

# Utjecaj deformacije i toplinske obrade na strukturu hladno vučene bakrene žice

---

**Torman, Vedran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:058296>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTE

Vedran Torman

DIPLOMSKI RAD

Sisak, listopad 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTE

Vedran Torman

**UTJECAJ STUPNJA REDUKCIJE I TOPLINSKE OBRADJE NA  
STRUKTURU I ELEKTRIČNU VODLJIVOST Cu ŽICE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Ivan Jandrlić  
Stručni voditelj: Franjo Kozina, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:  
Predsjednik: prof.dr.sc. Stjepan Kožuh  
Član: doc.dr.sc. Ivan Jandrlić  
Član: izv.prof.dr.sc. Natalija Dolić  
Zamjenski član: prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić

Sisak, listopad 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Vedran

PREZIME: Torman

MATIČNI BROJ: \_\_\_\_\_

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

UTJECAJ STUPNJA REDUKCIJE I TOPLINSKE OBRADNE NA STRUKTURU I ELEKTRIČNU
VODLJIVOST Cu ŽICE

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

## ZAHVALA

*Prvenstveno se zahvaljujem svojem mentor doc. dr. sc. Ivanu Jandrliću i stručno voditelju Franji Kozini, mag.ing.met. koji su mi omogućili i pomogli svojim iskustvima, savjetima i primjerima u izradi ovog diplomskog rada, te im se posebno zahvaljujem na strpljenju i pruženom vremenu za moje upite i nedoumice.*

*Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom mog studiranja.*

## SAŽETAK

Bakar je jedan od najvažnijih obojenih metala, zahvaljujući svojim dobrim svojstvima, još je uvijek nezamjenjiv u primjeni proizvodnje vodiča i u drugim primjenama. Bakar u lijevanom stanju nije primjenjiv za proizvodnju vodiča iz nekoliko razloga, stoga se naknadno provode postupci deformacije i rekristalizacije kako bi mu se poboljšala svojstva. Istraživanja u ovom diplomskom radu su provedena na žici proizvedenoj UPCAST postupkom vertikalnog lijevanja i naknadno hladno provlačenoj kroz matrice. Lijevana žica promjera 8 mm je naknadno postupkom kontinuiranog provlačenja kroz više matrica reducirana do konačnog promjera od 2.6 mm. Pri postupku proizvodnje i prerade bakrene žice, u njoj dolazi do različitih promjena u strukturi, mehaničkim svojstvima i električnim svojstvima. U cilju promatranja ovih promjena provedena su strukturna ispitivanja, ispitivanje tvrdoće i mjerene su vodljivosti žice u pojedinim fazama proizvodnje. Ispitivanja su vršena pri stupnjevima redukcije od 24, 46 i 67.5%. Rezultati ispitivanja opisuju strukturne promjene koje se dešavaju nakon provođenja pojedine redukcija, te isto tako utjecaj redukcije na tvrdoću i vodljivosti žice, kao i utjecaj toplinskog postupka žarenja na strukturu i vodljivost bakrene žice. Rezultati ukazuju kako početna lijevana grubozrnata struktura tijekom redukcije prelazi u sitnozrnatu strukturu usmjerenu u smjeru odvijanja plastične deformacije. Uslijed toga dolazi do smanjenja vodljivosti, što se naknadnom toplinskom obradom mijenja te se ostvaruje dobra vodljivost uz zadržavanje dobrih mehaničkih svojstava žice. Strukturna istraživanja također ukazuju kako nakon toplinske obrade u strukturi bakrenog vodiča dolazi do formiranja kristala blizanaca.

Ključne riječi: bakrena žica, hladno provlačenje, struktura, tvrdoća, električna vodljivost.

## **ABSTRACT**

### **INFLUENCE OF DEFORMATION AND HEAT TREATMENT ON STRUCTURE OF THE COLD DRAWN COPPER WIRE**

Copper is one of the most important non-ferrous metals, thanks to its good properties it is still irreplaceable in the application for conductors of electricity, and in other uses. Copper in its as cast state is not applicable in the production of conductors for several reasons. Deformation and recrystallization processes are subsequently performed to improve its properties. The research in this graduate thesis was conducted on a copper wire produced by the UPCAST vertical casting process and subsequently cold drawn. The as cast wire with a diameter of 8 mm was subsequently reduced to the final dimension by a continuous drawing process through several dies up to the wire thickness of 2.6 mm. During the production and processing of copper wire, various changes in structure, mechanical properties and electrical properties occur. In order to observe these changes, structural and hardness tests were performed and wire conductivities were measured at individual stages of production. The tests were performed on the wire at reductions of 24, 46 and 67.5%. The test results describe the structural changes that occur after the implementation of individual reductions, as well as the influence of reduction on the hardness and electrical conductivity of the wire, as well as the impact of the thermal annealing process on the structure and conductivity of copper wire. The results indicate that the initial coarse-grained structure in cast state, during reduction breaks down into a fine-grained structure orientated in the direction of plastic deformation. As a result, the conductivity is reduced, which is changed by subsequent heat treatment. After heat treatment a good conductivity is achieved while maintaining the better mechanical properties of the wire. Structural studies also indicate that after heat treatment, twin crystals form in the structure of the copper conductor.

Keywords: copper wire, cold drawing, structure, hardness, electrical conductivity.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Rude bakra .....	2
2.2. Ekstrakcija bakra.....	3
2.3. Prerada oksidne rude .....	7
2.4. Prerada sulfidne rude .....	8
2.5. Proizvodnja bakrene žice .....	10
2.6. UPCAST postupak lijevanja .....	11
2.7. Tehnologija provlačenje bakrene žice.....	13
2.7.1. Strojevi za provlačenje .....	14
2.7.2. Glavni parametri obrade koji utječu na kvalitetu vučene žice .....	16
2.8. Mehanička i električna svojstva hladno vučene bakrene žice.....	22
2.9. Očvršćavanje i električna vodljivost .....	24
2.10. Žarenje i rekristalizacija bakrene žice.....	26
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	28
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	36
5. ZAKLJUČAK .....	49
6. LITERATURA.....	50
7. ŽIVOTOPIS .....	52



## POPIS SLIKA :

- Slika 1. Višetažna peć
- Slika 2. Peć za prženje u fluidizacijskom sloju
- Slika 3. Peć, traka za sinteriranje
- Slika 4. Plamena peć
- Slika 5. Kontinuirani postupak proizvodnje bakra, Mitsubishi postupak
- Slika 6. Horizontalni konvertor za bakar
- Slika 7. Postupak ekstrakcije bakra
- Slika 8. Hidrometalurški postupak
- Slika 9. Pirometalurški postupak
- Slika 10. Katodni blokovi bakra
- Slika 11. UPCAST postrojenje
- Slika 12. Vertikalno povlačenje žice
- Slika 13. Vučena žica sa sustavom za hlađenje
- Slika 14. Koluti proizvedene žice
- Slika 15. Bakrena žica 8mm proizvedena UPCAST postupkom
- Slika 16. Jednostupanjski stroj za provlačenje
- Slika 17. Višestupanjski stroj za provlačenje s klizanjem
- Slika 18. Višestupanjski stroj za provlačenje sa sustavom bez klizanja
- Slika 19. Matrice
- Slika 20. Zone u matricama
- Slika 21. Formiranje habajućeg prstena
- Slika 22. Utjecaji sila prilikom provlačenja
- Slika 23. Podjela tipova rada prilikom provlačenja žice kroz matricu
- Slika 24. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva bakra
- Slika 25. Utjecaj toplinske obrade na bakar
- Slika 26. Vučena žica namotana na kolute
- Slika 27. Strojevi za kontinuirano izvlačenje žice
- Slika 28. Buehler Simplimet1000 uređaj za pripremu uzorka za metalografsku analizu
- Slika 29. Uzorak bakrene žice uložen u vodljivu masu
- Slika 30. Buehler „Phoenix Beta“ uređaj za brušenje i poliranje uzoraka.
- Slika 31. Izgled uzorka nakon brušenja i poliranja.
- Slika 32. Nagrizanje uzorka bakrene žice
- Slika 33. Uzorak prije nagrizanja.
- Slika 34. Uzorak nakon nagrizanja.
- Slika 35. Uzorci nakon nagrizanja
- Slika 36. Metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70
- Slika 37. Mitutoyo Hardness Testing Machine HV, Model No. 810-165D, uređaj za mjerenje tvrdoće bakrene žice
- Slika 38. Sheme ispitivanja tvrdoće
- Slika 39. AESA-CORTAILLOD 7198 uređaj za žarenje i mjerenje el. vodljivosti žice
- Slika 40. Makrostruktura početne žice u smjeru lijevanja

- Slika 41. Makrostruktura početne žice presjeka okomitog na smjer lijevanja
- Slika 42. Mikrostruktura početne žice u smjeru lijevanja
- Slika 43. Mikrostruktura žice okomito na smjer lijevanja
- Slika 44. Prikaz makrostrukture uzorka u smjeru lijevanja nakon redukcije od 24%
- Slika 45. Makrostrukturni prikaz presjeka žice okomit na smjer lijevanja nakon 24% redukcije
- Slika 46. Snimljene strukture okomito na smjer provlačenja, nakon 24% redukcije
- Slika 47. Makrostrukturna promjena žice nakon redukcije od 46%
- Slika 48. Mikrostruktura žice nakon 46% redukcije
- Slika 49: Metalografska slika bakrene žice nakon provedene redukcije od 67,5% u
- Slika 50. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u rubnim pozicijama
- Slika 51. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u središtu
- Slika 52. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u rubnim dijelovima u smjeru provlačenja.
- Slika 53. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u centralnom dijelu, u smjeru provlačenja.
- Slika 54. Makrostruktura žice nakon ostvarene redukcije 67,5% i provedenog žarenja
- Slika 55. Mikrostruktura žarene bakrene žice okomito na smjer provlačenja
- Slika 56. Mikrostruktura žice u smjeru provlačenja nakon ostvarene redukcije od 67,5% i žarenja pri različitim povećanjima
- Slika 57. Pozicija ispitivanja tvrdoće žice u smjeru lijevanja
- Slika 58. Pozicije ispitivanja tvrdoće žarene žice okomito na smjer lijevanja

#### POPIS TABLICA:

- Tablica 1. Minerali bakra
- Tablica 2. Izmjerena tvrdoća početne žice u lijevanom stanju
- Tablica 3. Izmjerene vrijednosti tvrdoće žice nakon 24% redukcije
- Tablica 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon 46% redukcije
- Tablica 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon 67,5% redukcije
- Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće žarene žice s 67,5% redukcije u smjeru lijevanja
- Tablica 7. Rezultati ispitivanja tvrdoće žarene žice s 67,5% redukcije okomito na smjer lijevanja

## 1. UVOD

Bakar je metal narančasto-crvene ili smeđe boje, izraženog sjajnog odsjaja s karakteristikom dobre istezljivosti te velikom električnom i toplinskom vodljivošću. Svojstva čvrstoća i tvrdoća bakra znatno se povećava hladnom obradom zbog stvaranja izduženih kristala koji su usmjereni prema središtu materijala. Uobičajeni plinovi, poput kisika, dušika, ugljičnog dioksida i sumpornog dioksida, topljivi su u rastopljenom bakru i uvelike utječu na mehanička i električna svojstva skrutnutog metala smanjujući mu čvrstoću i el. vodljivost. Čisti bakar na drugom je mjestu nakon srebra u toplinskoj i električnoj vodljivosti [1].

Zbog dobrog svojstva el. vodljivosti 65% bakra proizvedenog u svijetu koristi se u elektroindustriji, 25% se kombinira s drugim metalima tvoreći legure koje se koriste kao građevinski elementi. Ostatak proizvedenog bakra, približno 7%, koristi se u svrhe transportnih sredstava [1, 2].

Najčešće legure u kojima je glavni element bakar su mjed (bakar i cink) i bronce (bakar i kositar), postoji i korisna legura bakra i nikla koja se naziva monel. Bakar s aluminijem tvori važnu leguru, nazvanu aluminijska bronca. Berilijev bakar neobična je legura bakra jer se može očvrstnuti toplinskom obradom. Bakar je mnogim kovanim metalima legirajući element te se koristi za grijanje, opskrbu vodom, klimatizaciju, kao i za opskrbu plinom i rashladnu opremu. Najveći svjetski proizvođači su Njemačka, Srbija, Kina, Rusija i SAD [2, 3]. Struja lako teče kroz bakar zahvaljujući malom električnom otporu, bez velikog gubitka energije te se upravo zbog toga najčešće proizvode bakrene žice koje se koriste u mrežnim kabelima u kućnim instalacijama i podzemnim el. instalacijama (iako su nadzemni kabeli uglavnom aluminijski, jer imaju manju gustoću time i težinu ali i cijenu) [4].

Pri proizvodnji bakrenih vodiča, polazi se od proizvodnje bakrenih šipki ili žica veće debljine, što se ostvaruje kontinuiranim lijevanjem. Kao početni uložak pri proizvodnji bakrenih vodiča koristi se elektrolitički čisti bakar, ili tzv. bakrena katoda, koju dobivamo metalurškim postupcima iz bakrenih ruda [5]. Nakon kontinuiranog postupka lijevanja, za dobivanje vodiča bakrene se šipke naknadno kontinuirao reduciraju procesom vučenja kroz matrice različitih promjera do konačne dimenzije žice. Zbog svoje izvrsne sposobnost oblikovanja i deformiranja bakar se lako izvlači iz šipke na male promjere žice bez potrebe za među procesnim žarenjem. Uobičajena praksa u industriji proizvodnje žica je ograničavanje redukcije izvlačenja na oko 90%, nakon čega slijedi žarenje. Iznad te razine redukcije mogu se dogoditi metalurške promjene strukture koje mogu pogoršati mehanička svojstva žice. Važno je naglasiti da se žica proizvodi kontinuiranim postupkom, takozvanim "postupkom u liniji" koji uključuje polagano izvlačenje žice nakon čega slijedi kontinuirano žarenje [5].

Tijekom provlačenja žice kroz matrice uslijed redukcije poprečnog presjeka žice, u strukturi bakra se dešavaju razne promjene. Tako imamo utjecaj deformacije na strukturu u smislu usitnjenja zrna, povećanja gustoće dislokacija i usmjerenja zrna u smjeru deformacije. Utjecaj deformacije na žicu nakon provlačenja rezultira povećanom čvrstoćom i tvrdoćom bakrene žice, ali smanjenjem električne vodljivosti. Da bi se povećala električna vodljivost provodi se toplinski proces žarenja pri čemu uslijed rekristalizacije dolazi do promjena u strukturi, te mehaničkim i električnim svojstvima same žice. Neka istraživanja ukazuju na pojavu kristala blizanaca, čime se zadržavaju određena mehanička svojstva i poboljšava el. vodljivost u odnosu na deformirano stanje. Upravo ove pojave su istraživane i pojašnjene u ovom diplomskom radu.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Rude bakra

Nalazišta bakrenih ruda su diljem svijeta ali najznačajnije zemlje su: Čile kao najveći proizvođač bakra sa 46% svjetske proizvodnje, ostali su Španjolska, Kongo, Peru, SAD, Kanada, Poljska, Srbija [2, 6].

Rude bakra prije više desetaka godina smatrale su se bogatima ako su imale oko 6% bakra, dok danas uz pomoć postupaka obogaćivanja rude flotacijom prerađuju se rude koje sadrže i 0,2% bakra [2].

Ruda Halkopirit je najčešća i najznačajnija ruda koja se koristi za dobivanje bakra. 80% svjetske proizvodnje bakra se upravo dobiva iz ove rude, a ona sadrži 27-39% bakra. Neke od važnijih ostalih ruda, minerala bakra prikazani su u tablici 1 [2, 6].

**Tablica 1.** Minerali bakra [6].

<i>Mineral</i>	<i>Sastav</i>	<i>Wt% Cu</i>	<i>Boja</i>	<i>Sjaj</i>
Samородni Cu	Cu	98+	Bakreno crvena	Metalni
Kuprit	Cu <sub>2</sub> O	88,8	Crvena	Kristalni
Halkocit	Cu <sub>2</sub> O	79,9	Tamno smeđa	Metalni
Kovelin	CuS	66,4	Indigo plava	-
Bornit	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	63,3	Zlatno smeđa do bakreno crvena	Matalni
Malahit	CuCO <sub>3</sub> Cu(OH) <sub>4</sub>	57,5	Svijetlo zelena	Svilenkast
Azurit	2CuCO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>	55,3	Plava	Stakleni
Antlerit	Cu <sub>3</sub> SO <sub>4</sub> (OH) <sub>4</sub>	53,7	Zelena	-
Halkopirit	CuFeS <sub>2</sub>	34,6	Nebesko-plava Tirkizna	Metalni do neproziran

## 2.2. Ekstrakcija bakra

Najčešće rude, bakreni oksid i bakreni sulfid, zbog različitih kemijskih svojstava podvrgavaju se dvama različitim postupcima, hidrometalurgiji odnosno pirometalurgiji. Bakrenih oksida ima više u blizini površine, ali se smatraju rudom niskog bakra. Iako je za to potrebno izdvojiti i preraditi veću količinu rude, postupci obrade bakrenih oksida su jeftiniji, pa se oksidne rude još uvijek mogu smatrati korisnom rudom [6, 7].

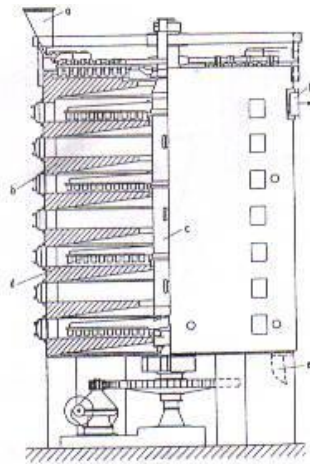
S druge strane, dok je ruda bakrenog sulfida manje rasprostranjena u zemljinoj kori, sadrži veće količine bakra. Iako su troškovi obrade veći, u konačnici se može izdvojiti više bakra. Budući da je svako nalazište jedinstveno po svom mineralnom sastavu, koncentraciji i količinama, moraju se odrediti najekonomičniji i najisplativiji postupci prerade rude. Kada je to ekonomski izvedivo, iz rudnika se mogu vaditi obje vrste minerala bakra, a kada nije moguće, prerađuje se samo jedna vrsta rude [2, 7].

Prvi koraci prerade bakra jednaki su za obje rude: rudarstvo i transport. Iskop bakra obično se izvodi na površinskom kopu, u kojem se niz stepeničastih klupa vremenom sve dublje i dublje kopa u zemlju. Za uklanjanje rude koriste se strojevi za bušenje rupa u tvrdoj stijeni, a u rupe za bušenje ubacuju se eksplozivi za razbijanje stijene. Nastale gromade su tada spremne za izvlačenje. Za izvlačenje rude od mjesta miniranja do mjesta prerade koriste se specijalizirani tegljači, transporter i vlakovi. Većina ruda zatim se šalje kroz primarnu drobilicu, koja se obično nalazi vrlo blizu. Primarna drobilica smanjuje veličinu rude iz gromada na stijene veličine loptice za golf [2, 7].

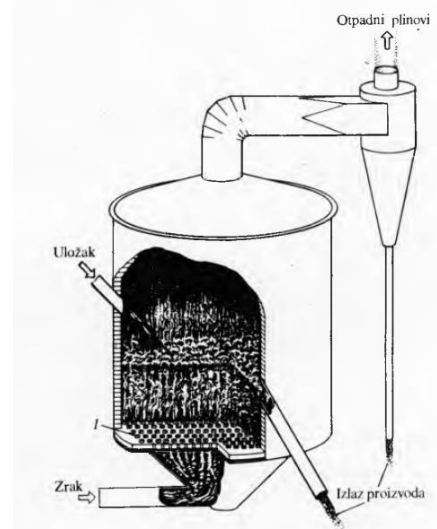
Rude se prvo mehanički usitnjavaju i melju tako da se gotovo sve mineralne čestice bakra oslobađaju iz rude. Najčešće se to provodi flotacijskim postupcima ubrizgavanjem zraka s jakim miješanjem pri čemu se polazna veličina rude pretvara na usitnjenu rudu koja se drži u suspenziji s vodom, pri čemu joj se dodaje površinski aktivno sredstvo. Postupkom se dobivaju koncentracije koji sadrže otprilike 30% bakra koji se uzastopno dovodi u postrojenje za obradu. Prvo se koncentrat bakra, dobiven obogaćivanjem, ulaže u peć u kojoj se procesom prženja uklanja većina željeza i sumpora [6].

Postoji nekoliko vrsta peći za prženje. Sve imaju istu svrhu i odvijanje kemijskih reakcija, a to je oksidacija dijela sumpora te vezanje u oblik  $\text{SO}_2$ . Isto tako zbog većeg afiniteta vezanja kisika sa željezom od bakra najprije će se vezati za željezo, te će se isto tako ukloniti dio željeza iz koncentrata u obliku oksida  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Bakar koji se nalazi u koncentratu nakon procesa prženja je u obliku sulfida  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Prženac s navedenim sastavom ide na slijedeći stupanje obrade, a to je proces taljenja. Najčešće peći za proces prženja su višeetažne peći (slika 1), peći za prženje u fluidizacijskom sloju (slika 2) te sinter aparati (slika 3) [2, 5, 6].

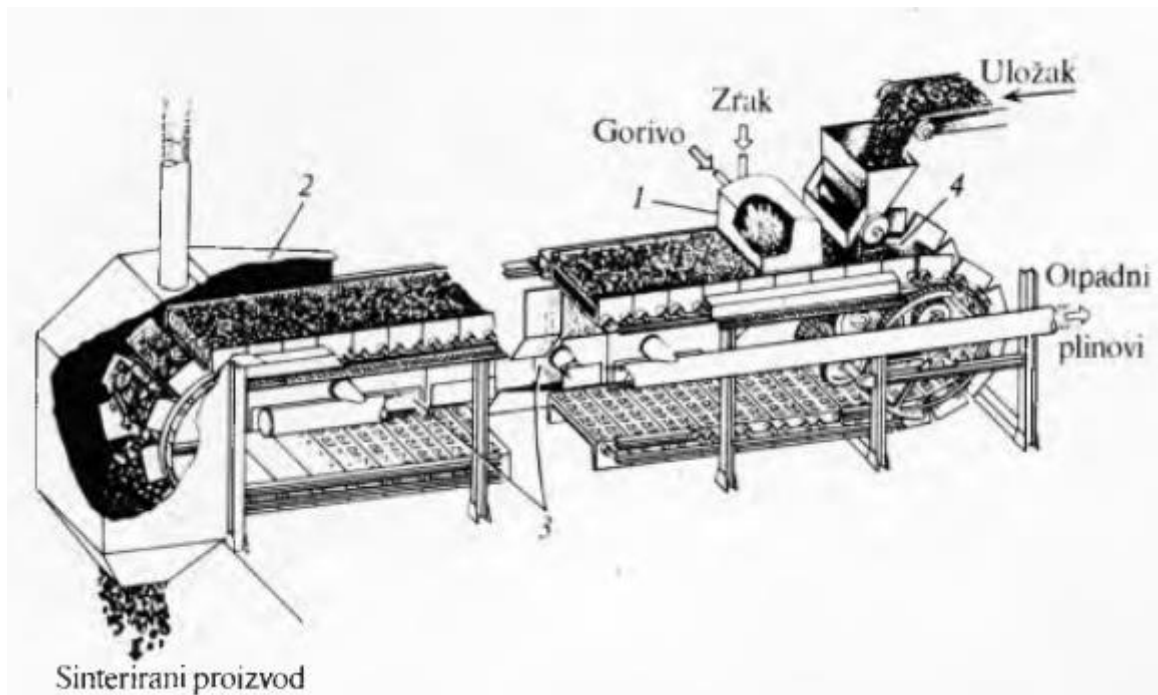
- a – šaržiranje
- b – etaže
- c – osovina za okretanje ručica
- d – gumeni mješači s ručicama
- e – izlaz prženca
- f – izlaz plinova



Slika 1. Višetažna peć [2]



Slika 2. Peć za prženje u fluidizacijskom sloju [8]



Slika 3. Peć, traka za sinteriranje [8]

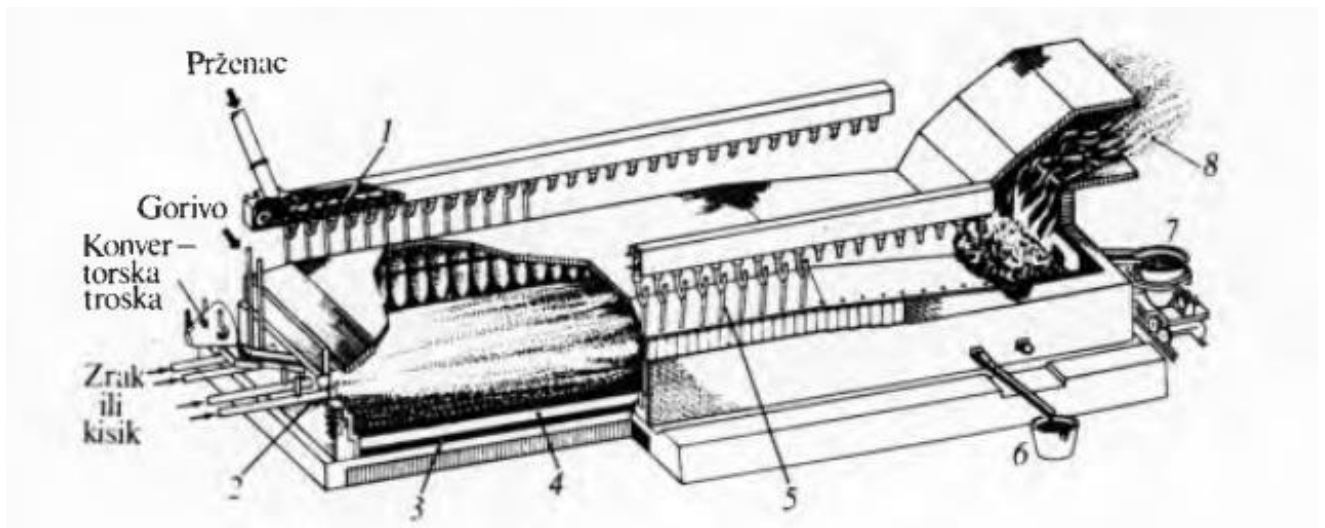
Nakon prženja dobiveni prženac se obrađuje procesom taljenja kako bi se dobio koncentrat bakrenac. Taljenje je proces toplinske obrade zasipa pri kojem se odstranjuje većina nečistoća u trosku. Osnovna su dva postupka taljenja, redukcijsko taljenje te taljenje na bakrenac.

Kod redukcijskog taljena dolazi do reakcije između metalnog oksida i redukcijskog sredstva pri čemu dolazi do izdvajanja nečistog metala te redukcijske troske [2].

Taljenje na bakrenac je koncentracijski postupak taljenja kod kojeg se izdvaja rastaljena smjesa bakrovih sulfida te troska. Dobivena rastaljena smjesa je bakrov sulfid ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) te željezov sulfid ( $\text{FeS}$ ).

Zbog male raspoloživosti oksidnih ruda bakra proces redukcijskog taljenja se ne koristi često. Kako je 80% bakra iz sulfidnih ruda koristi se postupak taljenja na bakrenac koji sadrži 35-45% Cu. Proces taljenja se provodi u pećima, (visoka peć, plamena peć, elektropeć, taljenje u lebdećem stanju te novijim autogenim postupcima taljenja poput OUTOKUMPU, INCO, CONTOP, KIVCET) [2]. Kod proizvodnje bakra još uvijek se najčešće koriste plamene peći kao na slici 4 [8].

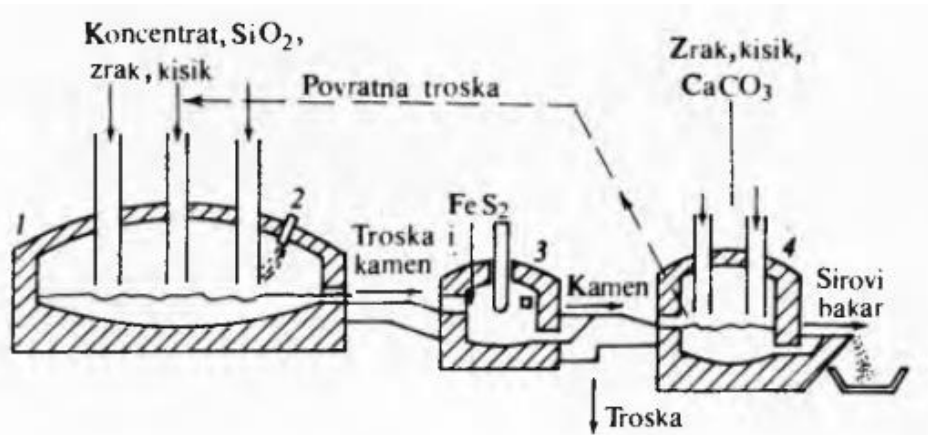
Postoje još i autogeni kontinuirani postupci koji se danas sve više koriste, a oni su NORANDA postupak, MITSUBISHI postupak, ISASMELT postupak te WORCRA postupak [2].



Slika 4. Plamena peć [8]

1. Transportna traka, 2. Gorionici, 3. Kamen, 4. Troska, 5. Šaržne cijevi, 6. Ispust kamena, 7. Ispust troske, 8. Izlaz plinova.

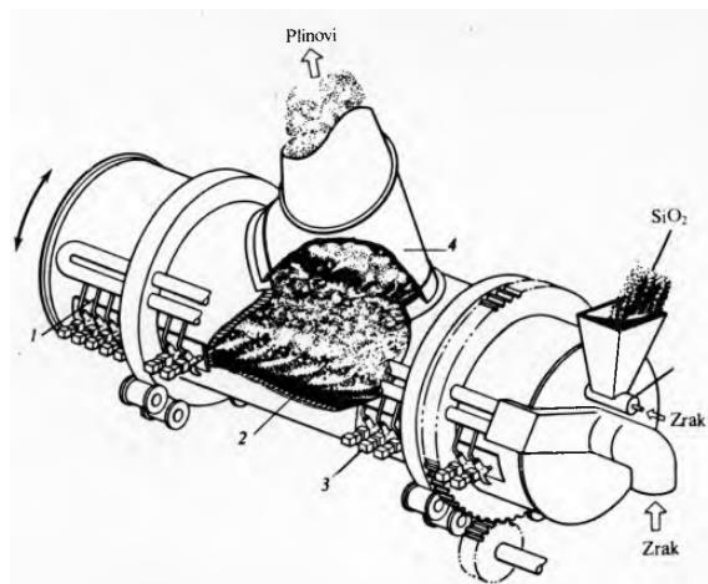
U posljednje vrijeme počeli su se industrijski primjenjivati i postupci u kojima se prženje, taljenje na kamen i konvertiranje obavlja u istom agregatu (postupak Noranda) ili kontinuirano u međusobno povezanim agregatima (Mitsubishi postupka koji je prikazan na slici 5).



Slika 5. Kontinuirani postupak proizvodnje bakra, Mitsubishi postupak [8]  
 1. Peć za taljenje, 2. Gorionik, 3. Električna peć za preradbu troske, 4. Konvertor.

Bakrenac dobiven nakon taljenja ima još primjesa koje treba ukloniti. Uklanjanje štetnih primjesa se provodi daljnjim korakom obrade bakrenca, a to je proces konvertiranja te potom proces rafinacije.

Konvertiranje bakrenca je postupak prerade bakrenca na blister bakar, odnosno uklanjaju se nepotrebne primjese, od kojih su najznačajnije željezo i sumpor. Primjese plemenitih metala se ne mogu ukloniti tijekom konvertiranja. Proces konvertiranja se najčešće provodi u horizontalnim konvertorima koji je prikazan na slici 6.



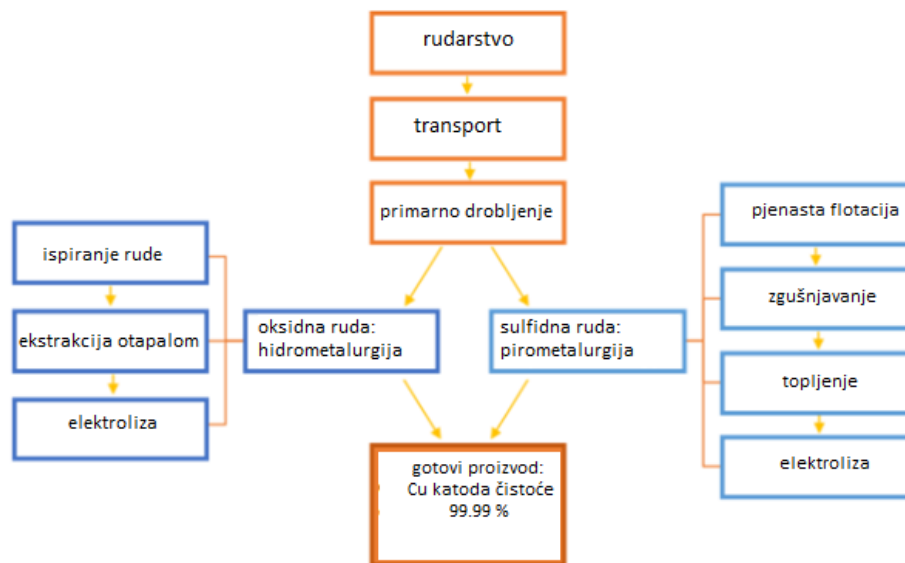
Slika 6. Horizontalni konvertor za bakar [8].  
 1. Dovod zraka, 2. Rastaljeni bakar,  
 3. Puhalice za zrak, 4. Isparivač.

Proces konvertiranja se provodi u dvije faze. U prvoj fazi se oksidira sumpor iz FeS u SO<sub>2</sub>, a željezo prelazi u FeO koji sa SiO<sub>2</sub> stvara trosku. Prvi period traje 5 do 9 sati i dobiva se čisti



$\text{Cu}_2\text{S}$  ili bijeli mat, bakrenac. U drugoj fazi se prerađuje bijeli mat, dobiven iz prve faze, na blister barak. Proces se provodi na temperaturama  $\sim 1300^\circ\text{C}$  uz propuhivanje zasipa kisikom. Propuhivanjem sumpor iz bijelog mata se veže za kisik te nastaje  $\text{SO}_2$ , a dobiveni blister bakar ima čistoću 98-99,5%. Za dobivanje još čisteg bakra provodi se plamena ili elektrolitička rafinacija gdje se uklanjaju ostale primjese te se dobiva bakar čistoće i do 99,99% [2, 7].

Ekstrakciju bakra od početka do kraja, od minerala do čistog bakra možemo vidjeti na slici 7.



Slika 7. Postupak ekstrakcije bakra [7].

### 2.3. Prerada oksidne rude

Oksidne rude uglavnom se prerađuju hidrometalurgijom. Ovaj postupak koristi vodene otopine za ekstrakciju i pročišćavanje bakra iz ruda bakrenog oksida na uobičajenim temperaturama u tri koraka:

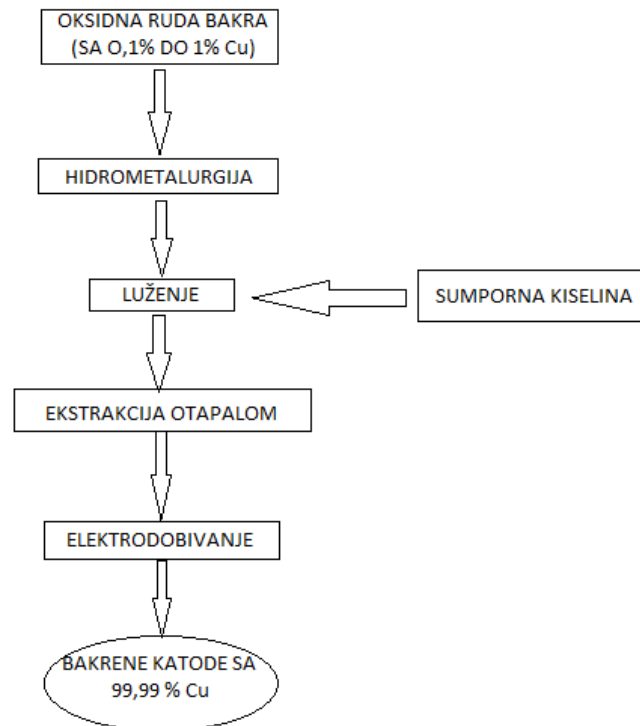
- ispiranje rude,
- ekstrakcija otapala
- elektroliza.

Ispiranja rude je postupak korištenja filtracijskih otopina za ispiranje metala. Ispiranje rude vrlo se često koristi za rudu niskog stupnja. Nakon kopanja, transporta i drobljenja do konzistentne veličine šljunka ili loptice za golf, usitnjena ruda skuplja se u hrpu sa blagim nagibom. Reagens za ispiranje (razrijeđena sumporna kiselina) raspršuje se kroz prskalice na vrh hrpe i pusti da procuri kroz hrpu, gdje se otapa bakar iz rude. Dobivena otopina luženja sumporne kiseline i bakrenog sulfata sakuplja se u malom bazenu. Nakon navedenog postupka otopina sadrži bakar u koncentracijama između 60-70% [6].

Drugi je korak ekstrakcija otapalom. Tu se miješaju dvije tekućine koje se nakon miješanja ostavljaju da se odvoje, zbog čega se bakar pomiče iz jedne tekućine u drugu. Bakar prelazi iz

otopine luženja u otapalo. Tada se dvije tekućine razdvajaju na temelju topljivosti, pri čemu bakar ostaje u otopini u otapalu, a nečistoće ostaju u otopini luženja. Preostala otopina luženja zatim se pročišćava, dodavanjem dodatne kiseline i povratom u prskalice u procesu ispiranja rude. Posljednji je korak elektroliza otopine, odnosno postupak elektrolitičke rafinacije. Električna struja prolazi kroz inertnu anodu (pozitivnu elektrodu) i kroz otopinu bakra iz prethodnog koraka, koja djeluje kao elektrolit. Pozitivno nabijeni ioni bakra (zvani kationi) izlaze iz otopine i lijepe se na katodu (negativnu elektrodu) kao 99,99% čisti bakar [7,8].

Cjelokupni prikaz hidrometalurškog postupka prikazan je shemom na slici 8.



Slika 8. Hidrometalurški postupak [9]

#### 2.4. Prerada sulfidne rude

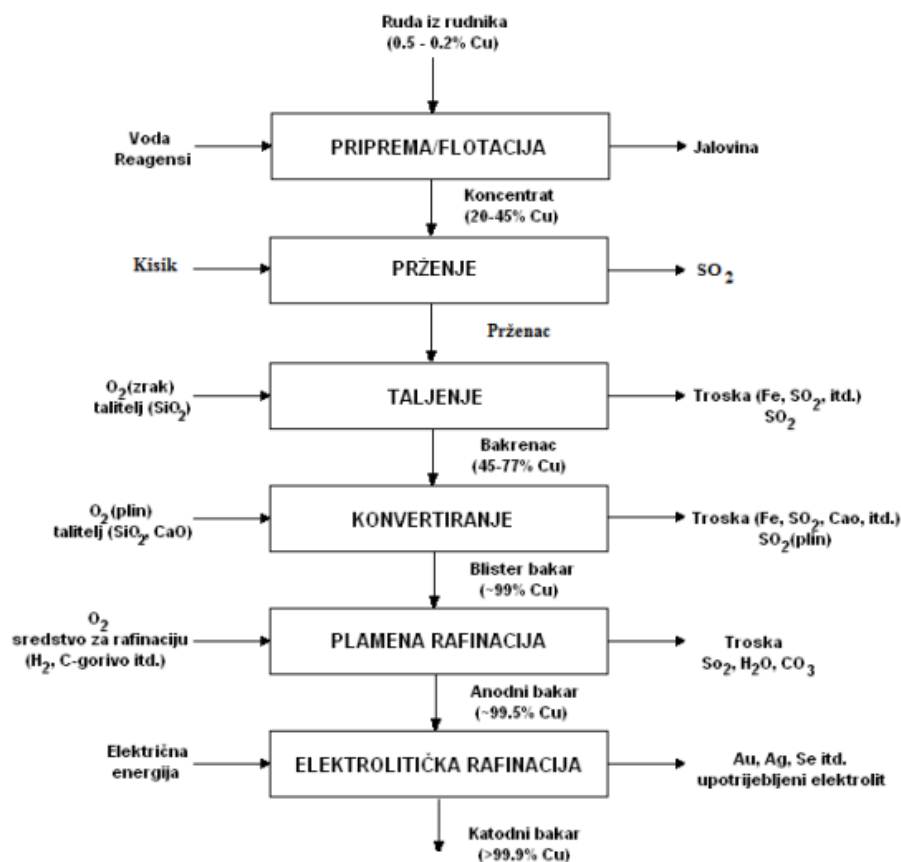
Sulfidne rude uglavnom se obrađuju pirometalurgijom, ekstrakcijom i pročišćavanjem metala postupcima koji uključuju primjenu topline. Ovaj postupak koristi niz fizičkih koraka i visokih temperatura za ekstrakciju i pročišćavanje bakra iz ruda bakrenog sulfida, u pet koraka:

1. Flotacija,
2. Prženje,
3. Taljenje,
4. Konvertiranje
5. rafinacija

Nakon rudarstva, transporta i drobljenja do konzistentne veličine šljunka ili loptice za golf, usitnjena ruda dalje se obrađuje u mlinu pomoću sekundarnih drobilica i reducira u kamenčiće

te na kraju u sitni pijesak. Nakon drobljenja bakrene rude dodaje se tekućina koja daje kašu. Kaša je mješavina vrijednih minerala rude bakra i "bezvrijednih" elemenata iz rude. Kaša se stavlja u spremnik te postupkom pjenaste flotacije odvaja bakar iz kaše. Kemijski reagensi nazvani "sakupljači" dodaju se u kašu i vežu se za čestice bakra čineći ih hidrofobnima. Zrak se upuhuje na dno spremnika kako bi se stvorili mjehurići koji se podižu na površinu te za sobom povuku vodonepropusne čestice bakrenog sulfida. Pjena bakra bogata mjehurićima na vrhu spremnika uklanja se za daljnju obradu [2, 7].

Sljedeći stupanj nakon pjenaste flotacije je stupanj zgušnjavanja. Pjena se ulijeva u velike spremnike koji se nazivaju zgušnjivači. Mjehurići se lome i krutine iz pjene talože se na dnu spremnika. Krutine se zatim filtriraju kako bi se uklonila suvišna voda, koja se može ponovno koristiti u preradi dodatnih serija rude sulfida. Konačni proizvod stupnja zgušnjavanja kombinacija je 30% bakra i ostalih metala; taj koncentrat bakra se zatim šalje u topionicu [7]. U topionici se koriste visoke temperature za pročišćavanje rude u više koraka topljenja. Koncentrat bakra prvo se šalje kroz peć za topljenje da se zagrije do 1260°C i kao takav ulijeva se u peć za taloženje troske. Ovim se korakom dobiva kombinacija, smjese bakra, sumpora, željeza i troske. Takav bakreni koncentrat sadrži 58-60% bakra. Zatim se rastopljeni koncentrat odvodi u drugu peć koja se naziva konvertor kako bi preostalo željezo i sumpor izgorjeli i dobiva se proizvod koji se naziva blister bakar koji sadrži 98% bakra i odvozi se u topionicu na taljenje [7]. Blister bakar je žute boje ali kada kisik u bakru izgori, on dobiva plavo-zelenu boju. Dobiveni proizvod, rastopljeni anodni bakar, ulijeva se u kalupe koji se nazivaju anodno lijevane ploče. Ohlađene anodne ploče su 99% čisti bakar. Na slici 9 prikazan je cjelokupni pirometalurški postupak proizvodnje bakra [2].



Slika 9. Pirometalurški postupak [10]

Ploče bakarne anode se zatim pročišćavaju u završnom koraku koji se naziva elektroliza. Anodne ploče obješene su u veliki spremnik pun otopine elektrolita od bakrenog sulfata i sumporne kiseline. Tanki listovi čistog bakra, koji se nazivaju katodama i teže oko 15 kilograma, obješeni su između anoda. Na anode se priključi električna struja, a pozitivno nabijeni ioni bakra (kationi) napuštaju anodu i kreću se kroz otopinu prema katodi. Ostali metali i nečistoće ostaju na anodama te padaju na dno spremnika ili ostaju u elektrolitu. Te se nečistoće sakupljaju i mogu se rafinirati kako bi se dobili drugi metali poput srebra i zlata. Proces je dugotrajan i nakon 14 dana elektrolize, anode su gotovo nestale, a bakrene katode teže 375 kilograma i sadrže 99,99% čistog bakra. Katode se izvade iz spremnika i isperu vodom kako bi se spriječila daljnja reakcija. Od gotovih bakrenih katoda, prikazanih na slici 10, mogu se napraviti žice, ploče, cijevi i drugi bakreni proizvodi [7].



Slika 10. Katodni blokovi bakra [11]

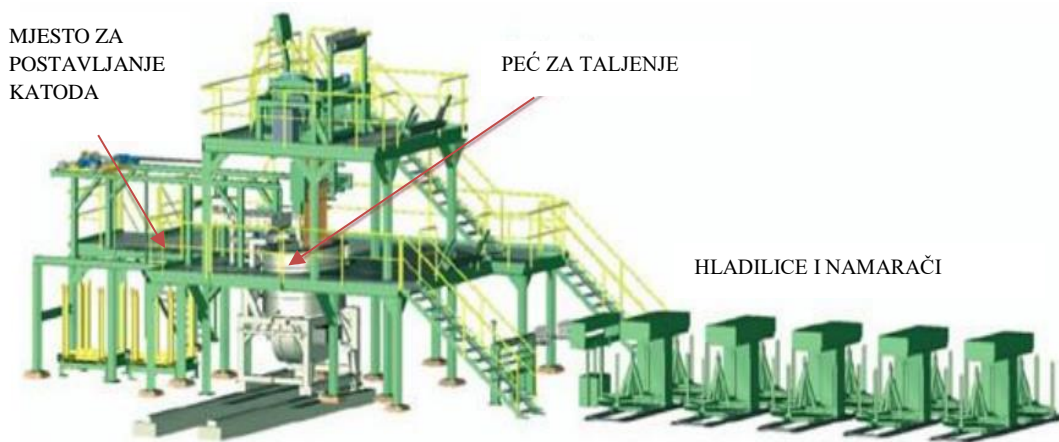
## 2.5. Proizvodnja bakrene žice

Dobiveni katodni blokovi iz ekstrakcije i dobivanja bakra ponovno se pretaljuju i lijevaju u bakrene šipke iz kojih se kasnije postupcima provlačenja dobivaju bakrene žice određenih dimenzija. Najčešći postupci kojima se proizvodi bakrena žica su Contirod, Dip Forming koji zahtijevaju toplinsku obradu dok postupak UPCAST ne zahtjeva toplinsku obradu [12].

U ovom diplomskom radu za eksperimentalni dio koristili smo upravo žicu, šipku proizvedenu UPCAST postupkom te iz tog razloga navedeni postupak je detaljnije opisan u ovom diplomskom radu.

## 2.6. UPCAST postupak lijevanja

UPCAST postupak je sustav proizvodnje šipke i cijevi vrhunske kvalitete za različite primjene te je prikladan za postrojenja malih i srednjih kapaciteta proizvodnje. Proces je jednostavan s lakim upravljanjem putem naprednog upravljačkog sustava. UPCAST linije prilagođene su tako da zadovolje različite potrebe svakog kupca, a osnovne komponente su sustav peći i stroj za lijevanje, takav jedan sustav prikazan je na slici 11. Dizajn sustava peći je po principu Rautamedove tehnologije koja se bazira na zaštiti taline posipavanjem ugljena po vrhu taline ili zaštitom s inertnim plinovima. Rautamedova metoda se pokazala najboljom metodom u svijetu za taljenje, držanje i lijevanje bakrenih materijala pri čemu se zagrijavanje taline provodi indukcijski sa sklopovima koji osiguravaju iznimno stabilne temperaturne režime postupka [13, 15].

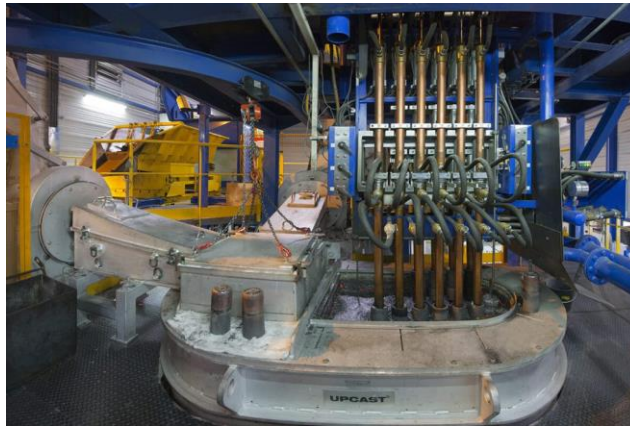


Slika 11. UPCAST postrojenje [15]

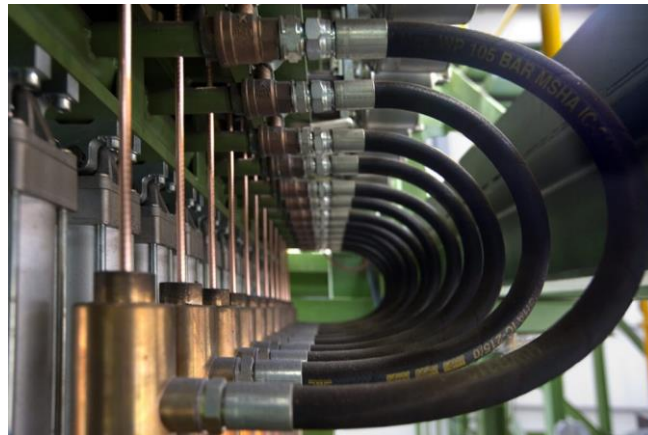
Sirovine za UPCAST postupak su bakrene katode. Katode su najčešće sirovine za ovaj postupak ali uz njih je moguće koristiti i reciklirani bakreni otpad. Reciklirani bakar mora biti što čišći i kao takav zahtjeva duže vrijeme zadržavanja u peći za taljenje prije samog procesa lijevanja te se iz tog razloga preporuča upotreba zasebnih peći za taljenje bakrenog otpada [13].

Sirovine se u peći ulažu ili mehaničkim putem ili robotiziranim sustavima ulaganja u peći. Katode se ispuštaju u indukcijske peći jedna po jedna zbog održavanja razine taline. Na vrhu taline se nalaze ugljene pahuljice koje sprječavaju reakcije sa kisikom iz atmosfere. U talinu osim katoda uranjaju se i grafitne cijevi hladene vodom izvana koje služe za izvlačenje taline vertikalno u 12 niti promjera 8 mm. Visina cijevi u talini regulira se automatski, a ona ovisi o količini taline [15]. Talina se izvlači pomoću „lovca“ na koji se lijepi rastaljeni bakar te cijevi koje su smještene iznad indukcijskih peći gdje se hladi, te se kruta žica zatim provlači dalje pomoću rotirajućih valjaka do namatača. Promjer grafitnih cijevi određuje promjer žice, pa tako iz peći prema namatačima ide već gotova žica. Spuštanjem i dizanjem grafitnih cijevi uronjenih u talinu može se regulirati kapacitet lijevanja, jer se može koristiti proizvoljan broj žica od 1 do 12 komada [14]. Cijevi za izvlačenje i hladila izvedeni su tako da se pojedinačno mogu mijenjati te provesti remontni radovi, bez da se procesi zaustavljaju. Žica da bi postala kruta mora se

ohladiti na temperaturu od  $60^{\circ}\text{C}$  i kao takva se pomoću koračnih motora izvlači kroz par rotirajućih valjaka. Sustav izvlačenja i hlađenja prikazan je na slici 12 i 13 [13, 15].



Slika 12. Vertikalno povlačenje žice [13]



Slika 13. Vučena žica sa sustavom za hlađenje [13]

Žice se sustavom vodilica dovodi do 12 namatača koji bakrenu žicu namataju na kolute kao što je prikazano na slici 14. Brzina namatanja ovisna je o brzini izvlačenja žice iz taline. Debljina namatane žice se regulira tako da nastaju ravnomjerno složeni navoji, a kad se kolut napuni, žica se prereže i kolut makne. Koluti bakrene žice teže između 3 i 4 tone i koriste se dalje u postupku provlačenja. Treba napomenuti da je to najčešći kontinuirani postupak proizvodnje bakrene žice za proizvodnju vodiča [14, 15].



Slika 14. Koluti proizvedene žice [16]

Kontinuiranim UPCAST postupkom, ne samo tim nego i ostalim navedenim postupcima koji uključuje topljenje, lijevanje, valjanje, čišćenje, pakiranje proizvedena je bakrena šipka ( žica od 8 mm kao na slici 15.), te na takvoj žici mora se još dodatno provesti plastično deformiranje koje nam daje za rezultat bakrenu žicu određene redukcije.



Slika 15. Bakrena žica 8mm proizvedena UPCAST postupkom [17]

## 2.7. Tehnologija provlačenje bakrene žice

Nakon proizvodnje bakrene šipke, proces proizvodnje bakrene žice odvija se naknadnom obradom plastične deformacije šipke postupkom provlačenja kroz matrice pri čemu dolazi do smanjenja poprečnog presjeka i produljenja žice ali i do bolje kvalitete površine te veće točnosti dimenzija proizvoda. Tehnologija provlačenja žice se provodi u hladnom stanju pri čemu je potrebno nakon određenog stupnja redukcije provesti toplinski postupak žarenje da bi se uklonila unutarnja naprezanja u žici [18, 19].

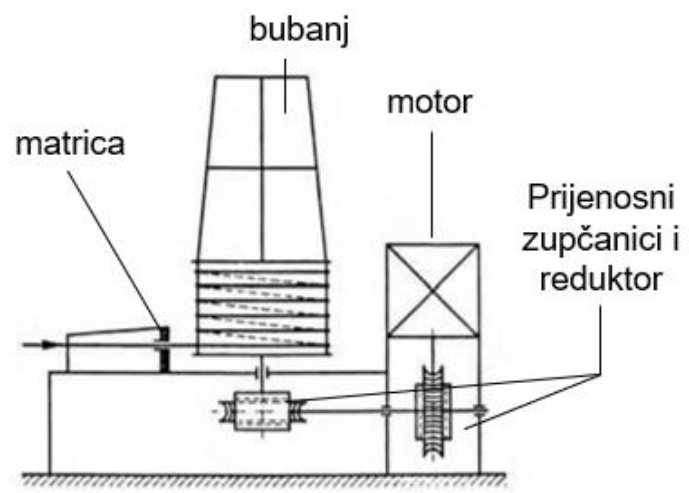
Tehnološki postupak provlačenja se sastoji u kemijskoj pripremi, kovanju jednog kraja uložka na dimenziju manju od promjera izlaznog kanala matrice, provlačenju kroz matricu, toplinskoj obradi i na kraju ispitivanja, pakovanja i skladištenja proizvoda [20, 21].

Prije provlačenja potrebno je provesti obradu početnog dijela žice. Obrada se radi iz razloga što je početni dio žice veći od ulaznog, prihvatnog dijela matrice te je potrebno da početni dio prođe dužinu cijele matrice do stroja za vučenje žice. Navedena priprema početnog kraja žice najčešće se izvodi kovanjem, valjanjem ili posebnim alatima.

### 2.7.1. Strojevi za provlačenje

Provlačenje žice kroz matricu se radi pomoću strojeva koji povlače žicu. Strojevi za provlačenje svrstavamo u dvije osnovne skupine prema načinu izvedbi. Tako strojevi za provlačenje mogu biti jednostupanjski vučni strojevi i višestupanjski vučni strojevi [21, 22, 23].

Jednostupanjski vučni strojevi se nazivaju tako radi toga što se provlačenje provodi samo kroz jednu matricu, provodi se samo jedna redukcija na komad. Ovi strojevi kao što je prikazano na slici 16 se sastoje samo od jedne matrice, bubnja za namotavanje reducirane žice, motora koji okreće bubanj određenom brzinom te sklopova sa zupčanicima i reduktorima za prijenos mehaničke energije od motora do koluta [22].



Slika 16. Jednostupanjski stroj za provlačenje [22]

Jednostupanjski strojevi koriste se za provlačenje žica i okruglih profila u dimenzijama od 4 do 25 mm. Ovo su najčešće korišteni strojevi za provlačenje tankih žica u manjim postrojenjima. Osim ostvarivanja redukcija koriste se i za kalibriranje točnosti konačnih dimenzija žice [23].

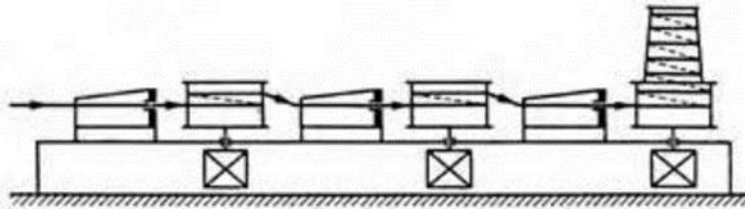
Kod višestupanjskih strojeva provodi se provlačenje s upotrebom više matrica u nizu jedna iza druge. Zato se to naziva kontinuirani proces provlačenja žice. Dakle, kod višestupanjskih strojeva radi se sa tri ili više matrica, svaka matrica ima drugi stupanj redukcije te se tako ovisno o stupnju redukcije postavlja i broj matrica za provlačenje. Princip postupka višestupanjskog provlačenja je takav da nakon provedene prve redukcije na žicu, žica se namotava na bubanj te nakon nekoliko navoja se umeće u sljedeću matricu sa većom redukcijom i tako na sljedeći bubanj i matricu sve do posljednje. Sila koja se postiže za vučenje žice kroz matice se dobiva preko elektromotora koji okreće bubnjeve sa žicom. Također kao i jednostupanjski sastoje od matrica ali više njih, više bubnjeva za namotavanje žice te više motora za pokretanje koluta.



Kod većeg broja operacija vučenja, odnosno kod višestupanjskog vučenja potrebno je predvidjeti međuzarenja zbog očvršćivanja materijala u toku procesa obrade. Na taj način se materijalu vraćaju plastične osobine i sposobnost za daljnju obradu [22, 23].

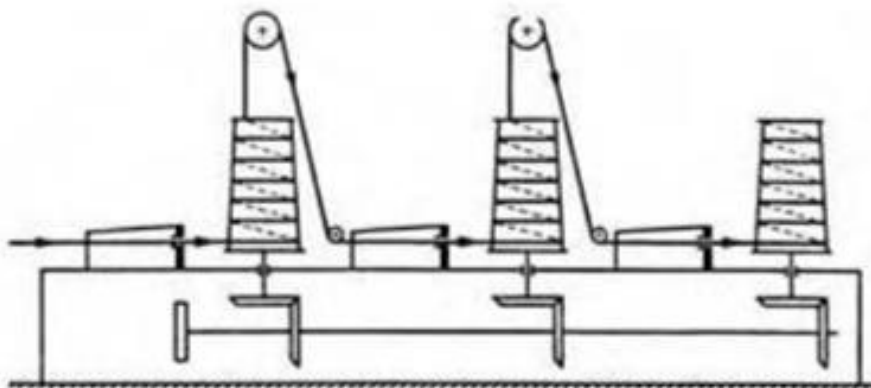
Višestupanjski vučni strojevi prema izvedbi mogu biti s klizanjem, bez klizanja te strojevi s protuzatezanjem. Kod višestupanjskih vučnih strojeva najznačajnija je zakonitost konstantnosti volumena.

Kod višestupanjskih strojeva s klizanjem dolazi do klizanja žice po bubnjevima, a ono se ostvaruje ukoliko je brzina okretanja bubnja 3% veća od brzine dobivene zakonom konstantnosti volumena. Strojevi s klizanjem su preporučljivi za provlačenje obojenih metala, jer provlačenjem čeličnih materijala dolazi do velikih utjecaja trenja te uništavanjem bubnjeva za namotavanje. Iz navedenog, ova vrsta višestupanjskog stroja za provlačenje je preporučljiva za provlačenje bakrenih žica te je prikazan na slici 17. Brzine provlačenja kod ovih strojeva je oko 60 m/s te se najčešće provode redukcije od 30-40% [22].



Slika 17. Višestupanjski stroj za provlačenje s klizanjem [22]

Što se tiče višestupanjskih vučnih strojeva za provlačenje bez klizanja najznačajnije je to što se reducirana žica namotava u određenom broju navoja na bubnjeve nakon svakog provlačenja, to možemo vidjeti na slici 18. Namotaji služe kao rezerva ukoliko dođe do odstupanja u brzinama bubnjeva koje su određene zakonom konstantnost volumena. Nedostatak ove izvedbe je uvrtnje žice, a primjena je uglavnom za izvlačenja čeličnih žica [22].



Slika 18. Višestupanjski stroj za provlačenje sa sustavom bez klizanja [22]

Višestupanjski strojevi s protuzatezanjem rade na principu istovremenog djelovanja vlačne sile na ulazu u matricu i na izlazu iz matrice. Ovim načinom rada stroja olakšava se provlačenje, smanjuje se pritisak na samu matricu ali i njeno trošenje. Strojevi se sastoje od niza matrica

između koje se također kao i kod prethodnih strojeva nalaze bubnjevi za namatanje, ali sada sa namatačima koji „guraju“ žicu u matricu [22].

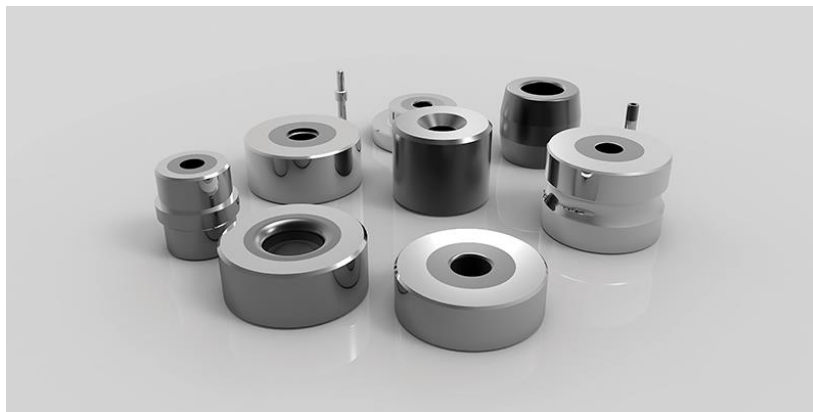
## 2.7.2. Glavni parametri obrade koji utječu na kvalitetu vučene žice

Parametri koji utječu na postupak provlačenja su:

- Matrice
- Optimalni kut matrice
- Tlak matrice
- Vijek trajanja matrice i izdržljivost
- Konstantnost volumena
- Sile i energije provlačenja
- Učinak trenja
- Suvišna deformacija
- Toplinski učinci [22, 23]

### 2.7.2.1. Matrice

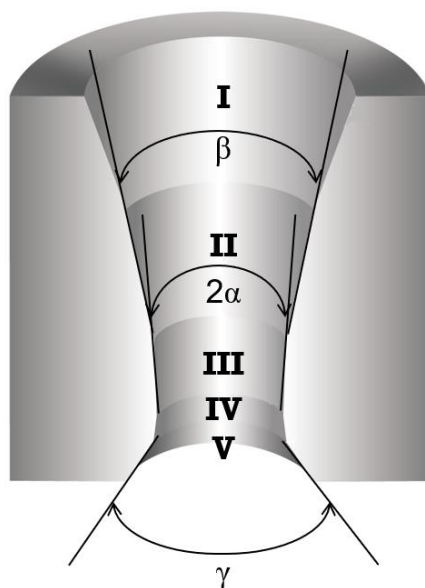
Osnovni alati za provlačenje žica su matrice. Matrice su alati koji imaju početni promjer veći od izlaznog promjera te se tim načinom provlačenja žici smanjuje poprečni presjek, a to se zove redukcija. Uglavnom su napravljene od dva dijela, radni dio i konstrukcijski dio. Radni dio je od tvrdih i izdržljivih materijala poput cementiranih karbida Ti, W, Ni, Mo, Ta, Hf, V ili polikristalnih dijamanta za fine žice te je u konstantnom kontaktu sa komadom koji se provlači. Konstrukcijski dio je od metala te služi za prihvat u strojeve. Mogu biti raznih profila kao što se vidi na slici 19 [24].



Slika 19. Matrice [26]

Matrice mogu biti ne samo okrugle nego i pravokutne, šesterokutne, trokutaste ili u posebnim oblicima ovisno o namjeni proizvoda, ali uglavnom za provlačenje žica koriste se matrice okruglog presjeka.

Matrice su osnovni alat o čijoj izvedbi ponajviše ovise svi ostali parametri vučenja, slika 20.



Slika 20. Zone u matricama [22]

Matrice se sastoje od pet područja:

- I – ulazna zona, ima zaobljen (sferičan) oblik.
- II – zona za podmazivanje, s ulaznim kutom  $\beta$  ( $40 - 60^\circ$ )
- III – zona deformacije, ima konusni oblik s kutom  $2\alpha$  ( $8 - 24^\circ$ )
- IV – kalibracijska zona (pojas za kalibriranje) ima cilindričan oblik
- V – izlazna zona, oblik konusa s kutom  $\gamma$  ( $60 - 90^\circ$ )

Ulazno područje obično je u obliku zvona koji ne dodiruje materijal. Njegova je svrha zajedno sa II zonom dovesti mazivo u matricu, kojim se kontrolira trenje između materijala i matrice te održava površinu matrice.

Zona III konusnog je oblika s kutom koji se normalno kreće od oko  $6^\circ$  do  $20^\circ$ . Tu se provodi glavni dio deformacije i vučeni materijal poprima svoj konačni presjek. Površina dodira određuje konačnu dimenziju žice. Nakon toga slijedi kalibracijska zona IV, gdje se ostvaruju konačne dimenzije i polira površina kako bi se dobila što viša kvaliteta proizvoda. Izlaz iz matrice je područje V iz kojeg izlazi gotovi proizvod. Ima konusni oblik kako bi se smanjio pritisak u radnom djelu matrice i omogućio lakši izlaz vučenog proizvoda.

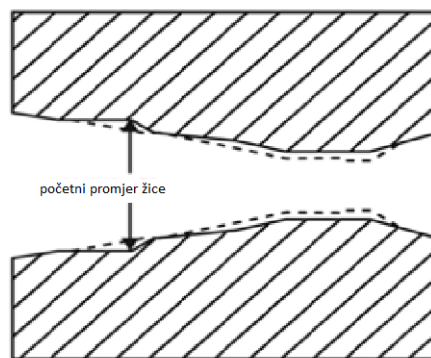
Strojevi za izvlačenje mogu se složiti u tandemu tako da se žica koja dolazi iz jedne matrice namota na dovoljnu dužinu prije nego što se ponovo unese u sljedeću matricu i tako dalje, a pri tome nema promjene u volumenu [22, 24].

Odabir odgovarajućeg kuta matrice presudan je za uspjeh bilo kojeg postupka provlačenja žice. Na temelju činjenice da se trenje povećava sa smanjenjem kuta matrice, a sila povećava s povećanjem kuta matrice, trebao bi postojati optimalan kut pristupa, a to je onaj kut koji minimizira i trenje i silu izvlačenja. Iskustveni podaci pokazuju da se ravnoteža funkcionalnog rada može postići pravilnim odabirom kuta matrice. Uz minimaliziranje zahtjeva za silom, optimalni kut matrice također će osigurati poboljšanu kvalitetu površine i završnu obradu [13].

Geometrija radnog dijela (pristupna zona) matrice ključni je čimbenik provlačenju žice, a definira se delta faktorom ( $\Delta$ ). To je omjer kružnog luka koji se proteže preko središnjih točaka površine matrice i duljine kontakta između žice i matrice [24].

Niske vrijednosti  $\Delta$  ukazuju na veće učinke trenja i površinsko zagrijavanje zbog duljeg kontakta žice u zoni prilaza. Veće vrijednosti  $\Delta$  ukazuju na povećanu razinu suvišnih deformacija i površinskog otvrdnjavanja uslijed pretjerane promjene smjera tijekom protoka kroz matricu. Veliki  $\Delta$  često rezultira većom tendencijom stvaranja praznina i pucanja središta. Delta vrijednosti 1,50 dobro se izvode u mnogim komercijalnim operacijama izvlačenja, dok delta faktore veće od 3,0 treba općenito izbjegavati [24].

Dvije primarne varijable koje kontroliraju radni vijek matrice za provlačenje bilo kojeg postupka oblikovanja metala su tlak i temperatura. Tlak koji djeluje na matricu kod žičanog izvlačenja znatno je niži od onog koji se može naći u drugim operacijama hladnog oblikovanja, poput hladnog prešanja i istiskivanja. Pored toga, temperatura je često mnogo kritičniji čimbenik u kontroli životnog vijeka matrice. Maksimalno trošenje (mjereno u gubitku volumena) obično se događa na mjestu na kojem žica u početku dodiruje matricu. U tom području formira se duboki prstenasti krater, koji se naziva "habajući prsten", slika 21.



Slika 21. Formiranje habajućeg prstena [22]

Jednom kada se razvije habajući prsten, može doći do deformacije prije dodirne točke na matrici za provlačenje. To se naziva "ispupčenje" i uspostavlja kontakt na mjestu habanog prstena u matrici. Izbočenje koje se dogodi na početnoj točki dodira u matrici ograničava ulazak maziva u matricu i ubrzava njezino trošenje. U pravilu, materijali koji imaju visoku otpornost tečenju otporniji su na habanje. Međutim, nedavna istraživanja pokazala su da tvrdoća matrice ne kontrolira trošenje matrice, tj. povećanje tvrdoće materijala matrice ne dovodi do značajnog povećanja vijeka matrice. Istraživanje predviđanja vijeka matrice koje se temelji na fizičkim svojstvima žice i matrice za izvlačenje do danas nije bilo uspješno [24].

### 2.7.2.2. Brzina provlačenja

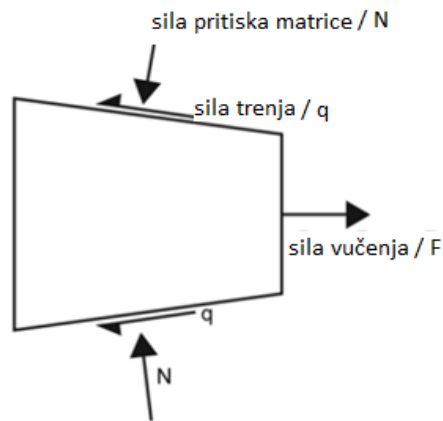
Iako se činjenica da se volumen ne gubi tijekom deformacije, to je zapravo vrlo koristan koncept koji čini osnovu za analizu brojnih problema provlačenja. Jedna od najčešćih primjena uključuje određivanje brzine žice na različitim klupama i potrebne brzine strojeva. Jednostavno rečeno, konstantnost volumena navodi da volumetrijska brzina žice koja ulazi u matricu mora biti jednaka onoj koja izlazi. Budući da se površina poprečnog presjeka smanjuje tijekom izvlačenja, potrebno je da žica mora povećavati brzinu da bi jednaka volumetrijska brzina materijala ulazila i izlazila iz matrice. Volumetrijska brzina definira se kao površina presjeka žice pomnožena s brzinom žice [24].

U više prolaznom provlačenju, brzina žice koja izlazi iz svake matrice mora se povećati tako da volumetrijska brzina protoka metala bude jednaka kod svih matrica. Stoga se klupe, koje imaju kutnu brzinu jednaku brzini izlazne žice, koriste za izvlačenje žice kroz matricu nakon svakog smanjenja. Ako se to ne učini, žica će se prekinuti zbog nejednake napetosti između matrica. Budući da brzina mora biti jednaka u svim točkama, brzina žice može se izračunati na bilo kojem srednjem postolju kada se zna brzina dolazne žice na prvom postolju.

Promjer žice se povećava ukoliko se habanjem matrica istroši, stoga će se na temelju konstantnosti volumena, brzina žice smanjivati kako se matrice povećavaju. Ako se linearna brzina povlačenja vučnih klupa prilagodi veličini žice, brzina vučenja će biti brža od brzine žice kako se promjer žice povećava. Ova povećana brzina izvodit će veliko vlačno naprezanje na žicu, što dovodi često do pucanja žice [24].

### 2.7.2.3. Sile i energije provlačenja

Iako se može činiti da bi se sile u provlačenju mogle analizirati jednostavnim sabijanjem, uvjeti deformacije u žici su zapravo puno složeniji zbog tlačnih i vlačnih sila koje stvara površina matrice. Sila povlačenja,  $F$ , predstavlja ukupnu silu koja se mora primijeniti na blok matrice kako bi se prevladalo trenje na površini matrice i otpor materijala koji se deformira. Budući da se sila vučenja prenosi nepodržanim materijalom, sila vučenja mora biti ograničena da se spriječi pojava bilo kakvih plastičnih deformacija izvan matrice. Praksa vučenja obično ograničava natezanje na 60% granice tečenja vučene žice [24]. Na slici 22 možemo vidjeti koje su to sile i u kojem smjeru djeluju sile prilikom prolaska žice kroz matricu.



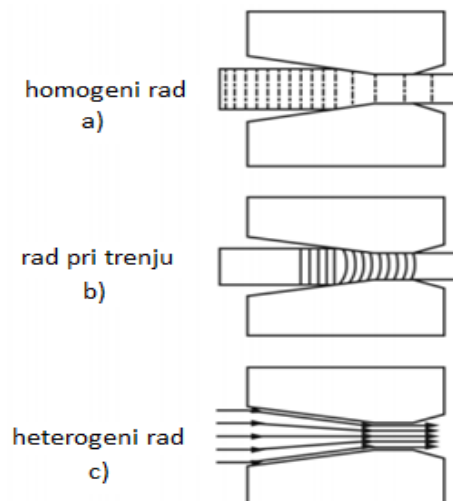
Slika 22. Utjecaji sila prilikom provlačenja [24]

Iako se čini da se rad ili energija potrošena na provlačenje žice sastoji od materijala i utrošene energije smanjenja, stvarna potrebna količina u praksi je znatno veća. To je rezultat neučinkovitosti koja postoji tijekom deformacije, a ona se prvenstveno regulira kutom prihvata žice. Takve neučinkovitosti ne daju nikakav koristan doprinos smanjenju površine presjeka i općenito služe samo za povećanje energetskih zahtjeva i nepovoljan utjecaj na kvalitetu žice [24].

Ukupan rad potrošen na provlačenje može se podijeliti na tri komponente, slika 23.

To su:

- (a) korisni (homogeni) radovi potrebni za smanjenje poprečnog presjeka,
- (b) radovi potrebni za prevladavanje otpora trenja i
- (c) suvišni (heterogeni) radovi potrebni za promjenu smjera protoka,



Slika 23. Podjela tipova rada prilikom provlačenja žice kroz matricu [24]

Prekomjerni rad i trenje negativno utječu na svojstva žice, uz povećanje energije potrebne za izvlačenje. Jedna posljedica je da mehanička svojstva neće biti homogena po presjeku žice. Budući da su uslijed trenja veći iznosi deformacije koncentrirani u blizini površine žice, to će rezultirati i većim razinama očvršćivanja deformacijom u površinskim slojevima. Također,

suvišna deformacija nepovoljno utječe na duktilnost. Duktilnost je obrnuto povezana sa vrstom materijala, stoga suvišna deformacija također djeluje na ograničavanje broja prolaza i maksimalno smanjenje koje se može poduzeti prije žarenja. Čak i ako to ne dovodi do problema u provlačenju, duktilnost može dovesti do pucanja u sljedećim procesima oblikovanja kao što je npr. savijanje [24].

To povećano naprezanje, odnosno očvršćivanja u površinskim slojevima potpomaže i trenje. Slojevi na površini žice ne samo da će doživjeti promjenu presjeka, već će se i deformirati u smicanju zbog otpora koji predstavlja površina matrice u kontaktu s vučenim materijalom. To između ostalog izaziva i tzv. suvišnu deformaciju. Suvišna deformacija, poput deformacije trenja, neće biti ravnomjerno raspoređena po žici i bit će maksimalna na površini s odgovarajućim povećanjem tvrdoće. Prekomjernu deformaciju potiču veći kutovi matrice budući da će materijal udaljeniji od središnje crte pretrpjeti oštriju promjenu smjera od materijala u blizini središnje crte i doživjet će veće razine izobličenja. Na temelju studija razdvojene žice i rendgenske difrakcije, suvišna deformacija utječe na razinu preostalog naprezanja u vučenoj žici [24].

Čak i za visoko polirane površine matrica i kada se koristi podmazivanje, bit će prisutan određeni rad trenja. Frikcijski rad dominira pri malim kutovima matrica gdje je površinski otpor povećan kao rezultat veće duljine kontakta u zoni prilaza za određeno smanjenje. Rad na trenju može se smanjiti korištenjem većeg kuta približavanja i, u manjoj mjeri, poboljšanjem podmazivanja ili stanja površine matrice. Iako su sile trenja također povezane s opterećenjem tlakom, obično se trenjem kontrolira ograničavanje smanjenja. Umjesto toga, uobičajena je praksa optimizirati kut prilaza i učinkovitost podmazivanja. U praksi se koeficijent trenja  $\mu$  obično kreće od 0,01 do 0,07 za suho izvlačenje i 0,08 do 0,15 za mokro izvlačenje. Osim stanja površine i podmazivanja, koeficijent trenja obrnuto je povezan s brzinom provlačenja. Eksperimentalno istraživanje provlačenja pokazalo je da je koeficijent trenja značajno opao povećanjem brzine provlačenja [24].

#### **2.7.2.4. Utjecaj zagrijavanja tijekom provlačenja**

Kontrola temperature kritično je pitanje provlačenja žica i često se pokazuje kao ograničavajući čimbenik u pogledu produktivnosti u postupcima s više matrica. Nedostatkom bilo kakvog hlađenja, porast temperature u komercijalnim postupcima izvlačenja može lako prijeći nekoliko stotina stupnjeva.

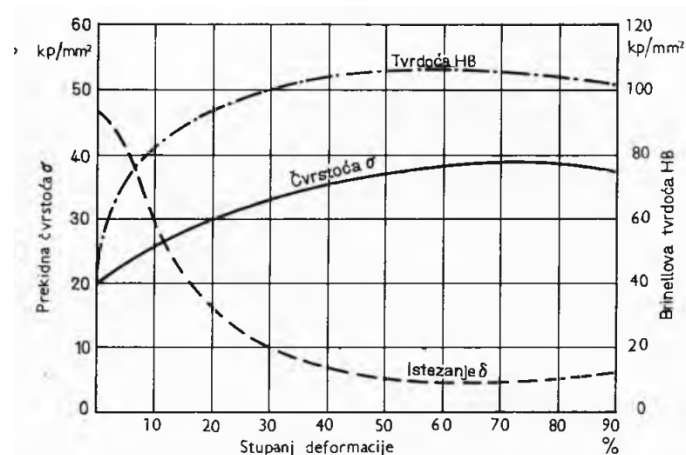
Prilikom toplinskih utjecaja dolazi do promjene svojstava. Tako prilikom toplinske obrade bakra i njegovih legura toplina utječe na čvrstoću, tvrdoću, duktilnost, vodljivost, otpornost na udarce i neelastičnost žice [25]. Ako se temperatura ne kontrolira, toplina može negativno utjecati na svojstva žice, učinkovitost podmazivanja, stanje površine, kao i ubrzati trošenje kalupa. Kontrola porasta temperature pri provlačenju posebno je važno za žice s visokim deformacijskim otporom gdje veća naprezanja tečenja generiraju više topline. Ne iznenađuje što će toplinski učinci varirati u presjeku žice, budući da je većina izražena na površini kao posljedica trenja i suvišnih deformacija. Nadalje, ovo također može promovirati nepovoljne

uzorke zaostalog naprezanja zbog rezultirajućeg nejednolikog toplinskog širenja. Iako je dobro poznato da se temperatura žice povećava s brzinom izvlačenja, zagrijavanje u žici zapravo je neovisno o brzini. Ako se žica ne ohladi na sobnu temperaturu nakon svakog provlačenja, toplina će se nakupiti na svakom sljedećem ulazu u matricu te će porasti. Međutim, u postupcima s jednom matricom, porast temperature je obično prenizak da bi imao značajan učinak.[24, 25] U postupcima s više matrica, toplina se nakuplja na svakoj matrici, a porast temperature može postati dovoljno visoka da utječe na provlačenje i svojstva žice, posebno pri većim brzinama provlačenja. Toplina nastaje prvenstveno radi deformacije (redukcije) i klizanja (trenja) na površini matrice. Adijabatsko zagrijavanje proporcionalno je količini deformacije stoga su grijanje i temperature na površini žice veće nego na središnjoj liniji. Stoga se može očekivati da će najtoplije mjesto u matrici biti na spoju prihvatnog i nosećeg područja gdje je deformacija najveća u matrici i dolazi do značajnog klizanja u prihvatnom području [24]. Kako sve navedeno utječe na konačnu kvalitetu proizvoda, vrlo je bitno imati dobru kontrolu vođenja procesa. Ovo je vrlo važno pri preradi bakrene žice za vodiče, gdje hladno očvršćivanje, temperatura, i nejednolika deformacija po presjeku direktno utječu na samu vodljivost žice.

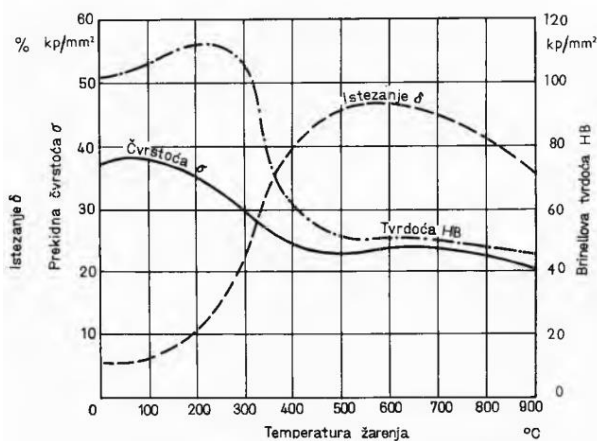
## **2.8. Mehanička i električna svojstva hladno vučene bakrene žice**

Od svih materijala za vodiče bakar ima najpovoljniju kombinaciju električnih i mehaničkih svojstava, što ga zajedno s njegovom prihvatljivom cijenom čini još uvijek najvažnijim materijalom za vodiče. Od svih svojstava bakra i njegovih legura svakako je najvažnije njihova specifična vodljivost. Dokazano je da postoji određeni utjecaj stupnja deformacije i samog postupka oblikovanja konačnog proizvoda na njegova mehanička i električna svojstva. Prvenstveno na električnu vodljivost koja je od primarne važnosti kod proizvodnje elektroničkih komponenti. S druge strane i mehanička svojstva proizvoda od bakra dobivenih postupcima hladne i vruće deformacije znatno se razlikuju. Pri hladnoj obradi bakra, npr. pri izvlačenju tankih žica, njegova se kristalna struktura prisilno usmjerava, u većoj ili manjoj mjeri, ovisno o stupnju deformacije, uslijed čega poraste mehanička čvrstoća i tvrdoća materijala, a smanjuje se postotno istezanje pri kidanju ( $\delta$ ). Te promjene prikazane su dijagramima na slici 24, za vodove koji služe za prijenos električne energije, ali tamo gdje su potrebna mehanička svojstva mekog bakra, kao i izoliranim vodičima [27].





Slika 24. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva bakra [27]



Slika 25. Utjecaj toplinske obrade na bakar [27]

Proizvodi dobiveni hladnim postupkom moraju se odžariti u području oko 400 °C (zavisno od stupnja prethodne deformacije, mase i debljine ili promjera proizvoda, sadržaju primjesa, vrsti peći itd.). Zbog osjetljivosti bakra prema kisiku iz zraka, atmosfera u pećima za zagrijavanje održava se inertnom (obično s pomoću vodene pare ili nekog inertnog plina). Osim hladnim postupcima, bakar se može obrađivati i postupcima vruće obrade, utjecaj toplinske obrade prikazan je dijagramom na slici 25. Kako bakar nije polimorfan, ne može se oplemenjivati postupcima toplinske obrade. Kada govorimo o vodičima, električna vodljivost bakra je ipak njegovo najvažnije svojstvo. Ona je prvenstveno ovisna o samoj čistoći bakra. Vrlo mali sadržaj primjesa u elektrotehničkom bakru može biti vrlo štetan, točnije naglo smanjiti vodljivost bakra. Zbog toga se pri njegovoj proizvodnji poduzimaju mjere da se taj sadržaj što više smanji. Koristi se vrlo slaba topljivost oksida bakra i primjesa u rastaljenom bakru: primjese se oksidiraju kisikom, pri tom se, radi sigurnosti, oksidacija nastavlja dok se oksidira i nešto bakra. Obično se održava vrlo mali sadržaj kisika (0,01 do 0,05%, najčešće u obliku bakrovog (I)-oksida), u rafiniranom bakru, unatoč što to također smanjuje njegovu vodljivost i uzrokuje sklonost vodikovoj bolesti. Temeljna oznaka elektrotehničkog bakra s malim sadržajem kisika u standardima je E-Cu [27].

Fizikalno svojstvo električne vodljivosti, odnosno električni otpor, vrlo je osjetljivo na mikrostrukturu materijala. Električni otpor u metalu obično je uzrokovan raspršivanjem elektrona zbog poremećaja u kristalnoj strukturi, uključujući nagle temperaturne promjene, nečistoće i nedostatke. Vrijednost zaostalog otpora obično ovisi samo o količini i koncentraciji nečistoća u čistom metalu [27, 28]. Na otpor ne utječe samo kisik, zarobljeni argon te mikropraznine, već utječu nedostatci u uzorcima poput odbojne sile između dviju dislokacija, ravnoteži udaljenosti između dislokacija. Promjena električne otpornosti povezana je s mikrostrukturnim varijacijama koje potječu iz granica zrna. Smanjenje vrijednosti površine granice zrna trebalo bi rezultirati promjeni koncentracije grešaka u granici zrna tijekom žarenja [28].

U posljednjih nekoliko godina, istraživanja usmjerena na svojstva elektroničkog transporta nanokristalnih linija (nc) i ultra-finih kristala (ufg), prvenstveno zbog velikih međufaznih volumenskih udjela kao i njihova neobična mehanička svojstva. Studije su pokazale da ugladenost zrna u submikrometarskim i nanometarskim veličinama dovodi do znatnog ojačavanja tamo gdje su granice zrna gušće te stvaraju prepreke za kretanje dislokacije. Međutim, prisutnost gušćih granica zrna u ufg i nc metalima rezultira smanjenjem vodljivosti. Na primjer, uzorci nc Cu pokazuju otpornost otprilike jednog reda veću od one žarenog grubozrnatog Cu na sobnoj temperaturi [29]. Značajno smanjena električna vodljivost u nc i ufg metalima, iako s poboljšanom mehaničkom čvrstoćom, onemogućava njihove tehnološke primjene za vodiče. Alternativne mikrostrukture trebaju imati visoku čvrstoću i dobru vodljivost, obje karakteristike su često potrebne istovremeno. Poput konvencionalnih granica zrna GB, koherentne granice zrna sraslaca (blizanaca) (CTB)- također mogu ometati kretanje dislokacija. Istraživanja ukazuju kako ultra-fini kristali bakra sadrži visoke koncentracije blizanaca koji pokazuju veliku vlačnu čvrstoću i tvrdoću. Čvrstoća raste s smanjenjem razmak zrna. Uvođenjem velike gustoće blizanaca u nanostrukturu dovodi do jedinstvene kombinacije izuzetno velike čvrstoće i visoka vodljivost u Cu. Takvo jačanje nanostrukture sraslanjem, blizančovanjem, a da se pri tome ne smanjuje vodljivost u metalima, posve se razlikuje od drugi tradicionalni pristupa očvršćivanju [29].

## 2.9. Očvršćavanje i električna vodljivost

Metode koje se koriste za očvršćavanje metala također općenito uzrokuju izrazito smanjenje električne vodljivosti, tako da se mora napraviti kompromis između vodljivosti i mehaničke čvrstoće. Čisti bakra s velikom gustoćom blizanaca nanorazmjernog rasta pokazuje vlačnu čvrstoću otprilike 10 puta veću od one od konvencionalnog grubozrnatog bakra, zadržavajući pritom električnu vodljivost usporedivu s onom čistog bakra. Izuzetno velika čvrstoća potječe od učinkovite blokade gibanja dislokacije brojnim koherentnim granicama blizanaca koje posjeduju izuzetno nisku električnu otpornost, što nije slučaj za druge vrste granica zrna.[29,30]

Za provođenje materijala u mnogim primjenama često su istovremeno potrebne visoka električna vodljivost i velika mehanička čvrstoća. Međutim, čisti metali s visokom vodljivošću poput Ag, Cu i Al vrlo su mekani. Jačanje metala kroz različite pristupe, uključujući legiranje

krutom otopinom, hladnu obradu, dovodi do izraženog smanjenja provodljivosti. Na primjer, legiranje čistog Cu može povećati čvrstoću dva ili tri puta, ali električna vodljivost legura Cu iznosi samo 10 do 40% provodljivosti čistog Cu [29, 31].

Čvrstoća krutine određena je otpornošću krutine na plastične deformacije, a osjetljiva je na njezin kemijski sastav i mikrostrukturu. Plastična deformacija konvencionalnih polikristalnih metala uglavnom se odvija pomoću kretanja i nagomilavanja dislokacija unutar rešetke pojedinih zrna. Razvijeno je nekoliko metodologija jačanja kako bi se ograničilo kretanje dislokacije. Na primjer, pročišćavanjem zrna uvodi se više granica zrna (GB), koje predstavljaju prepreku dislokacijskom kretanju, što otežava deformaciju materijala. Legiranje krutom otopinom ili uvođenje druge krute faze također su učinkoviti u stvaranju prepreka kretanju dislokacija unutar rešetke. Deformacijom dolazi do povećanja gustoće dislokacija što također rezultira očvršćivanjem, jer se stvara više dislokacija koje blokiraju daljnje aktivnosti same dislokacije. Svi ovi pristupi ojačanju, koji se temelje na uvođenju različitih vrsta defekata (GB, dislokacije, točkasti nedostaci ili faze ojačanja), također povećavaju raspršenje provodnih elektrona na tim defektima, povećavajući tako električnu otpornost metala [29, 30]. Disocijacije su energetski nepovoljne i zahtijevale bi koncentraciju napona na presjecima dvostrukog klizanja što dovodi do jačanja zrna blizanaca. Učinak jačanja zrna blizanaca djeluju kao snažne zapreke za gibanje dislokacija. Prema tome, blizanci se mogu smatrati unutarnjim preprekama kretanju dislokacija koje mogu imati učinak jačanja analogan učinku granice zrna [30].

Kod proizvodnje i prerade vodiča cilj je proizvesti vodič koji ima zadovoljavajuća mehanička svojstva uz zadržavanje što više vodljivosti električne energije. Ključ izrade jakih, ali vodljivih metala je pronaći odgovarajuću mikrostrukturu u kojoj se kretanje dislokacije blokira i da je rasipanje elektrona minimalizirano [15]. Poznato je da je granica blizanaca posebna vrsta koherentne granice koja je sposobna blokirati gibanje dislokacije, poput konvencionalnih granica zrna, ali električni otpor koherentnih granica blizanaca otprilike je za jedan red veličine niži od tog konvencionalnih grubozrnatih granica zrna [30, 32]. Stoga, ako metal sadrži veliku gustoću zrna blizanaca, očekuje se da će metal učinkovito ojačati bez gubitka visoke električne vodljivosti.

Istraživanja provedena na temu ojačanja metala pomoću blizanaca, pokazuju da prisutnost blizanaca blokira širenje kliznih ravnina, što implicira da se ponašaju manje-više poput granica zrna djelujući kao prepreka širenju dislokacija [30].

Istraživanja na hladno vučenoj bakrenoj žici ukazuju kako se tijekom toplinske obrade nakon vučenja, u Cu žici javljaju kristali blizanaca. To se povezuje sa popuštanjem mikronaprežanja koje se javlja uslijed velikih gustoća dislokacija u kristalnoj rešetci, što inducira izuzetno izobličenje rešetke u blizini granice zrna. Da bi se dobile različite granice zrna, provodi se opuštajući tretman (žarenje) [32].

## 2.10. Žarenje i rekristalizacija bakrene žice

Žarenje je toplinski postupak obrade do određene temperature, držanjem određeno vrijeme, a zatim hlađenjem na sobnu temperaturu radi poboljšanja mehaničkih i fizikalnih svojstva žice. Žarenjem se također smanjuju unutarnja naprezanja te vodljivost bakrene žice [33]. Istraživanja različitih postupaka oporavka i procesa rekristalizacije pojašnjavaju njihov utjecaj na mikrostrukturu i razvoj teksture. Poznato je da za rast jezgre nukleusi moraju imati određenu veličinu, a to se postiže oporavkom dislociranih zrna. Za bakar kada je veličina istežanja mala sva zrna svih orijentacija imaju istu sposobnost rasta zrna, a rekristalizacija i njena struktura postaju izotropne jer dolazi do mehanizma sraslanja (blizančovanja) s nastajanjem novih orijentacija zrna. [34, 35]. Kada je veličina istežanja bakra velika, a ona se ostvaruje između ostalog i s visokim stupnjevima redukcije pri hladnom provlačenju, kristalna rešetka bakra se distorzira i usmjeri u smjeru provlačenja. Naknadnim zagrijavanjem dolazi do rekristalizacije i tekstura rekristalizacije je u biti sastavljena od komponenata kristalne rešetke plus orijentirani blizanci. U svim slučajevima, kada jezgra dosegne "kritičnu" veličinu, ona raste na štetu deformacije. Prema navedenom možemo zaključiti da pojava blizanaca može započeti već u prvoj fazi rasta zrna prije nego li se rekristalizacija završi [36].

Mnogi su istraživači istražili proces rekristalizacije i opisali orijentiranu nukleaciju i orijentirani rast te njihov utjecaj na razvoj mikrostrukture. Budući da tekstura i granična struktura zrna utječu na različita svojstva metala polikristalnih zrna, važno je bolje razumjeti te strukture. Pokazalo se kako relativno niska energija u sustavu (od niske razine plastične deformacije) motivira da se tijekom žarenja stvaraju blizanci i time poboljšavaju određena svojstva materijala. Tijekom stvaranja blizanaca pri rekristalizacijskom žarenju sveukupno dolazi do smanjenja ukupne granične energije sustava. Iz tih razloga uloženi je značajan napor u dizajniranju procesa koji promiču te granice, a žarenje se pokazalo najučinkovitijim [32,36].

Mehanizam formiranja žarenih blizanaca tijekom rekristalizacije i naknadni razvoj tijekom procesa rasta zrna još su u istraživanju. Tri su glavna mehanizma za stvaranje blizanaca koja su predložili neki istraživači.

Prva teorija mislila je da kristali već imaju blizanski odnos koji prijete tijekom rasta i zatim formirali blizance. Druga je da blizanac nastaje kada se izgubi sloj atoma na ravnini (111) zbog niske energije slaganja. Posljednja teorija pretpostavljala je da se granice zrna s većom energijom transformiraju u blizančevu i niže granice zrna.

S ciljem razumijevanja ponašanja prijevremene kristalizacije tijekom toplinske obrade, provedene su studije kako bi se utvrdio razvoj teksture i mikrostrukture u čistom bakru. Zaključeno je kako je mikrostrukturna evolucija tijekom procesa rekristalizacije presudna za finalna svojstva poput otpornosti na zamor, otpornost na koroziju i mehanička svojstva [37].

Iz svega može se zaključiti kako je za postizanje vodiča zadovoljavajućih svojstava, potrebno uzeti više faktora u obzir. S jedne strane Cu kao vodič je najoptimalniji, no pri preradi hladnim vučenjem dolazi do određenih strukturnih promjena koje narušavaju vodljivost. Za očekivati je da kod bakra dolazi do usitnjenja zrna i povećanja gustoće dislokacija, što iz prethodnih istraživanja pokazuje smanjenje vodljivosti. S druge strane istraživanja u literaturi pokazuju

sklonost stvaranja kristala blizanaca u strukturi bakra. Time se postižu optimalne vrijednosti mehaničkih osobina, uz zadržavanje visoke vodljivosti bakra.

Cilj je ovog istraživanja povezati mehanizme očvršćivanja, stvaranja kristala blizanaca i promjene u električnoj vodljivosti koji se javljaju u bakru, i to na primjeru proizvodnje električnih kablova u redovitoj proizvodnji. Pri tome se čisti elektrolitički bakar iz lijevane strukture hladnim provlačenjem preraduje u Cu žicu željene dimenzije. U tijeku proizvodnje provodi žarenje. Kroz strukturalna i mehanička ispitivanja promatrati će se utjecaj hladne deformacije na strukturne promjene. Provesti će se i mjerenje električne vodljivosti i snimiti će se strukture prije i nakon žarenja, kako bi vidjeli utjecaj žarenja na strukturne promjene i vrijednosti električne vodljivosti. Hipoteza je da tijekom žarenja dolazi do poništavanja dislokacija i stvaranja kristala blizanaca.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja su provedena na uzorcima iz bakrene žice u lijevanom stanju i nakon određene redukcije hladnim provlačenjem kroz matrice. Uzorci za ispitivanja su uzimani u tijeku proizvodnje bakrenih vodiča u firmi Eurocabel d.o.o. Bakrena žica je proizvedena UPCAST postupkom. Postupak se bazira na taljenju katodnih ploča bakra u indukcijskoj peći, te se naknadno UPCAST postupkom kontinuiranog vertikalnog lijevanja proizvodi žica debljine 8 mm. Istovremeno se lijeva 12 žica koje se namataju na kolute, slika 26.



Slika 26. Vučena žica namotana na kolute

Tako dobivena žica se posebnim sustavima odvodi do namatača gdje se namata u kolute određene mase i duljine te se hlade do sobne temperature. Nakon hlađenja koluti namotanih žica se dalje transportiraju na uređaje za provlačenje gdje se provodi kontinuirano hladno provlačenje žice, odnosno redukcije poprečnog presjeka do ciljane dimenzije žice, slika 27.



Slika 27. Strojevi za kontinuirano izvlačenje žice

### 3.1. Uzorci i uzorkovanje

Uzorci za eksperimentalni dio uzeti su nakon provlačenja za određeni stupanje redukcije, te prije i nakon postupka žarenja žice.

Uzorci za ispitivanja su uzimani u lijevanom stanju, nakon redukcija redom 24%, 46% i 67.5% u vučenom stanju. Pri ostvarivanju redukcije od 67,5% dobivena žica promjera 2.6 mm je vrlo čvrsta i kao takva nije primjenjiva za izradu vodiča. Stoga se u procesu proizvodnje podvrgava žarenju kako bi se omekšala i bila pogodna za daljnju upotrebu.

Žarenje žice se provodi u kontinuiranom procesu proizvodnje, na način da žica prolazi kroz komoru u kojoj se nalaze kotači spojeni na visoki napon. Prelaskom preko njih žica zatvara strujni krug, pri čemu uslijed prolaska struje kroz nju dolazi do zagrijavanja same žice. Pri tome se ostvaruju temperature između 500 °C i 700 °C na samoj žici između kotača, čime se vrši žarenje radi popuštanja i povećanja vodljivosti žice. U komori se nakon toga odmah vrši i hlađenje vodenom parom, nakon čega žica prolazi hlađenje vodenom emulzijom, te se na kraju suši komprimiranim zrakom.

Na svim uzorcima, u lijevanom stanju, nakon svake pojedine redukcije 24%, 46% i 67.5%, te nakon 67,5% redukcije i naknadnog žarenja, provedena su strukturalna ispitivanja i mjerenje tvrdoće bakrene žice.

### 3.2. Metalografska priprema uzorka

Uzorci za strukturalna ispitivanja uloženi su u vodljivu masu Conductomet postupkom vrućeg prešanja pod visokom temperaturom i tlakom pomoću uređaja za ulaganje Buehler Simplimet1000, uređaj je prikazan na slici 28. Ulaganje uzoraka prešanjem vodljive mase se odvija na temperaturi od 150°C u vremenu od 2,30 minuta te pri tlaku od 250 bara. Postupak se odvija prema sljedećem tijeku:

- 1: ulaganje uzorka na stalak namijenjen za uzorak
- 2: spuštanje uzorka u cilindar
- 3: zasipavanje uzorka vodljivom masom koja je u praškastom obliku, prah mora u potpunosti prekriti uzorak u cilindru
- 4: podešavanje tlaka, temperature te vrijeme prešanja
- 5: pokretanje, završavanje te vađenje uzorka iz preše



Slika 28. Buehler Simplimet1000 uređaj za pripremu uzorka za metalografsku analizu

Jedan od uzoraka nakon prešanja prikazan je na slici 29 te se on podvrgava daljnjoj obradi brušenja i poliranja.



Slika 29. Uzorak bakrene žice uložen u vodljivu masu

Brušenje i poliranje se provodi na uređaju Buehler „Phoenix Beta“ (slika 30 ). Brušenje je provedeno s različitim granulacijama brusnog papira (120, 400, 800 i 1200) uz konstantno hlađenje vodom i sa opterećenjem od 10 N i trajanjem od 1 do 2 min.





Slika 30. Buehler „Phoenix Beta“ uređaj za brušenje i poliranje uzoraka

Prilikom brušenja prije zamjene brusnog papira od grublje prema finijoj granulaciji potrebno je isprati uzorak radi uklanjanja brušenih čestica koje mogu biti veće od sljedeće granulacije te tako mogu nastati strugotine te užljebljenja na površini uzorka. Nakon provedenog brušenja od grube do fine granulacije provedeno je i poliranje radi što čišće, glađe te pravilnije površine uzorka. Poliranje se provodi na „filc“ papiru tj. posebnoj tkanini uz konstantno prisustvo vodene suspenzije glinice  $Al_2O_3$ . Nakon poliranja dobivena je čista zrcalna površina uzorka bez ogrebotina te pukotina kao na slici 31 .



Slika 31. Izgled uzoraka nakon brušenja i poliranja

Za metalografsku analizu potrebno je još nagristi uzorak, a to se vrši kratkim uranjanjem površine uzorka u otopinu BERAHA, koja ima kemijski sastav: 200g  $CrO_3$ , 20g  $NaSO_4$ , 17 ml  $HCl$  i 1000 ml  $H_2O$ . Proces uranjanja uzorka u otopinu za nagrizanje vidljiv je na slici 32.

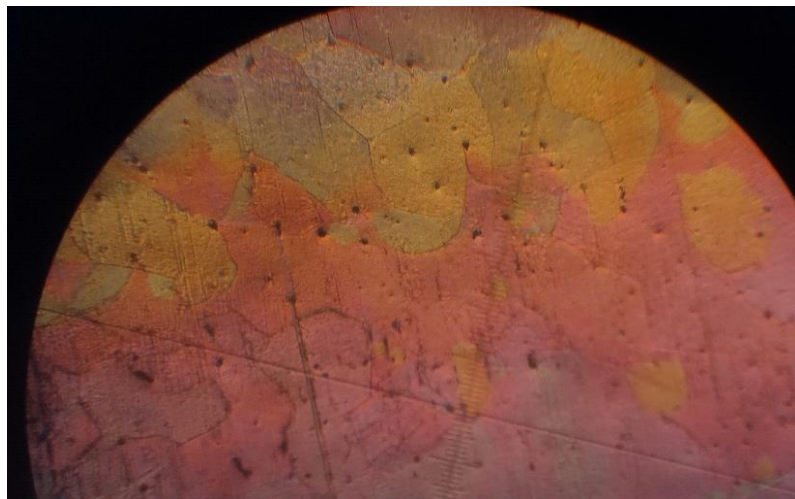


Slika 32. Nagrizanje uzorka bakrene žice

Nakon nagrizanja uzorak se ispire te suši. Primjer uzorka prije nagrizanja dan je slikom 33, dok su slikama 34 i 35 prikazani uzorci nakon nagrizanja navedenom otopinom.



Slika 33. Uzorak prije nagrizanja.



Slika 34. Uzorak nakon nagrizanja



Slika 35. Uzorci nakon nagrizanja

Navedenim i prikazanim te opisanim postupcima priprema uzoraka za strukturna ispitivanja je gotova. Struktura je promatrana na metalografskom mikroskopu Olympus GX 51, slika 36, te su praćene promjene u mikrostrukturi (granice zrna, zona deformacije, dislokacije) na svim uzorcima



Slika 36. Metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70

U poglavlju rezultati i rasprava opisani su rezultati te na kraju su izvedeni zaključci metalografske analize.

### 3.3. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće provedeno je na tvrdomjeru Mitutoyo Hardness Testing Machine HV, Model No. 810-165D u Laboratoriju za obradu kovina deformiranjem na Metalurškom fakultetu. Korištena je metoda prema Vickersu, slika 37. Metoda se bazira na mjerenju otpora koji pruža uzorak, bakrena žica, utiskivanju dijamentne piramide određenom silom ( $F$ ) u vremenu ( $t$ ). Ispitivanja tvrdoće su provedena na istim uzorcima nakon strukturnih ispitivanja.

Odabrani uvjeti ispitivanja su bili:

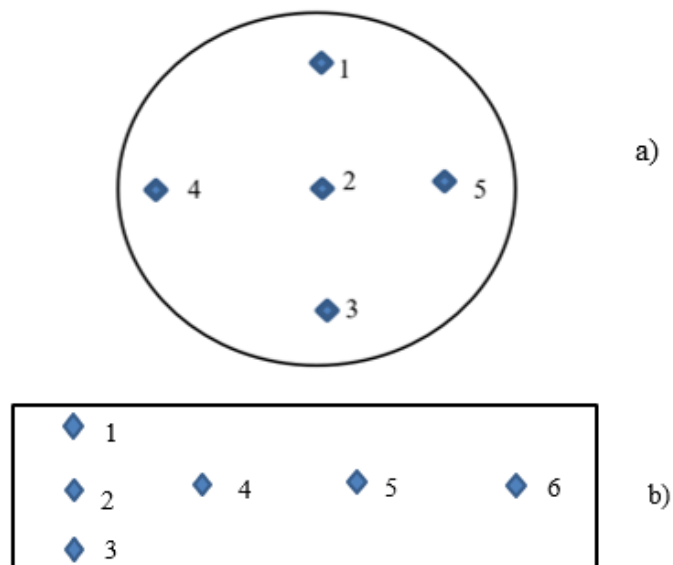
- Opterećenje utiskivanja 9,81 N
- Vrijeme utiskivanja 25 s.

Prethodno ispitivanju, uređaj je nuliran i provjerena su očitavanja na referentnom bloku. Kalibracija je pokazala kako uređaj očitava točne vrijednosti s referentnog bloka i pristupilo se daljnjim ispitivanjima na uzorcima.



Slika 37. Mitutoyo Hardness Testing Machine HV, Model No. 810-165D, uređaj za mjerenje tvrdoće bakrene žice

Ispitivanje tvrdoće smo napravili prema dvjema shemama. sheme su prikazane na slici 38, jedna shema je u smjeru provlačenja (a), a druga je okomita na smjer provlačenja(b).



Slika 38. Sheme ispitivanja tvrdoće  
 a) okomito na smjer provlačenja žice  
 b) u smjeru provlačenja žice

Rezultati mjerenja tvrdoće dani su u poglavlju rezultati i rasprava.

### 3.4. Mjerenje el. vodljivosti bakrene žice

Kako električna vodljivost ovisi o stanju žice, provedeno je mjerenje el. vodljivosti nakon redukcije od 67,5% prije i nakon toplinske obrade žarenjem. Ispitivanje je provedeno u firmi Eurocable d.o.o. na njihovom uređaju „Resistance bridge AESA-CORTAILLOD 7198“, a njegova izvedba je dana na slici 39.



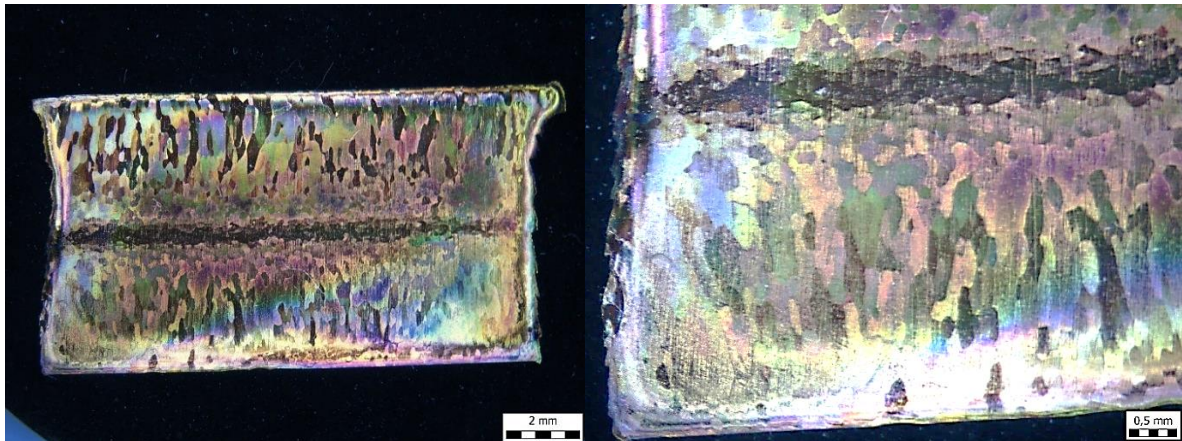
Slika 39. AESA-CORTAILLOD 7198 uređaj za žarenje i mjerenje el. vodljivosti žice [38].

Mjerenje je provedeno kako bi se odredio utjecaj žarenja na vodljivost žice, a rezultati su dani u poglavlju rezultati i rasprava.

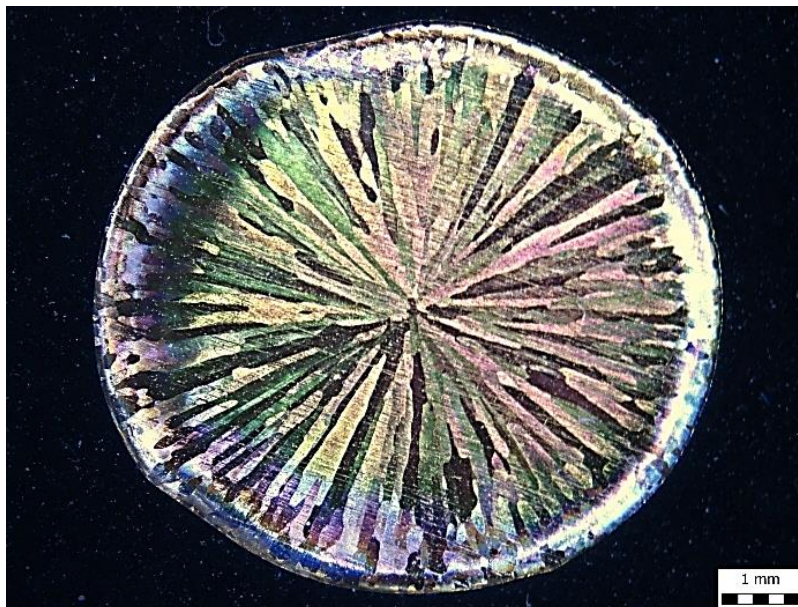
## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Rezultati ispitivanja strukturnih promjena u žici tijekom proizvodnje

Prvo su snimljene makrostrukture žice promjera 8 mm u lijevanom stanju, što je prikazano slikom 40. i 41.

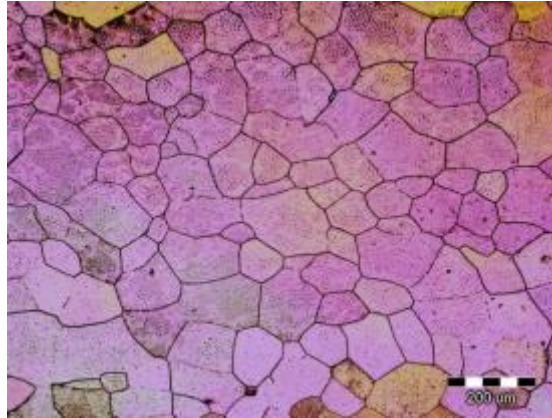


Slika 40. Makrostruktura početne žice u smjeru lijevanja

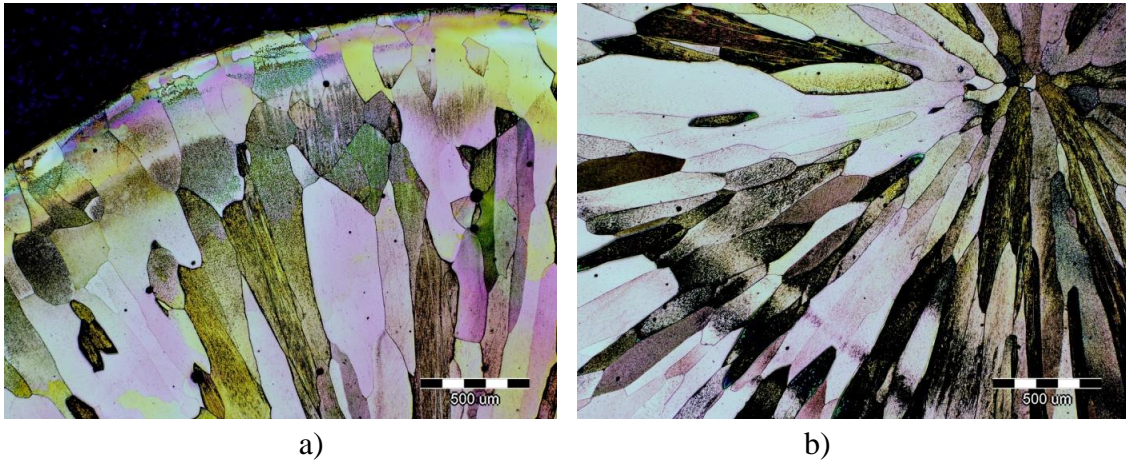


Slika 41. Makrostruktura početne žice presjeka okomitog na smjer lijevanja

Iz snimljenih makrostrukture jasno je vidljiv smjer skrućivanja tijekom UPCAST postupka proizvodnje žice. Iz makrostrukture se vidi kako u lijevanom stanju žica ima grubozrnatu strukturu. Mikrostruktura dana je slikama 42 i 43.



Slika 42. Mikrostruktura početne žice u smjeru lijevanja



a)

b)

Slika 43. Mikrostruktura žice okomito na smjer lijevanja

a) Površinski rub lijevane žice

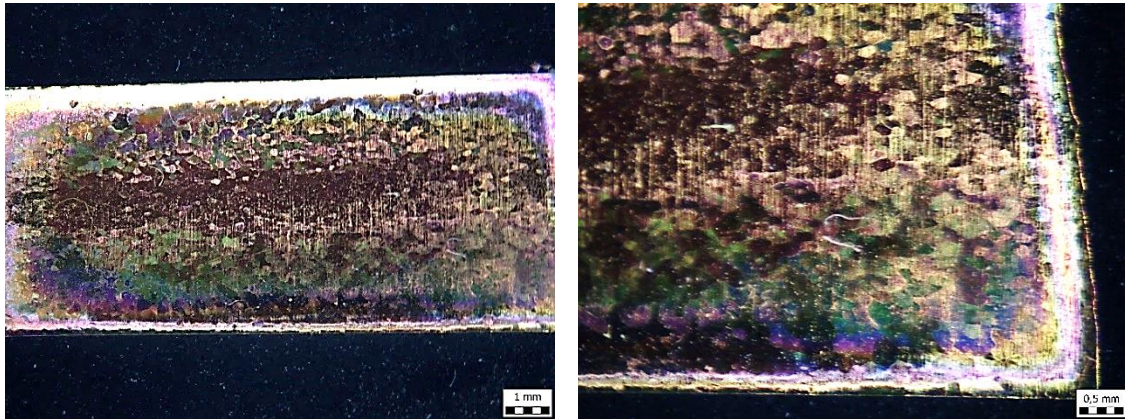
b) Sredina lijevane žice

Iz snimljenih struktura po presjeku i u smjeru lijevanja uočava se kako se u vanjskom rubnom dijelu nalazi tanka zona smrznutih kristala (slika 43 a). Smatra se da je to uslijed brzog glađenja pri kontaktu sa kokilom tijekom skrućivanja. Od tog rubnog dijela prema sredini žice jasno su vidljivi veliki stubičasti kristali, što je tipično za ovaj tip skrućivanja.

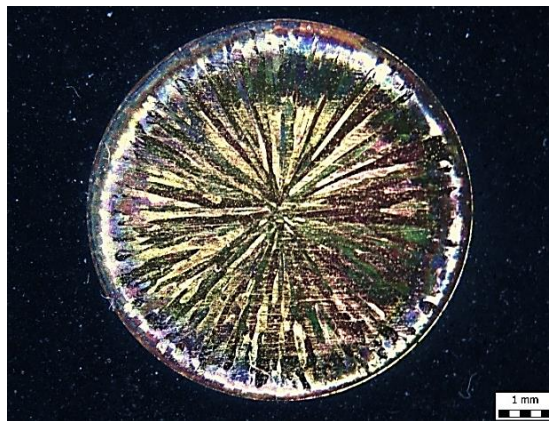
U samom centru presjeka žice uočavaju se sitni istoosni kristali, (slika 43 b), koji se nalaze u vrlo malom broju.

#### 4.2. Mikrostruktura i makrostruktura nakon redukcije od 24%

Nakon provedene redukcije za određeni stupanj koji je 24% presjeka možemo vidjeti prema slikama 44 i 45 da dolazi do malih promjena u pogledu makrostrukture u usporedbi s početnom makrostrukturom kao na slikama 40 te 41.



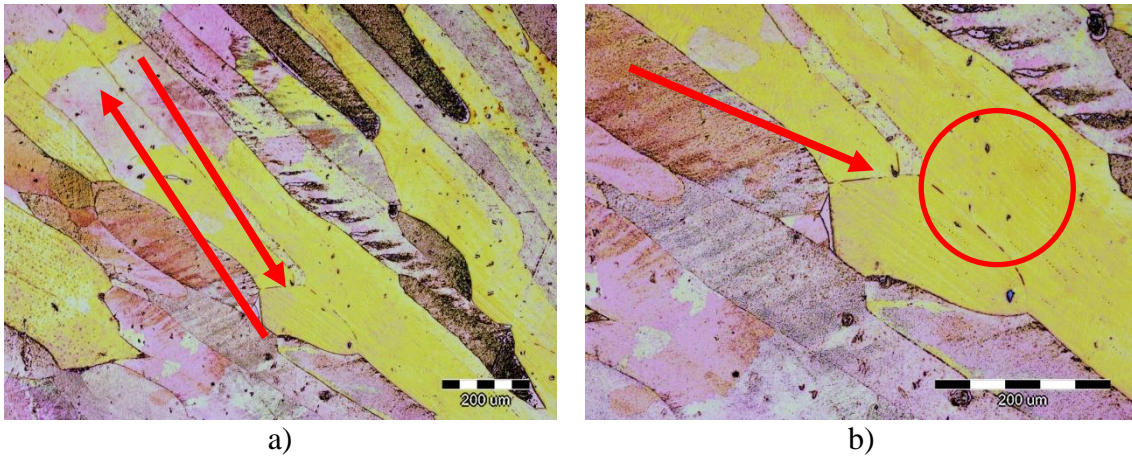
Slika 44. Prikaz makrostrukture uzorka u smjeru lijevanja nakon redukcije od 24%



Slika 45. Makrostrukturni prikaz presjeka žice okomit na smjer lijevanja nakon 24% redukcije

Kako bi se promjene uslijed redukcije jasnije vidjele, provedeno je snimanje mikrostrukture na uzorcima uzimanim okomito na smjer provlačenja, slika 46.



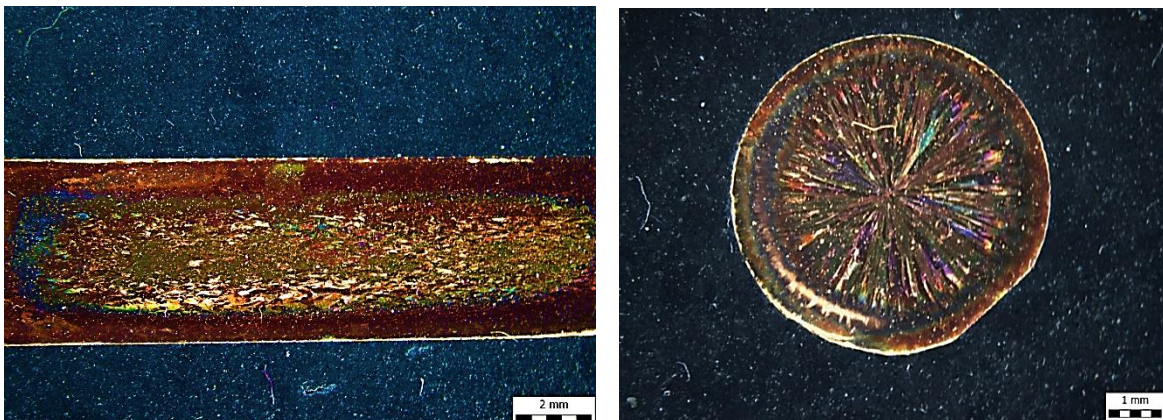


Slika 46. Snimljene strukture okomito na smjer provlačenja, nakon 24% redukcije

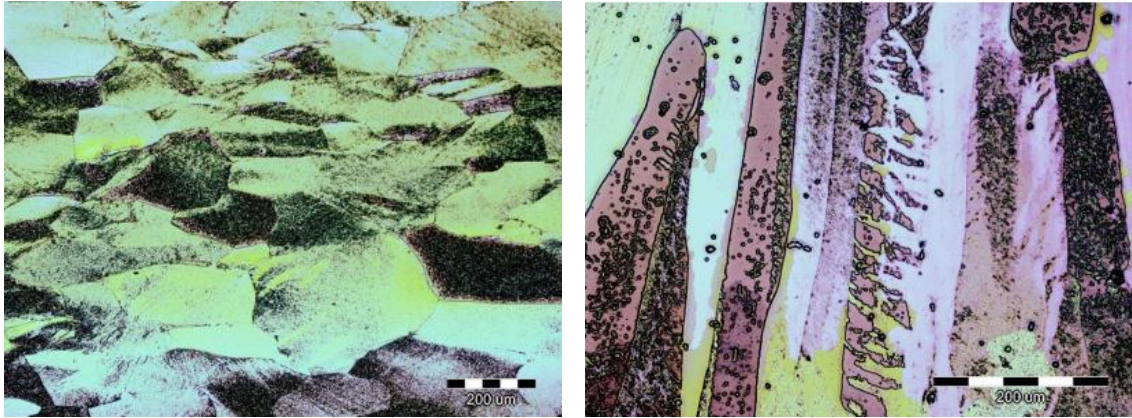
Uočava se kako uslijed redukcije dolazi do pucanja početnih stubičastih kristala u lijevanoj strukturi, označeno strelicama na slici 46 a). Ono što se uočava je da do njihovog loma pri ovoj relativno maloj redukciji dolazi samo u rubnim površinskim zonama. Također se može uočiti pojava dislokacija uslijed deformacije, označeno krugom na slici 46 b).

#### 4.3. Mikrostruktura i makrostruktura nakon redukcije od 46%

Nakon redukcije od 46% prema metalografskim ispitivanjima jasno se vidi da dolazi do promjena u strukturi usporedno sa prošlom redukcijom. Tako nakon provedene redukcije od 46% vidimo da dolazi do značajnijeg utjecaja plastične deformacije tj. dolazi do izražajnijeg usmjerenja zrna u smjeru provlačenja žice kao što je prikazano na slici 47.



Slika 47. Makrostrukturna promjena žice nakon redukcije od 46%

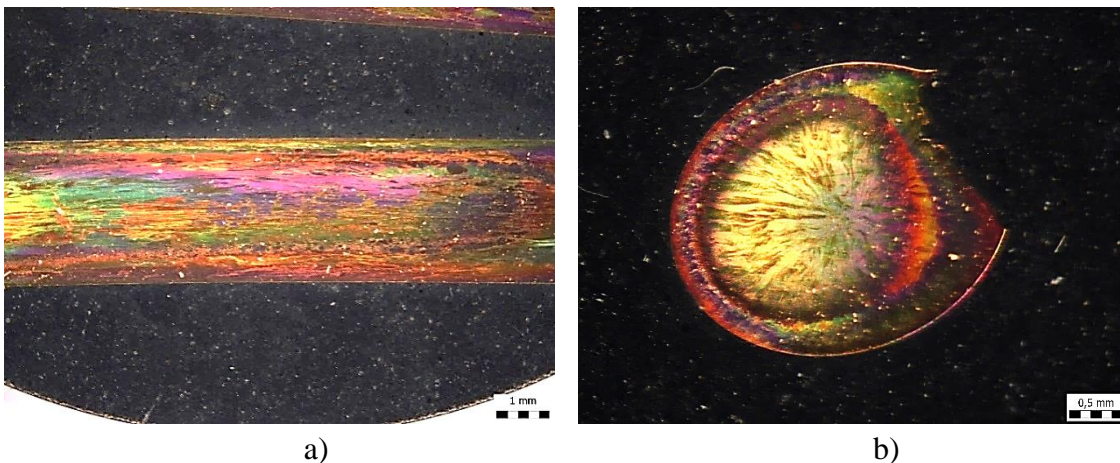


a) b)  
Slika 48. Mikrostruktura žice nakon 46% redukcije

Povećanjem redukcije na 46% nastavlja se redukcija stubičastih kristala, te je uočeno formiranje veće gustoće dislokacija. Struktura postaje više usmjerena u smjeru provlačenja.

#### 4.4. Mikrostruktura i makrostruktura nakon redukcije od 67,5%

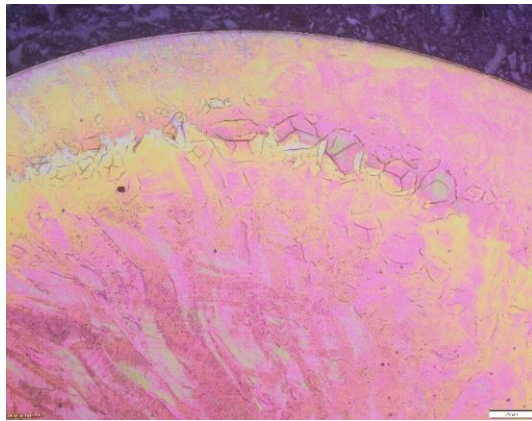
Nakon redukcije od 67,5% dolazi do značajnog smanjenja presjeka žice. Pri tome je presjek snižen s početnih 8 mm na 2.6 mm, što je ujedno bila ciljana dimenzija bakrenog vodiča. Makrostrukture pri 67,5% redukcije dane su slikom 49, u smjeru i okomito na smjer provlačenja.



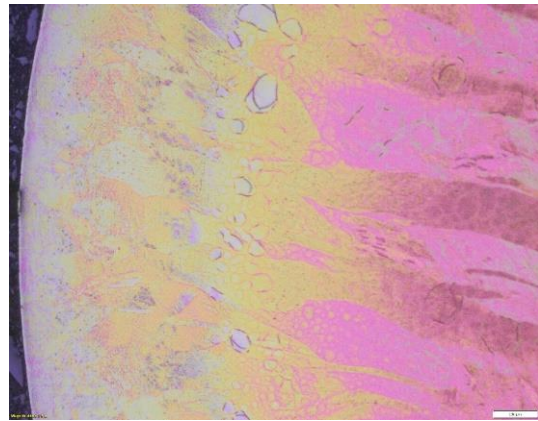
a) b)  
Slika 49: Metalografska slika bakrene žice nakon provedene redukcije od 67,5% u nežarenom stanju

- a) U smjeru provlačenja žice
- b) Okomito na smjer provlačenja žice

Slikama 50, 51 prikazane su mikrostrukture bakrene žice nakon redukcije 67,5% u rubnim dijelovima i u središtu okomito na smjer provlačenja.

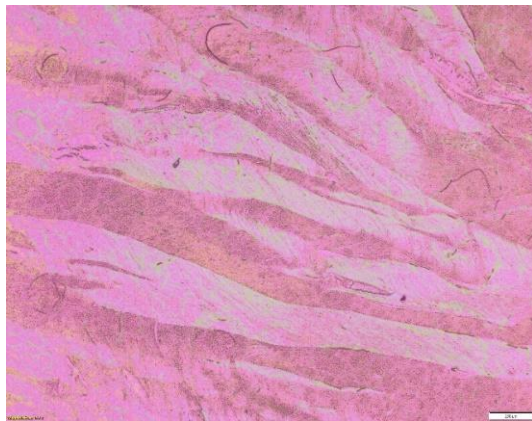


100X

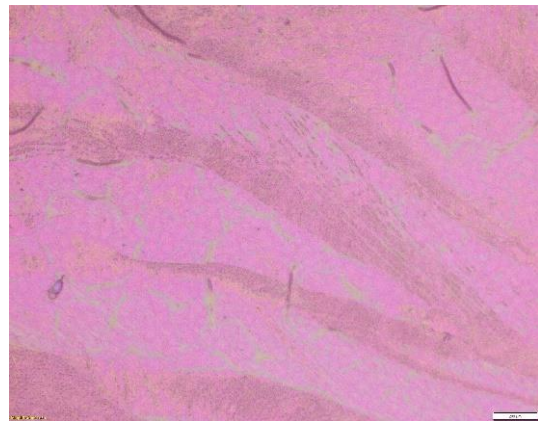


200X

Slika 50. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u rubnim pozicijama



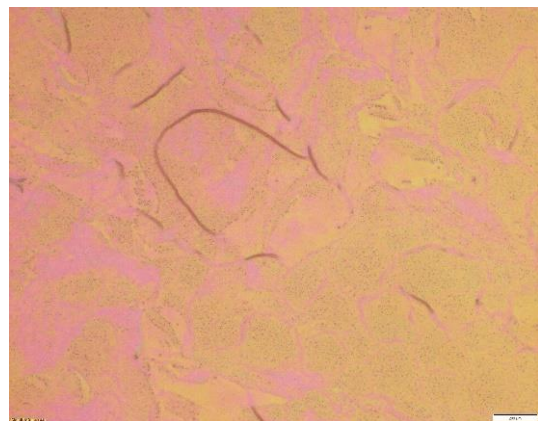
200X



500X



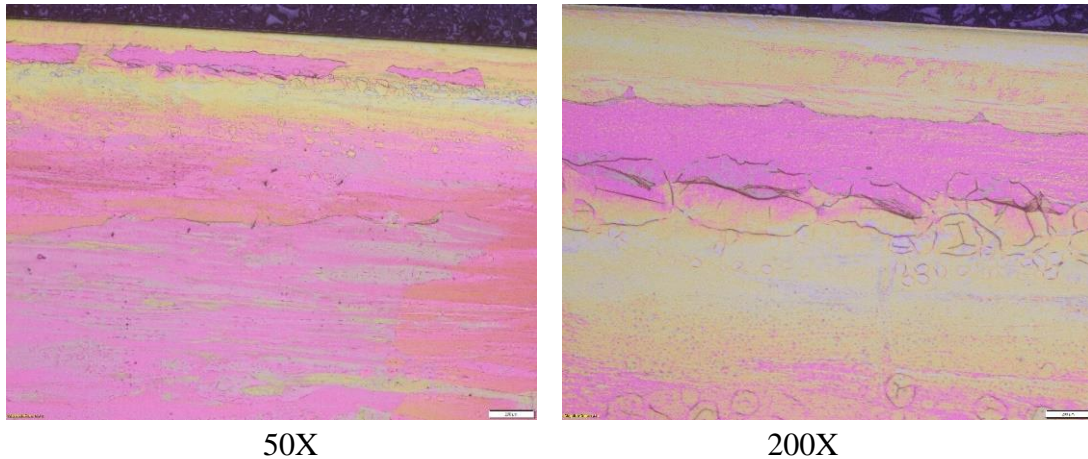
200X



500X

Slika 51. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u središtu

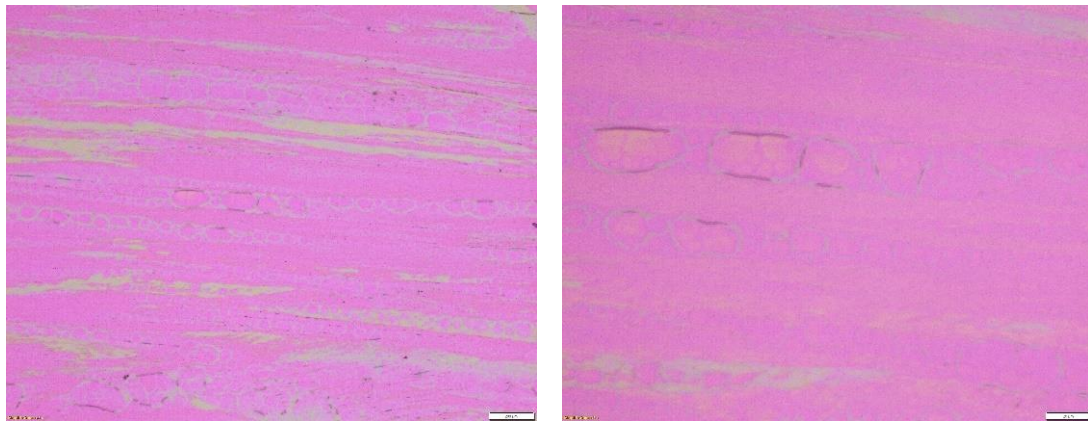
Slikama 52 i 53 prikazane su mikrostrukture bakrene žice nakon ostvarene redukcije od 67,5% snimljene u smjeru provlačenja žice.



50X

200X

Slika 52. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u rubnim dijelovima u smjeru provlačenja



200X

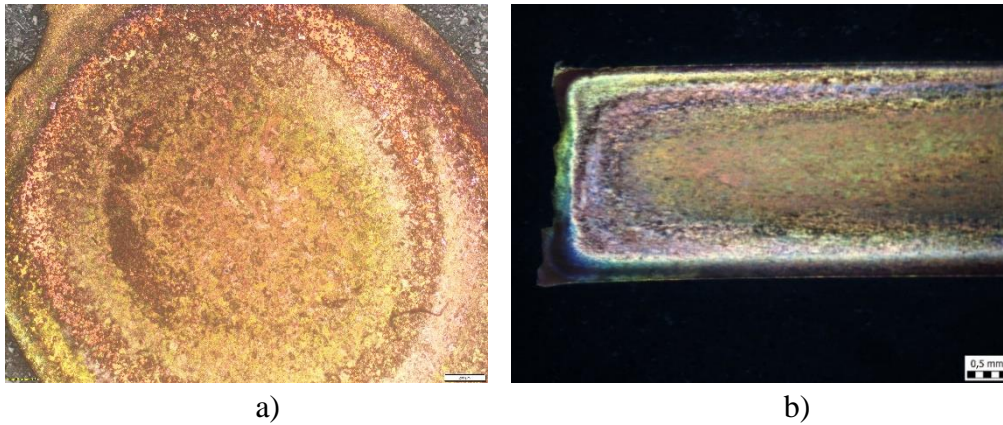
500X

Slika 53. Mikrostruktura bakrene žice nakon redukcije 67,5% u centralnom dijelu, u smjeru provlačenja

Snimljene makro i mikrostrukture ukazuju kako tijekom visokih redukcija dolazi do snažnog usmjerenja zrna u smjeru provlačenja. To je posebno vidljivo sa slika 52 i 53 kojima se gleda u smjeru provlačenja. Nadalje vidi se kako dolazi do jakog usitnjenja zrna, slika 51, te nakupljanja velikog broja dislokacija. Uslijed velike redukcije i razlike u toku materijala u rubnom djelu i centralnom djelu žice, a uslijed trenja i kontakta sa matricom, moguće je vidjeti čak i razliku u kretanju različitih slojeva materijala, slika 52 (200x). Daljnjom deformacijom moguće je da bi došlo i do formiranja pukotina u materijalu. Uslijed različitog toka metala vidi se i razlika u samoj strukturi metala idući od rubnog dijela žice prema sredini. To je vidljivo sa slika 51 i 53 pri povećanju od 200 X.

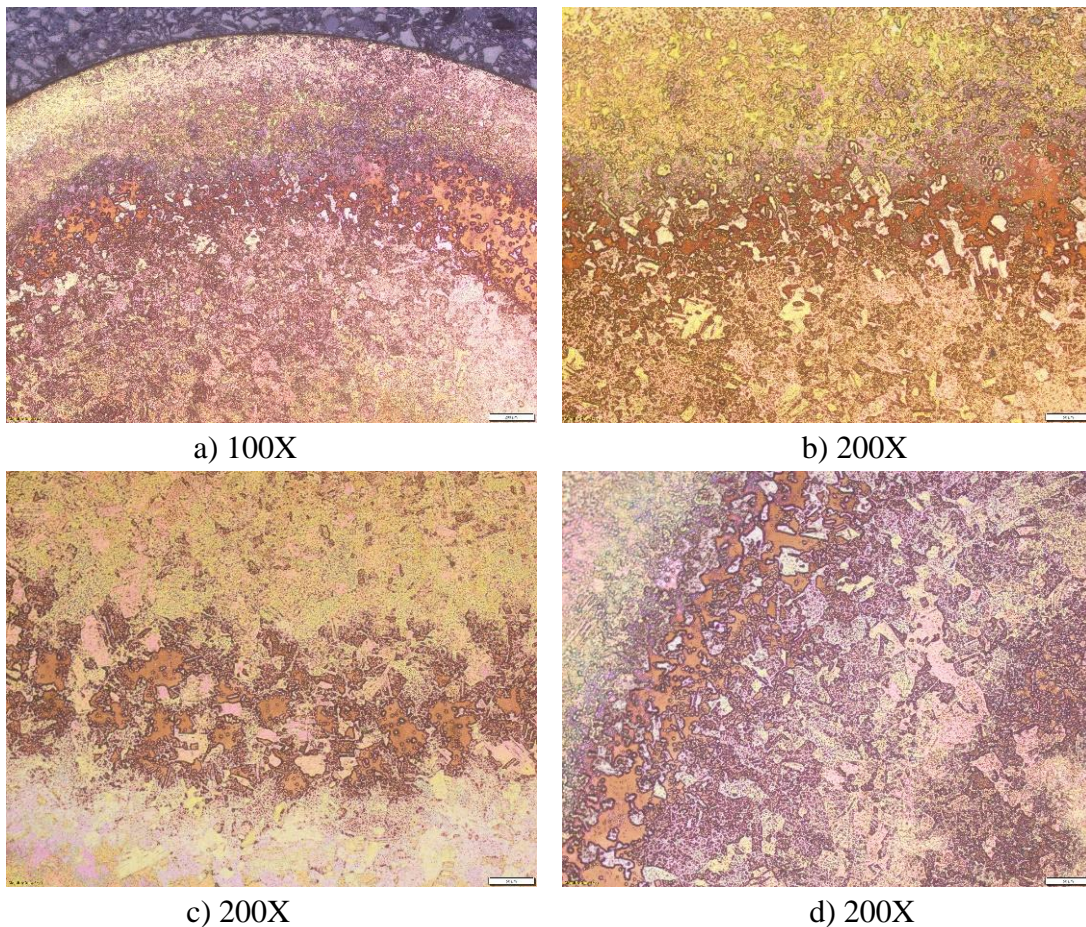
Nakon deformacije u redovnoj proizvodnji provodi se žarenje na ranije opisan način, a u nastavku promatrane su makro i mikro strukture nakon provedenog žarenja.

#### 4.5. Mikrostruktura i makrostruktura žarene žice nakon redukcije od 67,5%

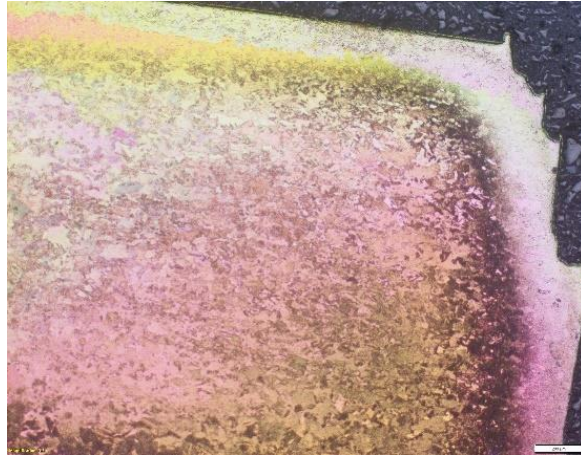


Slika 54. Makrostruktura žice nakon ostvarene redukcije 67,5% i provedenog žarenja  
a) Okomito na smjer provlačenja  
b) U smjeru provlačenja

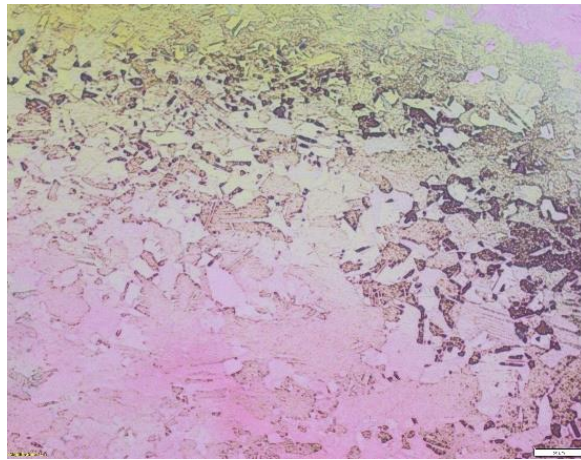
Slikama 55, gdje je prikazan rubni dio žice i 56 prikazane su snimljene mikrostrukture bakrene žice nakon ostvarene deformacije od 67,5% i provedenog žarenja, u okomitom smjeru na provlačenja i u smjeru provlačenja.



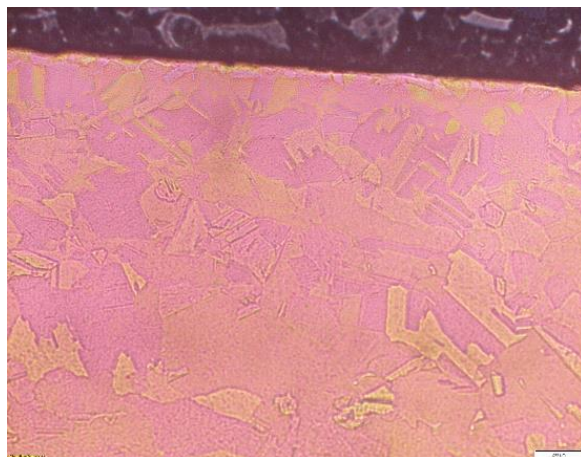
Slika 55. Mikrostruktura žarene bakrene žice okomito na smjer provlačenja



50X



200X



500X

Slika 56. Mikrostruktura žice u smjeru provlačenja nakon ostvarene redukcije od 67,5% i žarenja pri različitim povećanjima

Iz snimljenih struktura nakon žarenja uočava se kako je došlo do rekristalizacije deformiranih zrna. Pri tome je došlo do uređenja i izjednačavanja strukture po cijelom presjeku žice. Može se uočiti kako je rekristalizirano zrno znatno manje od početnog u lijevanom stanju, te je struktura homogenija po cijelom presjeku. Također uslijed rekristalizacije došlo je do poništenja dislokacija, koje se ne uočavaju u žarenom stanju po presjeku. Također uslijed

rekristalizacije više se ne primjećuje jaka usmjerenost u smjeru provlačenja, što je jasno vidljivo iz usporedbe slika 49 a) i 54 b).

Ono što se uočilo je da je tijekom rekristalizacije u mikrostrukturi bakrene žice došlo do formiranja kristala blizanaca, slika 56 (povećanje 500X). To je vidljivo na svim snimljenim strukturama nakon žarenja, no pri povećanju 500X najzornije se može primjetiti.

Ako se uzme da u literaturi javljaju ovu pojavu kao tipičnu za bakar, može se pretpostaviti da će ovo utjecati na mehanička svojstva bakrene žice i vodljivost. U literaturi javljaju kako uslijed stvaranja kristala blizanaca bakar ima bolja mehanička svojstva od ljevanog stanja, uz zadržavanje visoke električne vodljivosti.

Kako bi to potvrdili dalje su provedena mjerenja tvrdoće u svim stanjima i na kraju su izmjerene električne vodljivosti bakrene žice prije i nakon žarenja

#### 4.6. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće proveli smo za svaku redukciju (početnu žicu, redukcije 24%, 46%, 67,5%) prema shemama danim u eksperimentalnom dijelu. Rezultati mjerenja tvrdoća dani su tablicama 2, 3, 4 i 5.

**Tablica 2.** Izmjerena tvrdoća početne žice u lijevanom stanju

Redni br.	Izmjerena tvrdoća u HV1 okomito na smjer lijevanja	Izmjerena tvrdoća u HV1 u smjeru lijevanja
1	65,6	68,1
2	62,5	64,7
3	66,3	67,3
4	67,8	63,9
5	65,4	64,9
6		63,8

**Tablica 3.** Izmjerene vrijednosti tvrdoće žice nakon 24% redukcije

Redni br.	Izmjerena tvrdoće u HV1 po poprečnom presjeku	Izmjerena tvrdoće u HV1 po uzdužnom presjeku
1	98,2	90,2
2	95,9	87,6
3	96,6	81,4
4	97,7	88,2
5	98,1	87,8
6		89,1

Rezultati ispitivanja tvrdoće prikazani tablicama 2 i 3 ukazuju da je došlo do povećanja tvrdoće i čvrstoće žice, također i kod ove redukcije rubna područja imaju nešto veće vrijednosti izmjerenih tvrdoća nego u središnjem dijelu žice.

**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon 46% redukcije

Redni br.	Izmjerena tvrdoće u HV1 okomito na smjer lijevanja	Izmjerena tvrdoće u HV1 u smjeru lijevanja
1	110,4	112,3
2	108,8	107,9
3	112,3	110,1
4	111,8	108,6
5	109,6	106,9
6		107,6

**Tablica 5.** Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon 67,5% redukcije

Redni br.	Izmjerena tvrdoće u HV1 okomito na smjer lijevanja	Izmjerena tvrdoće u HV1 u smjeru lijevanja
1	124,4	122,1
2	122,1	115,1
3	122,8	114,5
4	125,3	122,0
5	128,3	123,5
6		-

Usporedbom rezultata izmjerenih tvrdoća jasno je vidljivo kako povećanjem stupnja redukcije dolazi do povećanja izmjerenih vrijednosti tvrdoća. To se pripisuje očvršćavanju hladnom deformacijom koje se provodi tijekom provlačenja žice. Strukturne promjene pokazuju usitnjenje zrna i povećanje gustoće dislokacija. Svi rezultati jasno ukazuju kako dolazi do očvršćavanja i bilo je za očekivati porast tvrdoće.

U odnosu na početno stanje, tvrdoća je porasla za gotovo dvostruku vrijednost. Isto tako se vidi kako pri višim stupnjevima redukcije, tvrdoća je ravnomjernija po cijelom presjeku, što ukazuje (a potvrđeno je i snimljenim strukturama) da se pri većim stupnjevima redukcije, deformacija odvija po čitavom presjeku žice, a ne samo u rubnim slojevima koji su bliže matrici.

Tablicama 6 i 7 dani su rezultati mjerenja tvrdoće nakon provedenog rekristalizacijskog žarenja žice. Shema ispitivanja je nešto drugačija bila na žarenim uzorcima te je dana slikama 57 i 58.

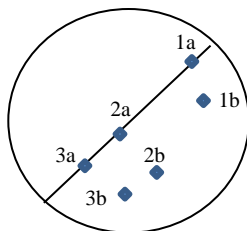




Slika 57. Pozicija ispitivanja tvrdoće žice u smjeru lijevanja

**Tablica 6.** Rezultati ispitivanja tvrdoće žarene žice s 67,5% redukcije u smjeru lijevanja

Redni br.	Izmjerena tvrdoće HV1
1	60,1
2	56,9
3	55,5
4	60,9



Slika 58. Pozicije ispitivanja tvrdoće žarene žice okomito na smjer lijevanja

**Tablica 7.** Rezultati ispitivanja tvrdoće žarene žice s 67,5% redukcije okomito na smjer lijevanja

Redni br.	Izmjerena tvrdoće HV1
1a	81,0
1b	81,1
2a	70,3
2b	75,8
3a	63,9
3b	69,5

Izmjerene vrijednosti tvrdoće ukazuju kako je žarenjem došlo do omekšanja bakrene žice, te su izmjerene tvrdoće skoro identične onima izmjerenim u lijevanom stanju. Iz snimljenih struktura može se vidjeti kako tijekom deformacije dolazi do nešto izraženijeg usitnjenja zrna u rubnim dijelovima žice koji su neposredno blizu kontakta materijala i matrice. Isto se vidi da nakon žarenja u tom djelu imamo nešto drugačiju strukturu nego u ostatku volumena žice.

Te su razlike značajno manje nakon žarenja ali svejedno prisutne. To može objasniti zašto su mjerenja 1 a) i 1 b) tvrdoće nešto višeg iznosa. Sve ovo ukazuje na problem tijekom provlačenja, jer je očito kako je deformacija neravnomjerna po presjeku, a i naknadna rekristalizirana

struktura pokazuje određene razlike, odnosno nejednoliku strukturu. Upravo to prate i vrijednosti izmjerenih tvrdoća.

Problem je bila nemogućnost mjerenja mikrotvrdoće na uzorcima čime bi se ovo moglo potvrditi ili osporiti. Kako u literaturi ukazuju da u slučaju rekristalizirane strukture s prisutnošću kristala blizanaca, mehanička svojstva takvog bakrenog vodiča su bolja od onih u lijevanom stanju. Iz samih izmjerenih tvrdoća to možda i nije jasno vidljivo, no ako se pogledaju strukture, jasno je vidljivo da je struktura u rekristaliziranom stanju homogenija od one u lijevanom. Također nije više izražena niti jaka usmjerenost u smjeru provlačenja, pa je za očekivati i bolja mehanička svojstva i manju anizotropnost vučene žice.

#### **4.7. Rezultati ispitivanja el. vodljivosti**

Kako bi provjerili utjecaj žarenja na el. vodljivost, izmjerene su vrijednosti el. vodljivosti žice prije i nakon žarenja pri redukciji od 67,5%.

Mjerenje je provedeno u firmi Eurocable d.o.o. na njihovom uređaju „Resistance bridge AESA-CORTAILLOD 7198“. Rezultati ukazuju sljedeće:

- Vrijednosti el. vodljivosti u nežarenom stanju 99,0-99,5 % IACS
- Vrijednosti el. vodljivosti nakon žarenja 100,5% IACS

Iz izmjerenih vrijednosti el. vodljivosti, vidljivo je kako deformacijom dolazi do određenog pada u el. vodljivosti, te se naknadnim žarenjem ona oporavlja.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanja su provedena na kontinuirano lijevanoj žici UPCAST postupkom iz čistog bakra, koja se nakon lijevanja reducira do zadane dimenzije. Ispitivanja su uključila mjerenje tvrdoće žice u lijevanom stanju i nakon redukcija 24%, 46% i 67,5%, te nakon žarenja žice koja je prethodno reducirana na 67,5%. Također su snimljene strukture žice u svim fazama proizvodnje kako bi se pojasnile promjene koje nastaju u bakru.

Cilj istraživanja je bio povezati mehanizme očvršćivanja i oporavka koji se provode tijekom kontinuirane proizvodnje Cu žice. Iz provedenih ispitivanja i analiza moguće je dati slijedeće zaključke:

- Tijekom proizvodnje bakrene žice UPCAST postupkom, uslijed skrućivanja u kokili dolazi do formiranja nejednolike strukture po presjeku bakrene žice, što je potvrđeno strukturnom analizom. U vanjskim rubnim dijelovima žice dolazi do formiranja sitnozrnatih zamrznutih kristala. Dalje tijekom skrućivanja formiraju se veliki stubičasti kristali usmjereni prema središtu lijevane žice, te konačno u sredini imamo malu količinu istoosnih kristala.
- Pri niskim stupnjevima redukcije uočava se kako se veliki stubičasti kristali postupno lome. To je jače izraženo u rubnom djelu žice neposredno uz površinu koja je u kontaktu s matricom tijekom provlačenja.
- Porastom stupnja deformacije postupno se lome cijela istoosna zrna sve do sredine žice. Također s porastom stupnja deformacije uočava se porast gustoće dislokacija u strukturi. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pokazuju kako tvrdoća žice značajno raste s porastom redukcije, te kod 67,5% je gotovo dvostruko veća nego u početnom lijevanom stanju. Sve navedeno ukazuje na očvršćivanje tijekom hladne deformacije u procesu vučenja žice.
- Snimljene strukture ukazuju i na to kako se deformacija postepeno premješta po presjeku žice. To se odnosi na činjenicu da kod nižih redukcija se prvo deformiraju vanjski slojevi žice blizu površine koja je u kontaktu s alatom, a dalje porastom redukcije deformacija se premješta prema središtu žice. Ovo pokazuje na određenu neravnomjernost u iznosu deformacije po presjeku žice.
- Također se iz strukturnih snimki vidi kako postoji velika usmjerenost deformiranih kristala u smjeru provlačenja žice.
- Izmjerena vodljivost u deformiranom stanju pokazuje određeni pad u svojoj vrijednosti, a naknadno žarenje to eliminira i povisuje vodljivost žice.
- Izmjerene vrijednosti tvrdoće nakon žarenja žice pokazuju iste vrijednosti kao u lijevanom stanju.
- Analiza strukture nakon žarenja ukazuje kako je provedena rekristalizacija u potpunosti. Po presjeku žice se uočava ravnomjerna struktura, te se izgubila usmjerenost u smjeru provlačenja. Rekristalizirana zrna su znatno sitnija u odnosu na lijevanu strukturu, te se uočava kako tijekom rekristalizacije dolazi do formiranja kristala blizanaca, čime je i početna hipoteza potvrđena.

## 6. LITERATURA

- [1] Copper, Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/copper>, (20.04.2021.)
- [2] Z. Lenhart, Metalurgija obojenih metala I, skripta, Metalurški fakultet Sisak, 2008.
- [3] Production of copper rods and wire: technology and features. Making a wire - from ancient times to the future, Cityshin, <https://cityshin.ru/hr/non-ferrous-metals-and-alloys/manufacture-of-copper-rod-and-wire-technology-and-features-making-wire-from-antiquity-to-the-future/>, 21.04.2021.
- [4] Copper Rod, American Elements, <https://www.americanelements.com/copper-rod-7440-50-8>, (21.04.2021.)
- [5] The Metallurgy of Copper Wire, Copper Development Association Inc. <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/1997/12/wiremetallurgy.html>, (21.04.2021.)
- [6] Introduction to Copper: Mining & Extraction, Copper Development Association Inc. <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2001/08/intromae.html>, (26.04.2021.)
- [7] Copper Mining and Processing: Processing Copper Ores, Superfund Research Center, <https://superfund.arizona.edu/resources/learning-modules-english/copper-mining-and-processing/processing-copper-ores>, (27.04.2021.)
- [8] Metalurgija, Tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/metalurgija.pdf> (22.8.2021.)
- [9] Kawatra, S. Komar, "Primary Metal Production, Michigan Technological University. Accessed November 5, 2015. [http://www.chem.mtu.edu/chem\\_eng/faculty/kawatra/CM2200\\_Primary\\_Metals.pdf](http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/CM2200_Primary_Metals.pdf) (22.08.2021.)
- [10] S. Tomašević, Pirometalurški postupci dobivanja bakra, završni rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2015.
- [11] <https://tensquared.ae/resources/copper-cathodes/>, (15.09.2021.)
- [12] M. Vučenović, Strukturne promjene pri izvlačenju bakrene žice, završni rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2020.
- [13] The original upward casting method, UPCAST® Technology, <https://upcast.com/upcast-continuous-casting-technology/>, (22.09.2021.)
- [14] S. R. Cochrane, M. Nairn, THE Rautamead Upward Vertical Continuous Casting Process, Rautomead International Limited, Dundee, U.K., presented at the International Wrought Copper Council Conference Maastricht, Netherlands, 1995, 1-12
- [15] Studija u utjecaju zahvata na okoliš-linija za vertikalno izvlačenje bakrene žice, EUROCABLE GROUP d.d., općina Jakovlje – ne tehnički sažetak, [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20PUO/2016/netehnicki\\_sazetak\\_studije\\_29.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20PUO/2016/netehnicki_sazetak_studije_29.pdf), (25.08.2021.)
- [16] <https://upcast.com/reference/340/>, (23.09.2021.)
- [17] <https://www.indiamart.com/proddetail/copper-rod-22083198462.html>, (23.04.2021.)
- [18] Metalworking, prezentacija, <https://www.britannica.com/science/metallurgy/Metalworking>, (01.10.2021.)

- [19] Wire Rod – Aurubis ROD and Rhein ROD, prezentacija, <https://www.aurubis.com/en/products/rod-specialty-wire/rod>, (10.05.2021.)
- [20] PROCESS CHARACTERISTICS OF WIRE DRAWING, [http://www.idconline.com/technical\\_references/pdfs/mechanical\\_engineering/Process\\_Characteristics\\_of\\_Wire\\_Drawing.pdf](http://www.idconline.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Process_Characteristics_of_Wire_Drawing.pdf), (10.05.2021.)
- [21] Wire, prezentacija, <https://www.britannica.com/technology/wire#ref22558520,21>, (28.09.2021.)
- [22] M. Čaušević, Teorija plastične prerade metala, Svjetlost, 1979, Sarajevo, 329-366
- [23] M. Nožić Proizvodne tehnologije, Univerzitet "Džemal Bijedić", Mašinski fakultet, 2007.
- [24] THEORY OF WIREDRAWING, <https://antaac.org.mx/assets/10.-theory-of-wiredrawing.pdf>, (18.05.2021.)
- [25] Understanding Copper & Copper Alloy Heat Treatment, Industrial Heating <https://www.industrialheating.com> (20.05.2021.)
- [26] <http://tvrdimetal.com/portfolio/alati-za-obradu-metala-dubokim-izvlacenjem/> 10.05.2021.
- [27] Elektrotehnički materijali, tehnička enciklopedija, [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki\\_materijali.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki_materijali.pdf), (16.06.2021.)
- [28] L.H. Qian , Q.H. Lu, W.J. Kong, K. Lu, Electrical resistivity of fully-relaxed grain boundaries in nanocrystalline Cu, Scripta Materialia 50(2004)11, 1407-1411, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.02.026.
- [29] X. H. Chen, L. Lu, K. Lu, Electrical resistivity of ultrafine-grained copper with nanoscale growth twins, Journal of Applied Physics, 102(2007), DOI: 10.1063/1.2799087.
- [30] L. Lu, L. Lu, Y. Shen, X. Chen, L. Qian, Ultrahigh Strength and High Electrical Conductivity in Copper. Science (New York, N.Y), 304(2004), 422-6. DOI:10.1126/science.1092905.
- [31] S. Golubić, TEHNIČKI MATERIJALI, I. dio metalni materijali, nastavni materijal, Veleučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2019.
- [32] L. L. Shaw, J. Villegas, J. Huang, S. Chen, Strengthening via deformation twinning in a nickel alloy, Materials Science and Engineering 480 (2008) 2, 75-83, DOI:10.1016/j.msea.2007.06.072.
- [33] The Editors of Encyclopaedia. "Annealing". Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/annealing-heat-treatment>. 14.07.2021.
- [34] Hardening treatments, Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/metallurgy/Hardening-treatments>, (14.07.2021.)
- [35] T. Baudin, A.L. Etter, R. Penelle, Annealing twin formation and recrystallization study of cold-drawn copper wires from EBSD measurements, Materials Characterization, 58 (2007)10, 947-952, DOI: 10.1016/j.matchar.2006.09.009.
- [36] D. Field, L. Bradford, M. Nowell, T. Lillo, The role of annealing twins during recrystallization of Cu. Acta Materialia. 55(2007)12, 4233-4241. DOI:10.1016/j.actamat.2007.03.021.
- [37] S. Wang, S. Hongwu, Y. Chen, S. H. Zhang, H. Li, Evolution of Annealing Twins and Recrystallization Texture in Thin-Walled Copper Tube During Heat Treatment. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 33. (2020) 12, 1-9. 10.1007/s40195-020-01090-4.
- [38] <https://www.aesa-cortailod.com/en/products/linear-resistance-measurement/samples-restest-family>, (02.10.2021.)

## 7. ŽIVOTOPIS

### OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Vedran Torman  
Datum i mjesto rođenja: 06. 04. 1995, Sisak  
Adresa: Vjekoslava Kocha 5, 44318, Voloder  
Telefon: (+385)994134740  
E-mal: vedran.torman@hotmail.com

### OBRAZOVANJE:

2018- Redovni diplomski studij Metalurgije  
Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisku, Sisak

2014-2018 Redovni preddiplomski studij Metalurgija, smjer  
metalurško inženjerstvo  
Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisku, Sisak

2010-2014 Tehničar za električne strojeve s primijenjenim  
računalstvo.  
Tehnička škola Kutina, Kutina.

**RADNO ISKUSTVO:** Plodine d.d. 2017-2021, rad preko student servisa.

**VJEŠTINE:** Kreativan, komunikativan, organiziran, poznavanje  
engleskog jezika, dobro poznavanje rada na računalu  
(MS Office paketi, c++ jezik ), poznavanje osnova  
AutoCad-a, Autodesk Inventor-a, ProCast-a te  
Solidworks-a.

### NAGRADE I PRIZNAJE:

2009-2010 Sudjelovanje te osvajanje drugog mjesta na županijskom  
natjecanju iz Tehničke kulture u Sisku.