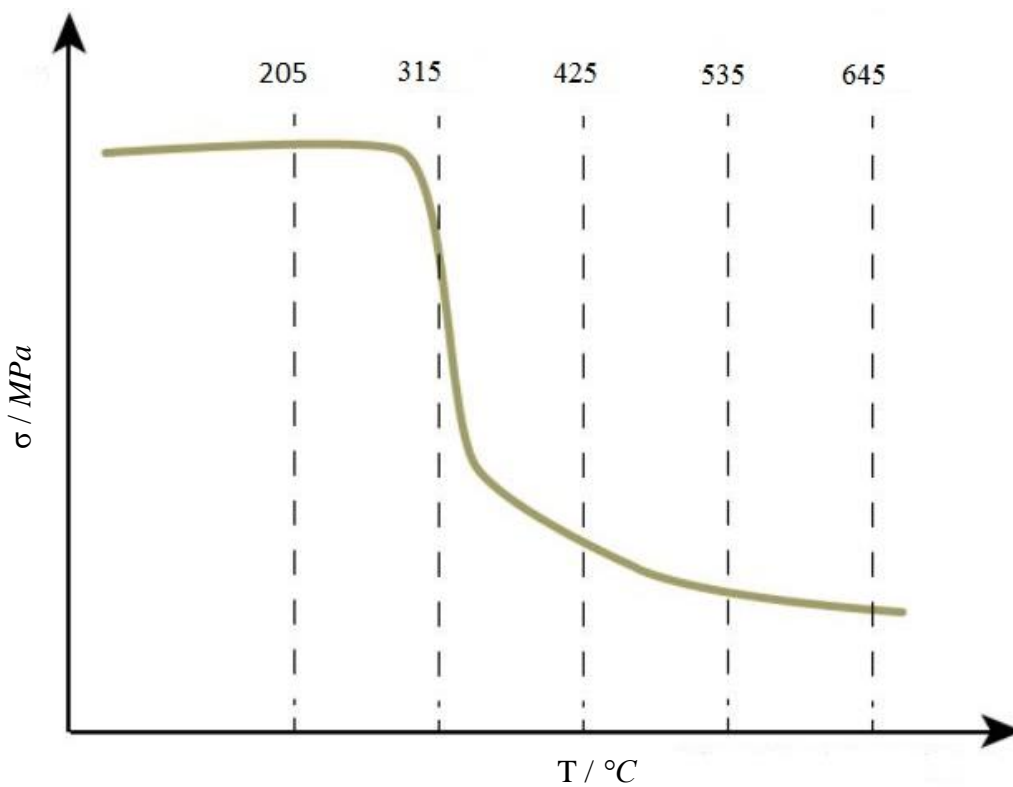
Mjed će, kao i većina metala, ponovljivom uporabom postati „stvrdnut“, odnosno postajati će sve tvrdi i otporniji na obradu. Ovo se svojstvo osobito razmatra u balistici. Mjedene patrone, opetovanim pucanjem i punjenjem mijenjaju svojstva, do mjere da se u komori mogu razdvojiti, umjesto da se prošire. To dovodi do nedosljednosti pri ponovnom punjenju. Slično kao lim od čelika – ako se dovoljno puta savije naprijed-nazad, metal će na kraju puknuti. Takav slučaj je izrazito opasan kada govorimo o kontroliranoj eksploziji koja se događa vrlo blizu ljudskog tijela. [9]

Žarenje mjedi je postupak „pomlađivanja“ mjedi koji rezultira produljenjem vijeka mjedi i povećanjem njegove postojanosti. To je u osnovi smanjivanje napetosti u mesingu. Žarenje se odvija kratko vrijeme na visokim temperaturama. Za razliku od kaljenja, žarenje ne zahtjeva gašenje materijala nakon zagrijavanja. Kaljenjem se metal, najčešće čelik, spušta na nižu temperaturu i nastoji stvrdnuti metale, dok ih žarenje omekšava. Nakon što se struktura mesinga transformira, postupak je gotov i neovisan o naknadnoj brzini ohlađivanja. Žarenje na temperaturi ispod one propisane za određeni materijal neće dovesti do stvarne promjene u metalu, dok se pretjeranim žarenjem riskira omekšavanje metala. Zbog toga se žarenju mjedi za streljivo potreban veliki oprez, jer se radi o usmjeravanju, upravljanju i eksploziji. [9,10]

Ako se toplina primijeni na radno otvrdnuto područje mesinga, energija te topline uzrokovat će rast zrna metala. Kako se to događa, materijal gubi čvrstoću, postaje mekši i vraća toleranciju na istezanje bez lomljenja. To je potpuno reverzibilan postupak. Koliko točno i kada se to događa ovisi o materijalu, primijenjenoj temperaturi i vremenu kojem je metal izložen toj

temperaturi. Za patronu od mesinga, transformacija je brza, robusna i odvija se na približno 315-420 °C, što je uočljivo na Slika 8. U slučaju primjene više temperature, mjed će omekšati, ali ne drastično. Na slici je prikazan utjecaj temperature žarenja na čvrstoću mjedi. Važno je napomenuti da su na slici podaci za vrijeme žarenja od 1 sata. Temperature potrebne za brže žarenje biti će nešto više, tako da je u stvarnosti kritična temperatura viša nego što je prikazano na slici. [9,10]

Za pojam žarenja mjedi za streljivo, ključno je razumjeti da se radi o žarenju vrata patrone. Ostatak patrone je otvrdnut tijekom proizvodnje i namjerno ostavljen na taj način. Mora biti dovoljno čvrst da zadrži pritiske pucanja, a žarenje bilo kojeg dijela patrone, osim vrata, potencijalno je opasno. Stoga se streljivo od mesinga nikako ne smije žariti u peći, već drugim metodama, poput plamenika ili induktivnog grijača koji toplinu primjenjuje lokalno samo na područje vrata. [10]



Slika 8. Utjecaj temperature žarenja na čvrstoću mjedi [25]

### 3.2 Vakuumska peć [13]

Vakuumska peć je vrsta peći koja može zagrijati materijale, uglavnom metale, do vrlo visokih temperatura i izvesti procese kao što su lemljenje, sinteriranje, te toplinsku obradu visoke konzistencije sa niskom kontaminacijom. U vakuumskoj je peći proizvod okružen vakuumom. Odsutnost zraka ili drugih plinova sprječava prijenos topline s proizvodom putem konvekcije i uklanja izvor onečišćenja. Neke od prednosti vakuumske peći su:

- Temperatura se može kontrolirati na malom području
- Nisko onečišćenje proizvoda ugljikom, kisikom i drugim plinovima
- Brzo hlađenje (gašenje) proizvoda
- Proces se može kontrolirati računalom kako bi se osigurala metalurška ponovljivost

Zagrijavanje metala na visoke temperature obično uzrokuje brzu oksidaciju, što je nepoželjno. Vakuumska peć uklanja kisik i sprječava da se to dogodi.

Inertni plin, poput argona, obično se koristi za brzo hlađenje obrađenog metala natrag na nemetalurške razine nakon željenog procesa u peći. Ovaj inertni plin može biti pod tlakom do dva puta više od atmosfere, a zatim cirkulirati kroz područje vruće zone kako bi pokupio toplinu prije nego što prođe kroz izmjenjivač topline radi uklanjanja topline. Taj se postupak nastavlja sve dok se ne postigne željena temperatura.

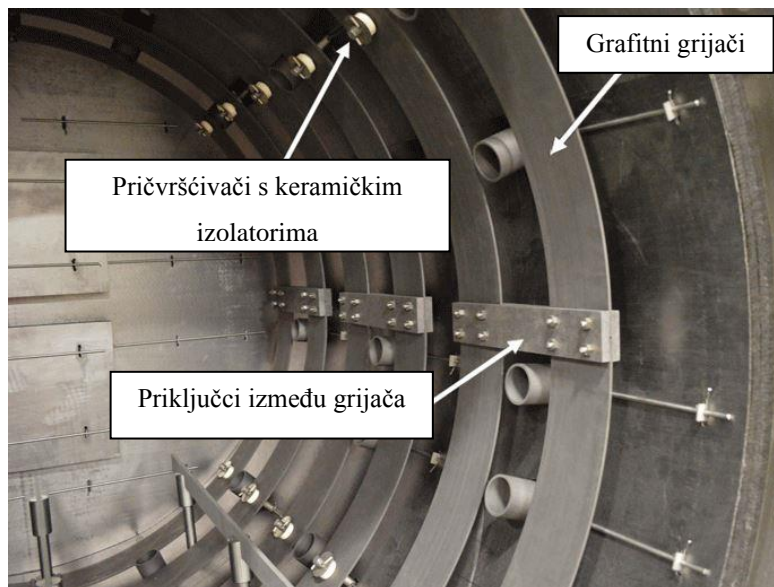
#### 3.2.1 Konstrukcija vakuumske peći

Vakuumska peć sastoji se od tijela peći, vakuumske jedinice, hidrauličkog sustava, upravljačkog sustava, rashladnog sustava i drugih dijelova. Za vakuumsku peć s plinskim hlađenjem potrebno je osigurati spremnik dušika. Kako bi se spriječilo zatvaranje vode ili nedovoljan tlak vode, potrebno je osigurati visinsku posudu za vodu kako bi se spriječilo izgaranje brtvi i elektroda zbog zatvaranja vode. Tijelo peći i vrata vakuumske peći zavareni su i prešani čeličnom pločom visoke čvrstoće. Vrata vakuumske peći otvaraju se i zatvaraju pogonom zupčanika.

Grijaća komora je kružne strukture i može se vidjeti na Slika 9. Grafitni grijači cijevi i mlaznica rashladnog plina ravnomjerno se raspoređuju po grijaćoj komori na 360 stupnjeva. Visokokvalitetni ugljični filc i fleksibilni grafitni papir koriste se kao izolacijski materijali. Konstrukcija je lagana i fiksna. Prema obliku grijanja vakuumska peć može se podijeliti u dvije vrste: vanjsko grijanje i unutarnje grijanje. Peć za unutarnje grijanje preferirana je vrsta proizvođača vakuumskih peći. Prema različitoj strukturi, može se podijeliti u jednokomornu, dvokomornu, trokomornu i kontinuiranu vakuumsku peć. Postoje plinsko hlađene, uljno



hlađene i plinsko-uljne peći dvostruke namjene. Vakuumsko gašenje plinom može ugasiti nehrđajući čelik, čelik od visokolegiranih kalupa, alatni čelik velike brzine i leguru na bazi željeza i nikla korištenjem dušika čistoće preko 99,999%. za kaljenje legiranog čelika koriste se vakuumska ulja za gašenje s niskim tlakom zasićene pare.



Slika 9. Komora vakuumske peći [26]

### 3.2.2 *Grijaći materijali koji se koriste u vakuumskim pećima*

Grijaći elementi vakuumskih peći dijele se na metalne i nemetalne. Metalni grijaći elementi obično su podijeljeni u dvije vrste: jedan je plemeniti metal, poput molibdena, platine, volframa, tantala itd., a drugi su opći metali, poput legure nikal-krom otporne na topline, željezo-krom legura aluminijska, legura molibden-volframa itd. Nemetalni grijaći elementi uključuju dvije vrste grafitna i spojeva. Spojevi su silicijev karbid, molibden-silicij, molibden-oksidi itd. Silicij-karbid lako se veže i razgrađuje na visokoj temperaturi, dok se molibden-oksidi omekšavaju na 1300 °C. Samo grafit ima karakteristike dobre obradivosti, otpornosti na visoke temperature, dobre otpornosti na kaljenje i toplinu, dobre plastičnosti, velike površine zračenja, dobre otpornosti na toplinski udar itd., pa je pogodan za izradu grijaćih elemenata.

### 3.2.3 *Princip rada vakuumske peći*

Vakuumska peć koristi izmjenu faza vode kao toplinskog medija za izmjenu topline. Toplinu oslobođenu izgaranjem goriva apsorbira voda toplinskog medija. Kad temperatura poraste do zasićene temperature određenog vakuumnog stanja, ona isparava do zasićenja i pare, te dovršava prvi proces promjene faze. Protok kondenzata u komoru za isparavanje nastavlja

apsorbirati toplinu i dovršiti ciklus promjene faze. Donja konstrukcija vakuumskog kotla za toplu vodu sastoji se od komore za izgaranje i snopa cijevi za prijenos topline; gornji dio je vakuumska komora, u koju je umetnut U-cijevni izmjenjivač topline; a vakuumska komora je povezana s usisnom jedinicom kako bi vakuumska komora ostala stabilna, a nekondenzirani plin u vakuumskoj komori se ispumpava radi poboljšanja učinkovitosti prijenosa topline izmjenjivača topline U-tipa.

### 3.2.4 Funkcije vakuumske peći

1. Vakuusko kaljenje (kaljenje, žarenje) je metoda za postizanje željenih svojstava zagrijavanjem i hlađenjem materijala ili dijelova u vakuumu prema propisima procesa
2. Vakuusko lemljenje je postupak zavarivanja u kojem se skupina zavara zagrijava do tališta dodatnog metala u uvjetima vakuuma, ali ispod tališta osnovnog metala. Vakuuska peć za lemljenje prikazana je na Slika 10. (temperatura lemljenja varira od materijala do materijala)
3. Vakuusko sinteriranje je metoda sinteriranja susjednih zrnaca metalnog praha na dijelove adhezijom i difuzijom kada se proizvodi u prahu zagrijavaju u vakuumu.
4. Vakuum plus magnetizam se uglavnom primjenjuje na metalne materijale i magnetsku obradu



Slika 10. Vakuuska peć za lemljenje pri visokim temperaturama [27]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1 Cilj rada

Osnovni cilj rada je ispitati kako mijenjanje parametra temperature žarenja utječe na tvrdoću i deformabilnost mjedenog uzorka. U tu svrhu, uzorci su bili podvrgnuti toplinskoj obradi žarenja pri različitim temperaturama, sa jednakim vremenom držanja i oblikom hlađenja. Uzorcima su zatim ispitivani progib i promjena visine nakon opterećenja, a nakon pripreme za metalografsku analizu, analizirana je mikrostruktura, te je izmjerena mikrotvrdoća ispitnih uzoraka prije i nakon toplinske obrade.

### 4.2 Materijali za ispitivanje

Kao materijal za ispitivanje korištena su četiri uzorka od materijala CuZn20. CuZn20 je  $\alpha$ -mjed koji ima izvrsno hladno oblikovanje, dobra svojstva vrućeg oblikovanja i prikladan je za kovanje novca, udaranje i utiskivanje. Ova legura ima veću čvrstoću od čistog bakra. Uglavnom se koristi u nakitu, industriji satova i u elektroničkoj industriji za ugradbene dijelove. [14]

Ima dobru otpornost na slatku vodu, neutralne i alkalne otopine soli, organske spojeve, kao i na kopnenu, morsku i industrijsku atmosferu. Nije osobito otporan na kiseline, vodene spojeve sumpora i amonijak. CuZn20 nije osjetljiv na dezinfekciju, što se može dogoditi u vodi s visokim sadržajem klora i niske karbonatne tvrdoće. Nije otporan na oksidirajuće kiseline. [14] U Tablica 2. prikazan je kemijski sastav legure CuZn20.

Tablica 2. Kemijski sastav legure mjedi oznake CuZn20 [28]

Kemijski element	Cu	Al	Fe	Ni	P	Pb	Sn	Zn	ostali
Maseni udio, %	79-81	≤0,02	≤0,05	≤0,3	/	≤0,05	≤0,1	ostatak	≤0,1

Tablica 3. Svojstva legure mjedi oznake CuZn20 [29]

Legura	Vlačna čvrstoća, $N/mm^2$	Istezanje, %	Tvrdoća, $HV$	Toplinska vodljivost, $W/mK$
CuZn20	370	46	105	140

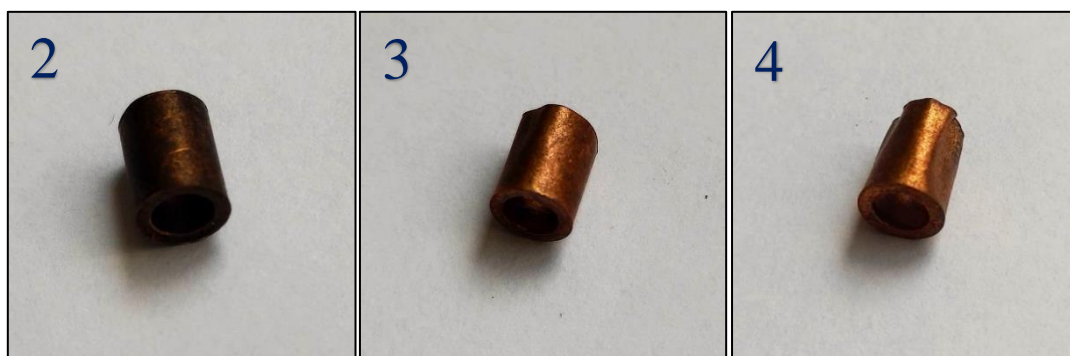
Uzorak u početnom stanju ima zlatni sjaj (Slika 11.) i moguće ga je deformirati silom prstiju. Iz Tablica 3. možemo vidjeti da legura mjedi CuZn20, u odnosu na prosječna svojstva mjedi iz Tablica 1., ima podjednaku toplinsku vodljivost, nižu vlačnu čvrstoću, te višu tvrdoću od prosječne. Legura CuZn20 pokazuje i izraženo istežanje, zbog čega nije potrebna velika sila da bi se uzorak deformirao.



Slika 11. Osnovni uzorak od mjedene legure CuZn20

Tablica 4. Materijali nad kojima su vršena ispitivanja

Oznaka	Materijal	Temperatura žarenja T / °C
1	CuZn20	/
2	CuZn20	750
3	CuZn20	850
4	CuZn20	900



Slika 12. Uzorak žaren na 750 °C (2), 850 °C (3) i 900 °C (4)

### 4.3 Provođenje ispitivanja

#### 4.3.1 Toplinska obrada mjedenih uzoraka u vakuumskoj peći

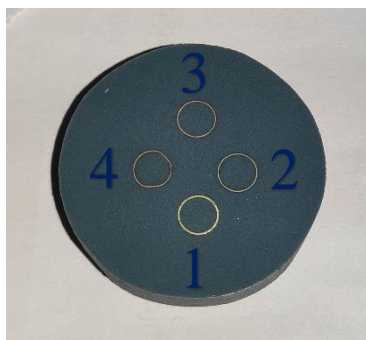
Tri uzorka od istog materijala (Tablica 4.) podvrgnuta su toplinskoj obradi žarenja pri temperaturama od 750 °C, 850 °C, odnosno 900 °C (Slika 12.). Svi su uzorci jednako držani na svojim temperaturama 30 minuta, te hlađeni u istom sredstvu – dušiku. Postupak se odvijao u vakuumskoj peći VFC25 u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, koja je prikazana na Slika 13. Vakuum služi kao zaštitna atmosfera u procesu toplinske obrade. Uklanjanjem zraka iz komore za toplinsku obradu omogućujemo obradu predmeta bez oksidacije površine i razgradnju postojećih oksida. Kao sredstvo za gašenje koristio se inertni plin dušik koji se unosi u vakuumsku komoru.



Slika 13. Vakuumska peć VFC25 (Proizvođač: Ipsen GmbH, Njemačka)

### 4.3.2 Metalografska ispitivanja mjedenih uzoraka

Metalografska ispitivanja obuhvaćaju pripremu uzoraka, te makroskopska i mikroskopska ispitivanja njihove strukture. Kako bi ispitne uzorke promatrali pod svjetlosnim mikroskopom, oni moraju imati potpuno ravnu i glatku površinu. Uzorci su pripremani na način da su se postavili u kalup te zalili smjesom polimernog praha i smole. Nakon 20 minuta smjesa se stvrdnula (Slika 14.) i pristupilo se brušenju uzorka.



Slika 14. Osnovni i 3 žarena uzorka u očvrstloj polimernoj smjesi

Brušenje se odvijalo u 5 koraka, odnosno sa 5 brusnih papira različite granulacije. Uređaj za brušenje na kojem je obrađivan uzorak nalazi se u Laboratoriju za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i prikazan je na Slika 15. Brusni papiri granulacije 320, 600, 1000, 2400 i 4000 izmjenjivani su redom od manje prema većoj granulaciji kako bi dobili što glađu površinu uzoraka. Brzina brušenja bila je 300 okretaja u minuti kod svih koraka, uz konstantni dotok vode u svrhu hlađenja i podmazivanja. Takav izbrušeni uzorak još uvijek nije spreman za analizu pod mikroskopom jer brusna zrnca ostavljaju vidljive tragove na površini, stoga se uzorci nakon brušenja moraju ispolirati.



Slika 15. Laboratorijski uređaj za brušenje Minitex 233

Poliranje se odvijalo u 2 koraka brzinom od 150 okretaja u minuti, a kao sredstvo za podmazivanje korišten je lubrikant koji kaplje po tkanini za poliranje. U prvom koraku poliranja korištena je dijamantna pasta sa zrnom veličine  $3 \mu\text{m}$ . Drugi korak poliranja odvijao se pomoću tekućine koja je imala funkciju dijamantne paste i lubrikanta i imala je veličinu zrna od  $0,03 \mu\text{m}$ . Uređaj za poliranje nalazi se u istoj sobi na fakultetu i prikazan je na Slika 16.



Slika 16. Uređaj za poliranje Struers Pedemin

Ispolirani uzorak se još dodatno nagriza otopinom amonijevog hidroksida i vodikovog peroksida kako bi mikrostrukturne faze bile jasnije vidljive. Nagrizanje se odvijalo u digestoru koji je prikazan na Slika 17.



**Slika 17. Digestor**

Pripremljeni uzorci su zatim promatrani pod svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 sa Slika 18. pod povećanjima od 200x, 500x i 1000x.

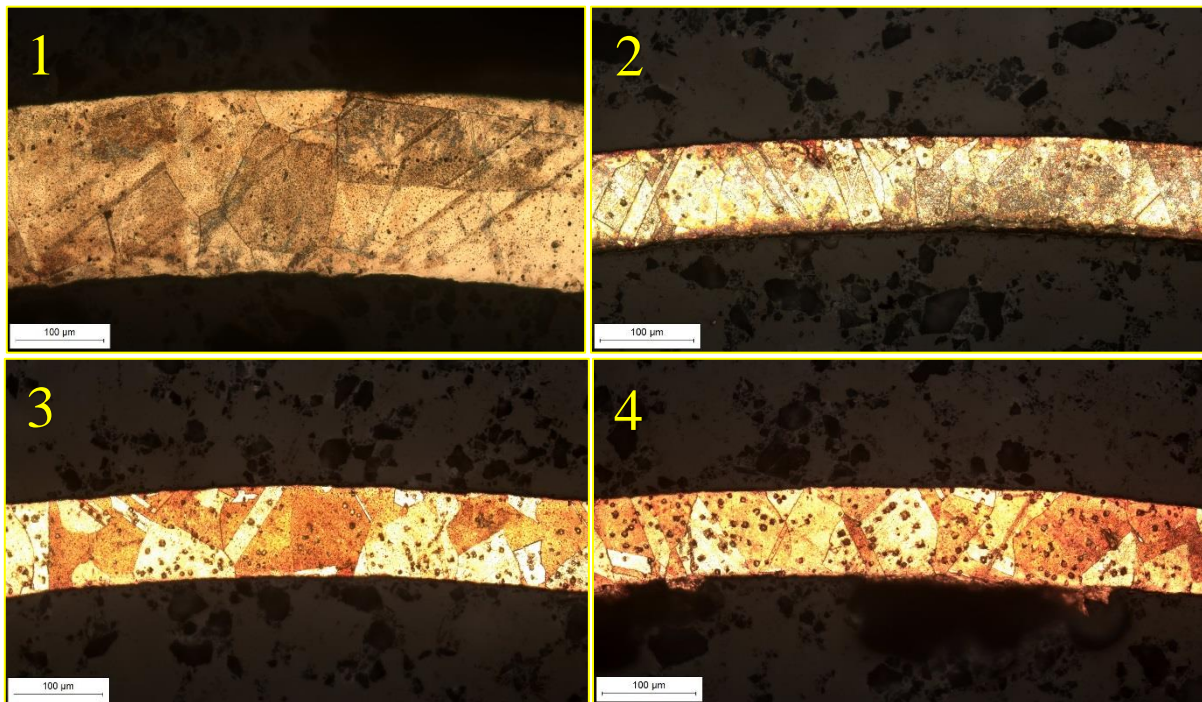


**Slika 18. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51**

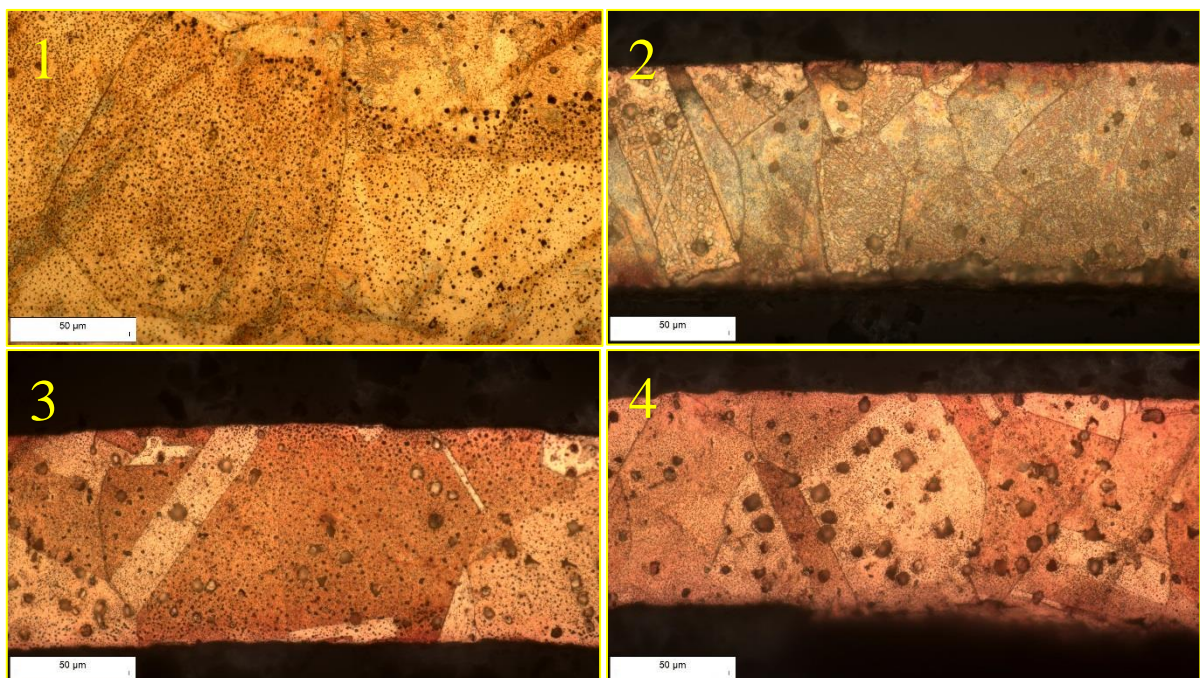


### 4.3.3 Analiza mikrostrukture

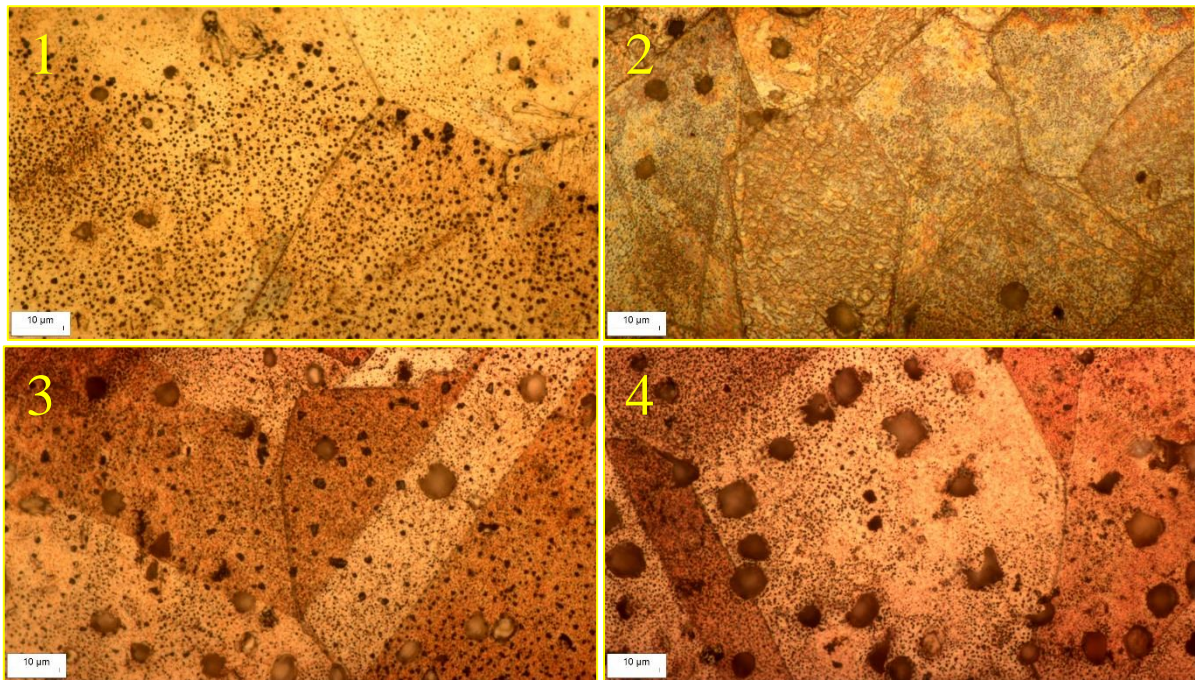
Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 200x, 500x i 1000x.



Slika 19. Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 200x



Slika 20. Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 500x



**Slika 21. Mikrostruktura uzoraka 1-4 pod povećanjem od 1000x**

Na Slika 19.-Slika 21. vidljive su nagrižene površine ispitnih uzoraka. Može se primijetiti na Slika 19. da žareni uzorci imaju tanju stijenu od osnovnog i da se sa povećanjem temperature žarenja mikrostruktura poprima sve crveniju bakrenu boju. Na Slika 21. se vidi kako granice zrna postaju sve uočljivije sa većom temperaturom, zbog čega se daje zaključiti da je ovo legura  $\alpha$ -mjeđi. Usporedimo li je sa  $\alpha$ -mjeđi sa Slika 5., jasno je vidljivo da su mikrostrukture podjednake. Također, vidljivo je i pogrubljenje zrna sa povećanjem temperature žarenja, što u konačnici rezultira povećanjem deformabilnosti materijala.

#### 4.3.4 Mjerenje mikrotvrdoće HV0,1

Uređaj koji je korišten za ispitivanje mikrotvrdoće uzoraka je Wilson-Wolpert Tukon®2100b i prikazan je na Slika 22.



Slika 22. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće Tukon 2100B

Tablica 5. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 1

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzorka – HV0,1
1	67
2	73
3	66
4	71
5	69
Srednja vrijednost	69

**Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 2**

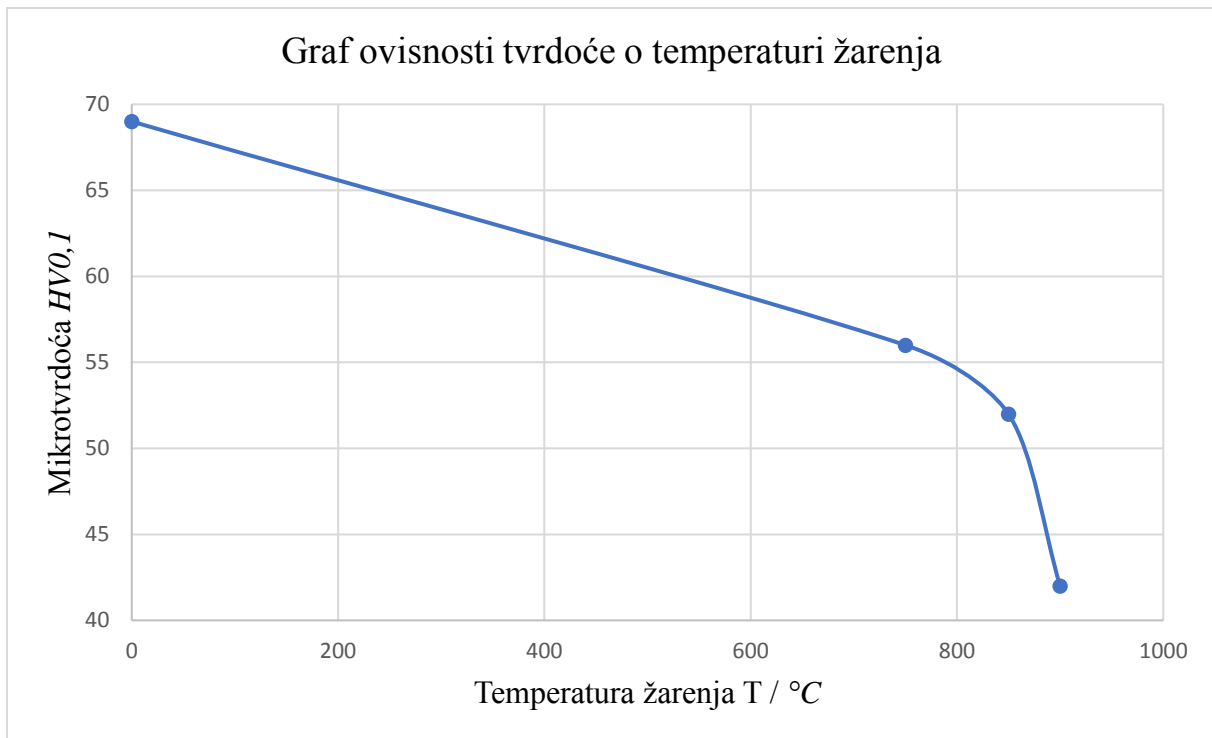
Mjerenje	Mikrotvrdoća uzorka – HV0,1
1	55
2	56
3	58
4	56
5	54
Srednja vrijednost	56

**Tablica 7. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 3**

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzorka – HV0,1
1	56
2	50
3	53
4	51
5	51
Srednja vrijednost	52

**Tablica 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzorka 4**

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzorka – HV0,1
1	43
2	41
3	42
4	40
5	43
Srednja vrijednost	42



**Slika 23. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,1 uzoraka**

Na Slika 23. grafički su prikazani rezultati mjerenja tvrdoće ispitnih uzoraka. Tvrdoća toplinski obrađenih uzoraka je niža od uzorka u osnovnom stanju. Od toplinski obrađenih uzoraka, uzorak 2 pokazuje najveću otpornost prodiranju tvrdog materijala sa prosječnom izmjerenom tvrdoćom od 56 HV0,1, što je za 20% manje od osnovnog stanja. Uzorak 4 ima najnižu tvrdoću od 42 HV0,1, odnosno za 40% manju od uzorka 1.

#### 4.4 Rezultati provedenih ispitivanja

##### Ispitivanje tlačne i savojne čvrstoće uzoraka

Rezultati ispitivanja nakon toplinske obrade žarenjem na 850 °C prikazani su u Tablica 9.

**Tablica 9. Ispitivanje stlačivanja i progiba uzorka 3**

Oznaka uzorka	Promjer $d, mm$	Početna visina uzorka $h_1, mm$	Visina nakon opterećenja od 755,1 N $h_2, mm$	Razlika visina nakon stlačivanja od 755,1 N $\Delta h, mm$	Skraćenje pri 392,4 N $w, mm$
1	5,82	7,52	6,02	1,50	1,67
2	5,76	7,50	5,87	1,63	1,64
3	5,72	7,52	5,83	1,69	1,77

Rezultati ispitivanja nakon toplinske obrade žarenjem na 900 °C prikazani su u Tablica 10.

**Tablica 10. Ispitivanje stlačivanja i progiba uzorka 4**

Oznaka uzorka	Promjer $d, mm$	Početna visina uzorka $h_1, mm$	Visina nakon opterećenja od 755,1 N $h_2, mm$	Razlika visina nakon stlačivanja od 755,1 N $\Delta h, mm$	Skraćenje pri 392,4 N $w, mm$
1	5,77	7,43	6,09	1,34	1,57
2	5,76	7,39	5,92	1,47	1,54
3	5,69	7,50	6,13	1,37	1,93
4	5,69	7,44	6,11	1,33	1,51
5	5,71	7,45	6,07	1,38	1,65

Iz Tablica 9. i Tablica 10. se može vidjeti kako su progib i visina nakon stlačivanja podjednaki na ispitanim uzorcima 3 i 4. Štoviše, uzorak 3 pokazuje malo veće razlike u visini nakon stlačivanja zbog čega se daje zaključiti da uzorak 3 ima malo bolju deformabilnost od uzorka 4.

## ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu opisane su legure mjedi, njihova svojstva te primjeri primjene. U eksperimentalnom dijelu rada provedena je toplinska obrada mjedi CuZn20 koja se, zbog dobre deformabilnosti, koristi za proizvodnju dijelova plastičnom deformacijom. Na temelju provedenih ispitivanja toplinski obrađenih uzoraka dobiveni su rezultati:

- Žarenjem legure mjedi oznake CuZn20 na temperaturama 750 °C, 850 °C i 900 °C u trajanju od 30 minuta, te gašenjem u dušiku, legura CuZn20 poprima izraženiju strukturu  $\alpha$ -mjedi; izraženije granice zrna i bakrenu boju
- Povećanjem temperature žarenja dolazi do pogrubljenja zrna, odnosno povećanja deformabilnosti
- Mjerenjem mikrotvrdoće *HV0,1* dobivene su vrijednosti tvrdoće od 56 *HV* za uzorak žaren na 750 °C do 42 *HV* za uzorak žaren na 900 °C
- Ispitivanjem deformacije uzoraka na kidalici pri različitim silama tlačenja dobiveni su rezultati deformacije od 1,6 *mm* za uzorak žaren na 750 °C te 1,38 *mm* za uzorak žaren na 900 °C

## LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2013.
- [2] <http://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys>
- [3] [https://www.researchgate.net/profile/Bondan-Sofyan/publication/311736641\\_EFFECTS\\_OF\\_DEFORMATION\\_AND\\_ANNEALING\\_TEMPERATURE\\_ON\\_THE\\_MICROSTRUCTURES\\_AND\\_MECHANICAL\\_PROPERTIES\\_OF\\_CU-32ZN\\_BRASS/links/585897d208aeabd9a589f8f5/EFFECTS-OF-DEFORMATION-AND-ANNEALING-TEMPERATURE-ON-THE-MICROSTRUCTURES-AND-MECHANICAL-PROPERTIES-OF-CU-32ZN-BRASS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bondan-Sofyan/publication/311736641_EFFECTS_OF_DEFORMATION_AND_ANNEALING_TEMPERATURE_ON_THE_MICROSTRUCTURES_AND_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_CU-32ZN_BRASS/links/585897d208aeabd9a589f8f5/EFFECTS-OF-DEFORMATION-AND-ANNEALING-TEMPERATURE-ON-THE-MICROSTRUCTURES-AND-MECHANICAL-PROPERTIES-OF-CU-32ZN-BRASS.pdf)
- [4] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=41296>
- [5] <https://www.morecambemetals.co.uk/metals-and-their-properties-brass/>
- [6] Bell, Terence. "Learn About the Properties and Uses of Brass Metal." ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/metal-profile-brass-2340129> (preuzeto 6. lipnja, 2021).
- [7] <https://www.thoughtco.com/brass-types-3959219>
- [8] <https://www.metals4u.co.uk/blog/brass-in-depth-guide>
- [9] <https://thebloke.co.nz/understanding-brass-annealing/>
- [10] <https://bisonballistics.com/articles/the-science-of-cartridge-brass-annealing>
- [11] <https://www.copper.org/applications/industrial/DesignGuide/selection/brasses02.html>
- [12] <https://in.all.biz/brass-products-g444210>
- [13] <https://www.vacfurnace.com/whats-the-vacuum-furnace/>
- [14] <https://www.ilnor.eu/en/product/cuzn20/>
- [15] <http://www.matweb.com/search/DataSheet>
- [16] <https://www.coowor.com/p/j3fmej0zRDTY/Easy-flow-phos-copper-silver-alloys-brazing-flat-rod-welding-wire-welding-rod.htm>
- [17] <https://www.duplexpipes.com/copper-nickel-90-10-round-bar.html>
- [18] <https://beryllium-copper.com/beryllium-copper-rod-bar/>
- [19] <https://www.pinterest.com/pin/211106301269218753/>
- [20] [https://www.adinathextrusion.com/brass\\_billets/brass\\_billets.html](https://www.adinathextrusion.com/brass_billets/brass_billets.html)
- [21] <http://www.wahbrass.com/brassingot.php>
- [22] [https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-alpha-brass-Cu-30-Zn-alloy-showing-polyhedral-grains-and-the\\_fig1\\_309744216](https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-alpha-brass-Cu-30-Zn-alloy-showing-polyhedral-grains-and-the_fig1_309744216)



[23]

<https://analyticalscience.wiley.com/doi/10.1002/micro.457/full/i3d0c2d46f4b3c9bcb0dc6eb5f636f443.pdf>

[24] <http://www.sdalloys.com/cartridgebrass.php>

[25] <https://bisonballistics.com/articles/the-science-of-cartridge-brass-annealing>

[26] <https://vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/207051-vacuum-furnace-heating-elements.html>

[27] <https://www.vacfurnace.com/china-vacuum-furnace/>

[28] <https://www.ilnor.eu/en/product/cuzn20/>

[29] <https://copperalliance.org.uk/about-copper/conductivity-materials/>