

Strukturne promjene pri izvlačenju bakrene žice

Vučenović, Milica

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:115:099646>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-07**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

METALURŠKI FAKULTET

Milica Vučenović

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

METALURŠKI FAKULTET

Milica Vučenović

STRUKTURNE PROMJENE PRI IZVLAČENJU BAKRENE ŽICE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc. dr. sc. Ivan Jandrić
Stručni voditelj: Franjo Kozina. mag.ing.met

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:
Predsjednica: prof.dr.sc. Stoja Rešković
Član: doc.dr.sc. Ivan Jandrić
Član: izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić
Zamjenski član: doc.dr.sc. Ivana Ivanić

Sisak, rujan 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Ivanu Jandrliću na savjetima i velikom strpljenju tijekom izrade ovog završnog rada. Također zahvaljujem stručnom voditelju Franji Kozini, mag. ing. met. na pomoći kod eksperimentalnog dijela rada.

Hvala svim kolegama i prijateljima uz koje su studentske godine postale još ljepše i zanimljivije iskustvo.

Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji na pomoći i podršci.

I na kraju, najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima i sestrama koje su uvijek bile tu i bez kojih sve što sam do sad postigla ne bi bilo moguće.

SAŽETAK

STRUKTURNE PROMJENE PRI IZVLAČENJU BAKRENE ŽICE

Bakar je materijal koji je poznat od davnina po svojim poželjnim svojstvima kao što su dobra toplinska i električna vodljivost, visoka tvrdoća, pristupačna cijena itd. Možemo reći kako svakodnevnica koju poznajemo ne bi bila ista bez bakra jer je kao vodič, sastavni dio elektroničkih komponenti. Bakrena žica dobiva se izvlačenjem. Izvlačenje je postupak koji je karakterističan po tome što tijekom obrade metala ne dolazi do razaranja, odnosno skidanja čestica kako bi se dobio konačan oblik. Pri proizvodnji bakrene žice najzastupljeniji je postupak provlačenja kroz matrice gdje dolazi do smanjenja poprečnog presjeka uslijed provođenja samog procesa na način da se žica provlači kroz jednu ili više matrica. Rezultat su poboljšana mehanička svojstva, kao što je tvrdoća te promjena u strukturi materijala. U ovom radu istražena su upravo ova dva čimbenika, a naglasak je stavljen na promjenu u strukturi. Bakrena žica koja je proizvedena UPCAST postupkom, naknadno je provlačena na vučnoj klupi gdje se reducirao njezin poprečni presjek. U svakoj fazi prerade uzimani su uzorci kako bi se pratila promjena u strukturi i tvrdoći žice. Uzorci su prošli metalografsku pripremu pri kojoj je došlo do isticanja mikrostrukture te je potom provedena analiza mikrostrukture pomoću metalografskog mikroskopa te u konačnici ispitivanje tvrdoće. Dobiveni rezultati istraživanja su pokazali i dokazali promjenu u mikrostrukturi lijevane žice, u smislu usmjerenije strukture sa sitnijim zrnima te je došlo do porasta tvrdoće materijala.

Ključne riječi: izvlačenje, bakar, žica, struktura, tvrdoća

ABSTRACT

STRUCTURAL CHANGES DURING COPPER WIRE DRAWING

Copper is a material which is known since ancient times by its desirable properties such as thermal and electrical conductivity, high material hardness, approachable price etc. We may say that everyday life which is known to us would not be the same without copper, because as a conductor is the main part of the electrical components. Copper wire is obtained by drawing. Drawing is a process that is characterized by the fact that during the processing of the metal there is no destruction or removal of particles to obtain the final shape. In the production of copper wire the most common is the process of drawing through the dies where there is a reduction in cross section due to the implementation of the process itself in such way that the wire is drawn through one or more dies. The result is improved mechanical properties, such as hardness and changes in material structure. In this paper these two factors are explored and the emphasis is given on the change in structure. The copper wire that had been previously produced by the UPCAST process, was drawn on a drawing table where its cross section was reduced. Samples were taken at each stage of processing, in order to monitor the changes in structure and hardness of wire. The samples underwent metallographic preparation where the microstructure featured and then the microstructure analysis was performed using a metallographic microscope and finally the hardness test was performed. The obtained research results showed and proved a change in the microstructure of the cast wire, in terms of more directed structure with finer grains, while the increase in hardness is more pronounced.

Key words: drawing, copper, wire, structure, hardness

Popis slika:

- Slika 1. Katode bakra
- Slika 2. Shematski prikaz matrice i ključnih parametara
- Slika 3. Proizvodna linija UPCAST postupka
- Slika 4. Indukcijska peć
- Slika 5. Povlačenje žice prema kolutovima
- Slika 6. Bakrena žica namotana u kolut
- Slika 7. Stroj za provlačenje
- Slika 8. Shematski prikaz provlačenja
- Slika 9. Matrice različitih promjera i oblika
- Slika10. Priprema početka žice kovanjem
- Slika 11. Provlačenje žice na vlačnoj klupi
- Slika 12. Uređaj za rezanje uzoraka
- Slika 13. Uređaj za ulaganje uzoraka u vodljivu masu
- Slika 14. Uzorak nakon ulaganja
- Slika 15. Uređaj za brušenje i poliranje Vektor LC Buehler Phoenix
- Slika 16. Metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70
- Slika 17. Uređaj za mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu
- Slika 18. Shema mjerenja tvrdoće na uzorcima
- Slika 19. Makrostruktura početne žice u lijevanom stanju: a) u smjeru lijevanja
b) okomito na smjer lijevanja
- Slika 20. Mikrostrukture u smjeru lijevanja
- Slika 21. Snimljene mikrostrukture po presjeku okomitom na smjer lijevanja
- Slika 22. Mjerne pozicije
- Slika 23. Snimljene mikrostrukture po presjeku u smjeru provlačenja i okomito na smjer provlačenja
- Slika 24. Mjesta na kojima su mjerene tvrdoće
- Slika 25. Snimljene makro – strukture, a) u smjeru i b) okomito na smjer provlačenja

- Slika 26. Snimljene mikro-strukture, a) u površinskom dijelu i b) centralni dio uzorka nakon ostvarenih 46% redukcije
- Slika 27. Struktura po zoni deformacije tijekom druge provlake
- Slika 28. Pozicije mjerenja tvrdoće duž zone deformacije
- Slika 29. Usporedba strukture u a) početnom i b) konačnom stanju nakon druge redukcije presjeka

Popis tablica

- Tablica 1. Izmjerene vrijednosti tvrdoće u početnom stanju, HV10
- Tablica 2. Izmjerene vrijednosti tvrdoće nakon 23% redukcije, HV10
- Tablica 3. Izmjerene vrijednosti tvrdoće nakon ostvarene 48% redukcije, HV10

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Sirovine i dobivanje bakra.....	2
2.2. Postupci proizvodnje Cu – žice	3
2.2.1. Contirod postupak	3
2.2.2. Dip Forming postupak.....	4
2.2.3. Southwire postupak	4
2.3. UPCAST postupak	4
2.3.1. Opis postupka	5
2.4. Provlačenje	7
2.4.1. Matrice	9
2.5. Utjecaj deformacije na strukturu i svojstva Cu	9
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	11
3.1. Provlačenje bakrene žice	11
3.2. Uzorci	12
3.3 Metalografska priprema uzorka	13
3.4. Mjerenje tvrdoće	15
4. REZULTATI I DISKUSIJA	16
4.1. Početna struktura i izmjerene vrijednosti tvrdoće lijevane žice	16
4.2. Struktura i tvrdoća Cu-žice nakon prve redukcije.....	19
4.3. Struktura i tvrdoća Cu-žice nakon druge redukcije.....	20
5. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA.....	26

1. UVOD

Uz čelik i aluminij, danas najčešće korišteni tehnički metal je svakako bakar. Bakar sa svojim legurama jedan je od najstarijih metala koje čovjek koristi. Čisti bakar je kao metal vrlo mekan i kao takav rijetko se koristi za strojne dijelove. Najviše se koristi kao antikorozijski materijal, u obliku cijevi i limova ili nanesen na čeličnu podlogu. Zbog kombinacije srednjih do visokih vrijednosti čvrstoće, visoke toplinske i električne vodljivosti (odmah iza srebra), umjerene cijene materijala i lake plastične prerade, dobre korozijske otpornosti te lakog spajanja i zavarljivosti, bakar je danas još uvijek nezamjenljiv u elektrotehnici kao vodič. Bakrena žica se koristi u gotovo svim elektroničkim uređajima koji danas oblikuju naš život i dio su svakodnevnice.

Sama proizvodnja bakrene žice vrlo je složen proces koji uključuje više segmenata proizvodnje. Ovisno o brojnim parametrima u konačnici će ovisiti i sama kvaliteta proizvedene žice. Od svih poznatih postupaka proizvodnje žice, pri proizvodnji bakrene žice svakako je najzastupljenija tehnologija provlačenja kroz matrice. Provlačenje ili izvlačenje, je postupak strojne obrade metala deformiranjem kako bi se dobio željeni oblik i dimenzija bez razaranja (žice, šipke ili cijevi). Sam tehnološki postupak se bazira na provlačenju žice kroz matrice, gdje zbog smanjenja presjeka otvora matrice dolazi do smanjenja poprečnog presjeka žice. Pri tome dolazi do značajnih promjena u mehaničkim svojstvima i strukturi vučene žice. Tijekom postupka izvlačenja vrlo je bitno razumjeti ponašanje materijala što ovisi o nekoliko čimbenika kao što su: početna svojstva materijala, brzina izvlačenja, upotreba maziva itd. kao i interakcije svih navedenih čimbenika kako bi došlo do što boljeg provođenja samog procesa [1].

Cilj ovog završnog rada je opisati jedan od najčešće korištenih postupaka proizvodnje bakrene žice, te istražiti mikrostrukturu i mikrostrukturne promjene u različitim fazama proizvodnje bakrene žice.

2. TEORIJSKI DIO

Izvlačenje kao tehnološki postupak prerade metala je poznat od davnina. Prvi sigurni zapisi o postupku izvlačenja pojavljuju se još u srednjem vijeku, točnije 1270. godine u Parizu gdje je pronađen dokument na kojem su napisani zakoni koje bi trebao poštivati onaj koji se bavi ovom djelatnosti [2]. Kao takav prošao je brojne promjene, no osnova se i danas koristi. Postupak se svodi na postupno smanjenje poprečnog presjeka vučenog komada u cilju ostvarivanja željenih dimenzija i svojstava vučenog komada. Pri tome treba voditi računa o postupnom očvršćivanju. Iako se sam postupak provodi u hladnom stanju, kako bi se moglo nastaviti daljnje smanjenje presjeka, s vremena na vrijeme, ovisno o stupnju deformacije, potrebno je provoditi žarenje vučenog komada. Uslijed žarenja dolazi do omekšanja materijala te mogućnosti naknadnog provlačenja na manje presjeke. O samoj tehnologiji i parametrima provlačenja više će se govoriti kroz ovaj rad na primjeru proizvodnje bakrene žice izvlačenjem.

Za proizvodnju bakrene žice koristi se bakar čistoće 99,90 % tj. ETP-Cu (*eng.* Electrolytic-Tough Pitch), ali se kod zahtjevnijih slučajeva, najčešće kod modernih elektroničkih sklopova koristi bakar čistoće 99,95 %, tj. bakar bez udjela kisika (*eng.* Oxygen Free, OF-Cu).

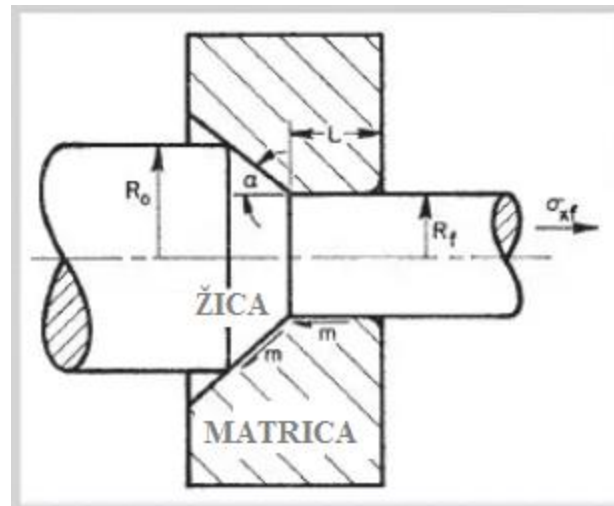
2.1. Sirovine i dobivanje bakra

Prije samog procesa izvlačenja, potrebno je proći kroz niz različitih procesa prerade kako bi se dobio što čišći bakar. Možemo ga dobiti pirometalurškim ili hidrometalurškim postupcima, ali su pirometalurški postupci više u upotrebi. Sve započinje eksploatacijom bakrene rude (najčešće sulfidne rude bakra) koja potom prolazi kroz drobljenje, mljevenje, flotaciju, različite procese taljenja, konvertiranje itd. Kod dobivanja bakra završni je korak elektrolitička rafinacija kojom se dobije katoda bakra (slika 1) vrlo visoke čistoće. Dimenzije bakrene katode otprilike se kreću oko 1 m x 1 m, debljine 12 mm, a težina jedne katode je oko 100 kg koja potom ide na taljenje i iz koje dobivamo lijevanu žicu [4,5].



Slika 1. Katode bakra [6]

Nakon hlađenja ljevana žica se nekim od tehnoloških postupaka prerađuje plastičnom deformacijom, u cilju dobivanja boljih mehaničkih svojstava i manjeg poprečnog presjeka, ovisno o namjeni žice. U proizvodnji bakrene žice danas je najzastupljenija tehnologija izvlačenja žice. Najčešće se prethodno kontinuirano ljevana žica postupno kroz više provlaka provlači kroz matrice. Cilj izvlačenja je redukcija promjera, tj. smanjenje poprečnog presjeka, provlačenjem materijala kroz matricu konusnog oblika pod utjecajem određene sile, slika 2.



Slika 2. Shematski prikaz matrice [3]

Žici je prije umetanja u matricu potrebno stanjiti početak jer je promjer matrice manji od početnog promjera žice (8,00 mm). To je moguće postići valjanjem na posebnim valjcima ili kovanjem početka žice. Potom se žica provuče kroz matricu i prihvati čeljustima koje ju provlače kroz matricu. U ovom koraku potrebno je paziti na brzinu kako ne bi došlo do istezanja i pucanja materijala, što ovisi o samom materijalu koji se provlači. Također, vrlo je bitno da redukcije ne budu prevelike i da se provode u više koraka uslijed jakog očvršćivanja. U suprotnom može doći do pucanja žice, stvaranja „vrata“ ili neke druge nepoželjne deformacije koja utječe na kvalitetu proizvoda [2].

2.2. Postupci proizvodnje Cu – žice

Unazad nekoliko desetljeća postupci proizvodnje bakrene žice su se znatno poboljšali, a najveća prednost je ta što se razvojem kontinuiranih procesa smanjila potrošnja energije. Neki procesi zahtijevaju toplinsku obradu kao što su Contirod, Dip Forming i drugi, dok se kod postupka kao što je UPCAST toplinska obrada preskače, odnosno žice se izvlače u hladnom stanju [7].

U nastavku su ukratko opisani neki od važnijih procesa kod proizvodnje Cu-žice, dok će UPCAST postupak biti opširnije opisan pošto je bakrena žica korištena pri eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada proizvedena upravo tim postupkom.

2.2.1. Contirod postupak

Contirod postupak se koristi za proizvodnju žica iz šipki. Razvijen je u Metallurgie Hoboken Overplet SA. Postupak se odvija na način da se elektrolitički rafinirane katode bakra tale u šahnoj peći s kontroliranom atmosferom te potom odlaze preko kanala u peć za držanje pa sve do Hazallett stroja. Uz pomoć automatskog dovoda metala i kontrole nivoa, bakrena šipka kontinuirano se lijeva i zatim valja u žice promjera 8 mm. Ovisno o tipu postrojenja valjačko

postrojenje se sastoji od šest horizontalnih/vertikalnih stanova individualno pogonjenih. Na kraju procesa gotovi proizvod se namata na kolute [7,8].

2.2.2. Dip Forming postupak

Ovaj postupak je vrlo sličan postupku kontinuiranog lijevanja. Važno je za napomenuti da se materijal cijelo vrijeme nalazi u atmosferi vodika, ugljikovog monoksida te dušika kako ne bi došlo do vezanja kisika. Postupak se odvija na način da se sirovina zagrije i potom dodaje u indukcijsku peć gdje se tali. Na peć je ugrađen dio za hlađenje. Kroz peć za lijevanje se provodi žica promjera od 9 do 12 mm, a talina koja se nalazi u peći se veže za žicu i time joj povećava promjer do 20 mm, naravno pod strogo kontroliranim uvjetima. Žica potom ulazi u stroj za valjanje koji je konstruiran tako da podnosi nagle promjene poprečnog presjeka valjane žice. Valjački stanovi (u odnosu na os) postavljeni su tako da međusobno zatvaraju kut od 45° [7].

2.2.3. Southwire postupak

Ovaj postupak je najzastupljeniji u SAD-u. Za taljenje katodnog bakra se također, kao i kod contirod postupka koristi šahtna peć, a taljenje se provodi pomoću plina (propan itd.). Uvjeti moraju biti kontrolirani kako bi se zadržala slabo reducirajuća atmosfera u područjima u kojima dolazi do kontakta plinova s bakrom. Potrebno je pratiti sadržaj CO i H₂ i također kontrolirati omjer zraka i plina za plamenike. Plamenici su smješteni oko obloge peći, složeni u redove. Nastala prašina se uklanja pomoću filtera, a plinovi se hlade. Talina bakra se ispušta na dnu peći, slično kao sirovo željezo i potom odlazi u cilindričnu peć gdje se drži neko vrijeme kako bi se postigli uvjeti za daljnji metalurški proces. Stalna temperatura taline održava se pomoću plamenika. Iz peći bakar teče prema kotaču za lijevanje čiju polovicu opsega zauzima čelična traka hlađena vodom gdje dolazi do skrućivanja bakra. Nastaje šipka koja se nakon struganja pomoću stisnutih valjaka provlači i brusi, prvo grubim brušenjem, a zatim i finim i u toj fazi dolazi do redukcije promjera [9,10].

2.3. UPCAST postupak

UPCAST postupak (slika 3) razvijen je 60-ih godina u Finskoj, a prvi put je u upotrebu ušao 1971. godine. Cilj je proizvesti bakrenu žicu promjera 8 mm koja se može podvrgnuti hladnoj obradi bez prethodne toplinske obrade. Žica mora imati dobra plastična svojstva kako bi izdržala naknadne visoke stupnjeve redukcije [9].



Slika 3. Proizvodna linija UPCAST postupka [5]

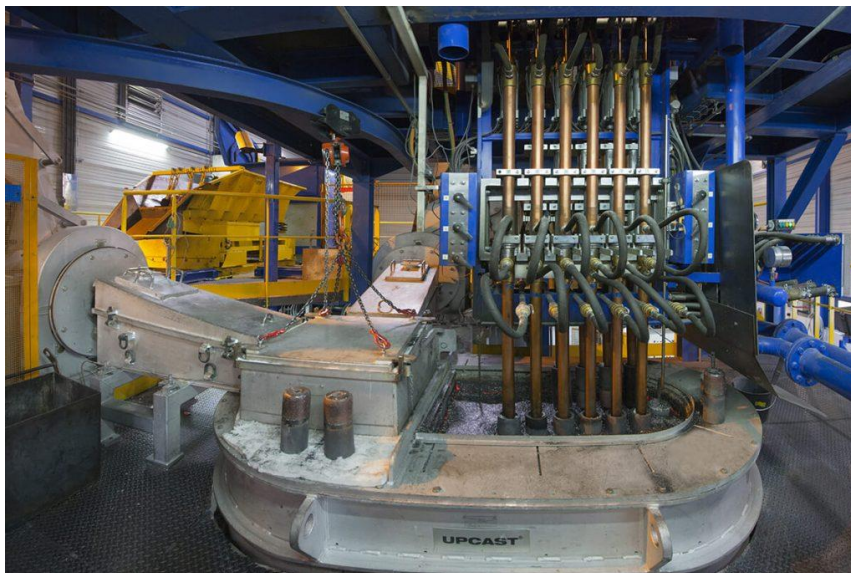
Tvrtka Eurocable Group d.o.o. nalazi se u blizini grada Zagreba (općina Jakovlje) i koristi upravo ovaj postupak pri proizvodnji bakrenih žica. Proizvodni kapacitet je 12,000 t godišnje, kapaciteta taljenja 1.430 kg/h, a može se izvlačiti 12 žica istovremeno. Postoje postrojenja manjeg i većeg kapaciteta, a u ovom slučaju postupak je prikladan za postrojenje manjeg kapaciteta. Najzastupljeniji je ETP-Cu, ali za izradu fleksibilnih vodiča promjera 0,5 mm koristi se OF-Cu [10].

2.3.1. Opis postupka

Proces započinje tako što se na paletama dovoze katode (cca. 2 t) koje potom stroj pojedinačno uzima i spušta u peć za taljenje (slika 4) tj. indukcijski grijanu peć u kojoj se potom tali. Naravno, ne ispušta se direktno cijela katoda, već se polagano uranja u talinu. Peć može biti:

- Kombinirana: peć za lijevanje/taljenje, prilagođena za kapacitete na godišnjoj bazi do 12,000 t
- Dupla: taljenje i lijevanje su odvojeni procesi, prilagođena za kapacitete do 40,000 t godišnje
- Trodupla: sadrži dvije peći za taljenje koje su odvojene. Jedna služi za katode, a druga za reciklirani bakar te jedne peći za lijevanje [10].

Peć je otvorenog tipa, jedan otvor služi za ubacivanje katode (ulazni otvor), a kroz drugi (izlazni) se vertikalno prema gore izvlači kontinuirano lijevana bakrena žica. Zbog djelovanja struje velike jakosti, metal se u peći brzo zagrijava i tali. Elektromagnetska sila istovremeno uzrokuje i miješanje rastaljenoga metala. Kako metal nije u dodiru s grijaćim tijelom, moguće je dobro kontrolirati okolnu atmosferu, što rezultira talinom visoke kvalitete i čistoće. Vrlo je bitno za naglasiti da se peć nikad ne prazni do kraja [11].



Slika 4. Indukcijska peć [5]

Poznato je kako kisik u bakru nije poželjan, te kisik ima veći afinitet prema ugljiku nego prema bakru, stoga se talina zadržava u peći određeno vrijeme kako bi se kisik vezao na grafitne

stranice peći, a zaštitni sloj grafitne prašine koji se dodaje tijekom taljenja sprječava vezanje kisika iz zraka [11].

Temperatura taline iznosi od 1180 °C do 1240 °C i kontrolira se automatski [12].

Na izlaznom otvoru peći nalaze se grafitne kokile hladene vodom. Radnik s posebnim alatom (šipka s bakrenim uloškom) spušta „bakrenu klicu“ u rastaljeni bakar te postupno povlači šipku prema gore. Pri tome dolazi do formiranja lijevane žice u kokili koja se potom uvodi u valjke pogonjene elektromotorom koji ju vertikalno povlače. Na taj način se formira kontinuirano lijevana žica. Cijeli proces je automatiziran i istovremeno se lijeva do 12 žica. U slučaju da je potrebna zamjena pojedinih kokila, ne dolazi do zaustavljanja procesa lijevanja ostalih žila. Temperatura žice nakon hlađenja vodom iznosi oko 60 °C. Potom se nastala žica povlači pomoću rotirajućih valjaka i direktno iz peći ide prema (slika 5) kolutovima na koje se namata. Težina kotura (slika 6) može biti od 3 t do 4 t, a brzina izvlačenja žice i namatanja na kolutove je jednaka, odnosno regulira se prema potrebi [5,10].



Slika 5. Povlačenje žice prema kolutovima



Slika 6. Bakrena žica u kolutu

Nakon postupka proizvodnje dobiva se žica promjera 8 mm sljedećih karakteristika:

- Gustoća: $8,9 \text{ kg/dm}^3$
- Vlačna čvrstoća (R_m): 170 N/mm^2
- Istezanje pri lomu (ASTM E 8M): 45 %.

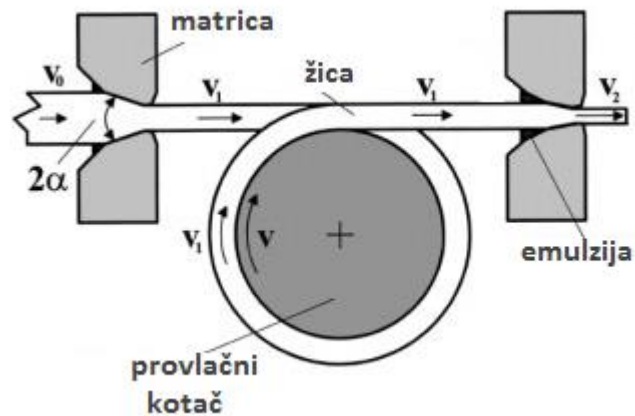
2.4. Provlačenje

Iz konačnog proizvoda, kontinuirano lijevana žica promjera 8 mm, provodi se mehanička redukcija promjera provlačenjem kroz matrice. Žica se može provući jednom ili više puta kroz matrice čime se smanjuje promjer, ovisno o samoj svrsi žice.

Početni korak je uvođenje žice u matricu. Prije samog izvlačenja potrebno je pripremiti početak žice, točnije smanjiti presjek toliko da može proći kroz matricu i u zahvat sa sljedećim strojem za izvlačenje. Ovo se provodi ili kovanjem ili valjanjem početka žice. Nakon toga ona se uvodi u matricu i provlači kroz nju. Za izradu matrica koriste se materijali kao što su volframov karbid (WC) ili industrijski dijamant zbog svog dugog vijeka trajanja. Također je vrlo bitan dizajn matrice kako bi površina konačnog proizvoda bila što glađa. Sljedeći korak je dopremanje kotura do stroja za provlačenje (slika 7) koji se sastoji od niza bubnjeva za namatanje i matrica.



Slika 7. Stroj za provlačenje



Slika 8. Shematski prikaz provlačenja [14]

Emulzija ulja i vode u koju su potopljeni provlačni kotači i matrice cirkulira u zatvorenom sustavu, a služi za smanjenje trenja između materijala i matrice i odvođenju topline kao što je prikazano na slici 8. Vrlo je bitno da brzine pri provlačenju budu dobro podešene, jer u suprotnom dolazi do pucanja ili nagomilavanja žice, uslijed čega se proces proizvodnje mora prekinuti. Proces provlačenja završava kada je postignut ciljani promjer žice. Nakon toga slijedi žarenje pomoću uređaja koji na principu električnog otpora zagrijava već reduciranu žicu da bi se omekšala prema standardu za istezanje za određene proizvode. Žarenje se provodi redovno u cilju omogućavanja daljnjeg hladnog oblikovanja deformiranjem onih proizvoda koji su tijekom prethodnog oblikovanja suviše očvrsnuli. Zagrijana žica se hladi pomoću vode u zatvorenom sustavu. Nakon žarenja u većini slučajeva se provodi dodatno provlačenje radi postizanja ciljanih mehaničkih svojstava žice i odgovarajuće električne vodljivosti. Proces završava tako što se žica automatski namata na bubnjeve tj. namatače kapaciteta od 600 kg do 1 t [10,13].

2.4.1. Matrice

Matrice (slika 9) su jedan od najvažnijih elemenata pri procesu provlačenja, ako ne i najvažniji, jer pomoću njih dolazi do redukcije promjera. Mogu biti različitih oblika: okrugle, kvadratne, ali i specijalnih oblika, ovisno o primjeni. Kućište im je metalno, dok je unutrašnjost, kao što je već spomenuto, od vrlo kvalitetnih materijala i materijala otpornih na trošenje (volframov karbid, industrijski dijamant, prirodni dijamant i sl.).



Slika 9. Matrice različitih promjera i oblika [15]

Pri odabiru matrica za izvlačenje važni podaci koje treba uzeti u obzir su: materijal vučene žice te parametri izvlačenja kao što su: početni presjek, konusni kut matrice itd. O navedenome ovise sile potrebne za izvlačenje te konačna svojstva same žice [16].

Matrice se sastoje od ulaznog konusnog dijela (grlo) koji služi za uvođenje materijala, dijela za kalibriranje (redukcija) te izlaznog dijela. Također je vrlo bitan kut ulaznog dijela matrice neovisno od kojeg materijala je matrica izrađena. Kod bakrene žice, optimalan kut varira između 3° i 8° , dok se u starijoj literaturi spominje kut od 10° .

Izbor matrice ovisi o cijeni i željenoj kvaliteti površine gotovog proizvoda nakon provlačenja, npr. ako se radi o matrici od prirodnog dijamanta materijal će imati glatku površinu, dok će materijal koji je prošao postupak provlačenja kroz matricu od umjetnog dijamanta (*eng.* PCD, polycrystalline diamond) imati grublju površinu, ali će uvijek trajanja alata biti duži. Možemo zaključiti kako je proizvodnja PCD matrica znatno jeftinija, a način proizvodnje bazira se na sinteriranju dijamantnog praha pod visokim temperaturom i tlakom (oko 1400°C i 60 kbara) [16].

2.5. Utjecaj deformacije na strukturu i svojstva Cu

George Ellwood Dieter (1988) tvrdi da modifikacije koje se događaju u metalima tijekom procesa hladne deformacije tijekom izvlačenja utječu na mehanička i električna svojstva materijala. Promjene u strukturi metala, uzrokovane postupkom izvlačenja, nastaju zbog fenomena očvršćivanja materijala. Taj se fenomen događa smanjenjem površine poprečnog

presjeka žice. U tom smislu događaju se dvije faze tijekom toplinske obrade nakon izvlačenja materijala, kako bi se vratila električna i mehanička svojstva [17].

- Prva faza je oporavak zrna (uređenje mikrostrukture) dok je druga faza rekristalizacija (oporavak mehaničkih i električnih svojstava). Kod oporavka zrna ne dolazi do značajne promjene mikrostrukture, ali smanjuju se zaostala naprezanja u materijalu te dolazi do preraspodjele dislokacija. Do oporavljanja dolazi nakon deformacije, naknadnim zagrijavanjem. Naravno, najveći utjecaj na oporavljanje ima temperatura zagrijavanja, trajanje zagrijavanja te stupanj prethodne deformacije. Vrlo bitan faktor je i temperatura oporavljanja (T_0) koja je ovisna o sastavu materijala i određuje se na osnovi temperature taljenja, u ovom slučaju bakra [18].
- Druga faza, odnosno rekristalizacija zrna se odvija na višim temperaturama od temperature oporavljanja. Temperatura rekristalizacije (T_R) također je ovisna o sastavu materijala tj. o temperaturi taljenja. Iz zrna, čija je gustoća dislokacija vrlo velika, nastaju nova, vrlo sitna zrna bez zaostalih naprezanja. Pojava rekristalizacijskih klica ukazuje na početak procesa rekristalizacije. Da bi došlo do rekristalizacije bitna su 2 faktora: prvi je taj da stupanj hladne plastične deformacije mora prijeći kritični stupanj deformacije koji je različit za svaki metal, ali okvirno govoreći može se reći da leži negdje između 2 % i 10 %. Isto vrijedi i za kritičnu temperaturu iznad koje započinje proces rekristalizacije. Povećanjem stupnja deformacije dolazi do smanjenja veličine zrna. Vrlo je bitno za naglasiti da se pri hladnoj obradi odvija samo proces deformacije, ali ne i rekristalizacije [18].

Na ovu temu provedena su broja istraživanja i mnoga od njih dovela su do sličnog zaključka koja su u skladu s različitim studijama i teorijama rekristalizacija. Kod žarenja, mehanizam rekristalizacije zrna odvija se neposredno nakon prvih par minuta zadržavanja, također dolazi do omekšavanja žice te smanjenja električnog otpora što je i cilj pri proizvodnji vodiča električne energije. Naravno, važno je za napomenuti da različite temperature i vrijeme trajanja žarenja na materijal ostavljaju drugačiji utjecaj. Povećanjem vremena žarenja dolazi do smanjenja nehomogenosti u raspodjeli veličine zrna na poprečnom presjeku [19].

Kod postupka u kojem nakon provlačenja nije potrebno žarenje materijala primijećeno je sljedeće:

- mehanička svojstva: porast čvrstoće i tvrdoće materijala s povećanjem stupnja deformacije. Studije pokazuju da na mehanička svojstva utječu nečistoće koje su se nalazile u polaznoj sirovini ili su dodane tijekom procesa
- fizikalna svojstva: povećanjem redukcije raste i električni otpor bakra
- zrna su nakon izvlačenja više izdužena, a to se posebno može zapaziti kroz zonu deformacije [20].

Dakako, postoji još promjena koje su zapažene u strukturi i mehaničkim svojstvima nakon postupka hladnog izvlačenja Cu-žice.

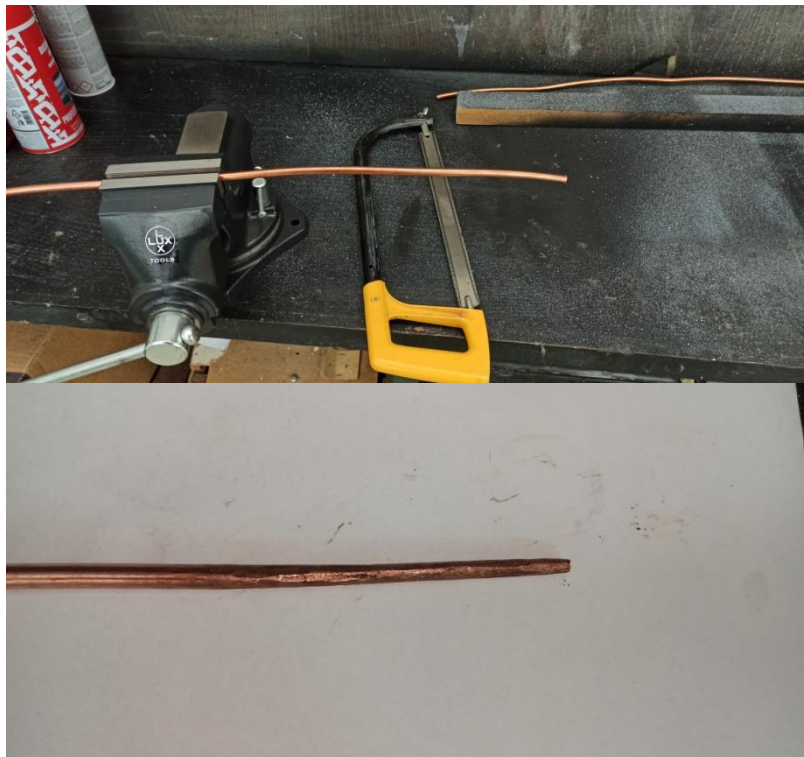
Porast tvrdoće povećava se sa svakom sljedećom provlakom dok deformacija uzrokuje porast gustoće dislokacija. Utvrđeno je kako deformirana Cu-žica sadrži veću gustoću dislokacija kao i male nakupine vakancija koje nastaju nagomilavanjem slobodnih mjesta izazvanih deformacijama dok su rezultati vlačnih ispitivanja pokazali da je nakon deformacije došlo do porasta granice razvlačenja i vlačne čvrstoće [21].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Provlačenje bakrene žice

U eksperimentalnom dijelu rada je korištena bakrena žica (99 % Cu) početnog promjera 8,00 mm koja je proizvedena UPCAST postupkom u firmi Eurocabel d.o.o. U navedenom postupku elektrolitičke katode čistog bakra tale se u indukcijskoj peći. Kako bi se osiguralo da talina bude čista i bez kontakta s kisikom iz okoline, na površinu taline se stavlja grafitni prah koji ju štiti od atmosfere. Samo lijevanje žice provodi se kontinuirano kroz 12 paralelnih grafitnih kokila. Kokile su hladene vodom i iznad svake nalazi se elektromotor koji povlači lijevanu žicu vertikalno prema gore. Posebnim sustavom prijenosa žice se dovode do namatača na koje se namataju i hlade. Nakon hlađenja žica se dalje prerađuje provlačenjem do željene dimenzije.

Dio uzoraka je uzet iz lijevanih žica (prije provlačenja), kako bi imali početnu strukturu i vrijednosti tvrdoće u lijevanom stanju. Kako bi istražili što se odvija u strukturi uslijed izvlačenja, dva uzorka žice su pripremljena za provlačenje. Priprema se provela na način da su početci žice kovanjem stanjeni do te mjere da se može provući kroz matricu, slika 10.



Slika 10. Priprema početka žice kovanjem

Nakon pripreme žica je podvrgnuta izvlačenju najprije kroz jednu matricu, nakon čega su uzeti uzorci za strukturalna ispitivanja i mjerenje tvrdoće. Nakon toga ostatak žice je provučen kroz još jednu matricu, kako bi vidjeli utjecaj stupnja deformacije na navedene promjene. Odabrane su matrice za provlačenje na dimenzije 7,1 mm i druga provlaka na 5,96 mm. Na taj način ostvarena su dva stupnja relativne redukcije u iznosima 23 % i 46 % u odnosu na početni poprečni presjek.

Izvlačenje je provedeno na vlačnoj klupi u Laboratoriju za obradu kovina deformiranjem na Metalurškom fakultetu, slika 11.



Slika 11. Provlačenje žice na vlačnoj klupi

Provlačenje se provodi na vlačnoj klupi pogonjenoj elektromotorom. Elektromotor sustavom zupčanika pokreće lanac koji povlači čeljusti koje drže žicu. Žica se kroz matricu provuče i prihvati čeljustima, koje ju provuku i time smanje presjek u odnosu na početni presjek.

Pri prvom izvlačenju, žica je u potpunosti provučena i uzeti su uzorci za strukturalna ispitivanja i mjerenje tvrdoće. Pri drugom izvlačenju, prije samog kraja izvlačenja zaustavljen je pogon vlačne klupe. Na taj način bilo je moguće uzeti uzorak iz same zone deformacije te su na njemu kasnije provedena strukturalna ispitivanja i izmjerene su tvrdoće po presjeku. Također su uzeti uzorci i iz izvučene žice u drugoj provlaci za strukturalna ispitivanja i mjerenje tvrdoće.

3.2. Uzorci

Nakon provlačenja, žica je pomoću uređaja za rezanje uzoraka (slika 12) izrezana u 7 dijelova. Odabrana su 4 uzdužna uzorka i 3 poprečna kako bi se pomoću daljnjih postupaka u konačnici detaljno proučila strukturalna žice prije, tijekom i nakon ostvarenih redukcija. Uređaj je konstantno hlađen emulzijom kako ne bi došlo do zagrijavanja jer bi u suprotnom došlo do promjene mikrostrukture.



Slika 12. Uređaj za rezanje uzorka

3.3 Metalografska priprema uzorka

Uzorci bakrene žice su nakon rezanja uloženi u vodljivu masu Conductomet postupkom vrućeg prešanja pod visokom temperaturom i tlakom pomoću uređaja za ulaganje Buehler Simplimet 1000 (slika 13). Na radnoj temperaturi koja iznosi 150 °C tijekom 2,30 min vodljiva masa se preša pod tlakom od 250 bara. Nakon zagrijavanja slijedi hlađenje s vodom na nešto više iznad sobne temperature koje se odvija 2,00 min. Postupak ulaganja odvija se tako da se uzorak postavi na stalak, potom se uzorak spusti u cilindar i stavlja se vodljiva masa koja u potpunosti mora prekriti uzorak, ali pazeći da ne prekrije vrh. Za tri uzorka korišten je jedan uzdužni te jedan poprečni prethodno izrezani uzorak, dok je za zadnje ulaganje korišten samo jedan uzdužni uzorak. Slika 14. prikazuje uzorak nakon ulaganja.



Slika 13. Uređaj za ulaganje uzoraka u vodljivu masu



Slika 14. Uzorak nakon ulaganja

Nakon ulaganja slijedilo je brušenje i poliranje. Uzorci su brušeni i polirani na uređaju Buehler „Phoenix Beta“ (slika 15). Brušenje je provedeno s različitim granulacijama papira (120x, 400x, 800x i 1200x) uz stalno hlađenje vodom, opterećenje od 10 N i trajanjem od 1 do 2 min. Nakon svake promjene granulacije (od grublje prema finijoj), uzorak je potrebno očistiti vodom. Potom je slijedilo poliranje na filcu za poliranje. Mekši materijali (kao što je Cu) se lakše poliraju. Poliranje se provodi uz stalno prisustvo vodene suspenzije glinice (Al_2O_3). Poliranjem na vrlo glatkoj površini uzorak poprima zrcalan izgled površine bez ogrebotina i pukotina. Nakon poliranja provedeno je nagrivanje uzoraka otopinom BERAHA, koja ima kemijski sastav: 200 g CrO_3 , 20 g NaSO_4 , 17 ml HCl i 1000 ml H_2O , u vremenu od 3 do 10 sekundi kako bi se jasno istaknula mikrostruktura.



Slika 15. Uređaj za brušenje i poliranje Vektor LC Buehler Phoenix

Nakon što su uzorci ispolirani, osušeni i nakon nagrivanja provedena je analiza mikrostrukture uzoraka na metalografskom mikroskopu Olympus GX51 s digitalnom kamerom DP 70 (slika 16) pri čemu su praćene promjene u mikrostrukтури (granice zrna, zona deformacije, dislokacije) na sva 4 uzorka.



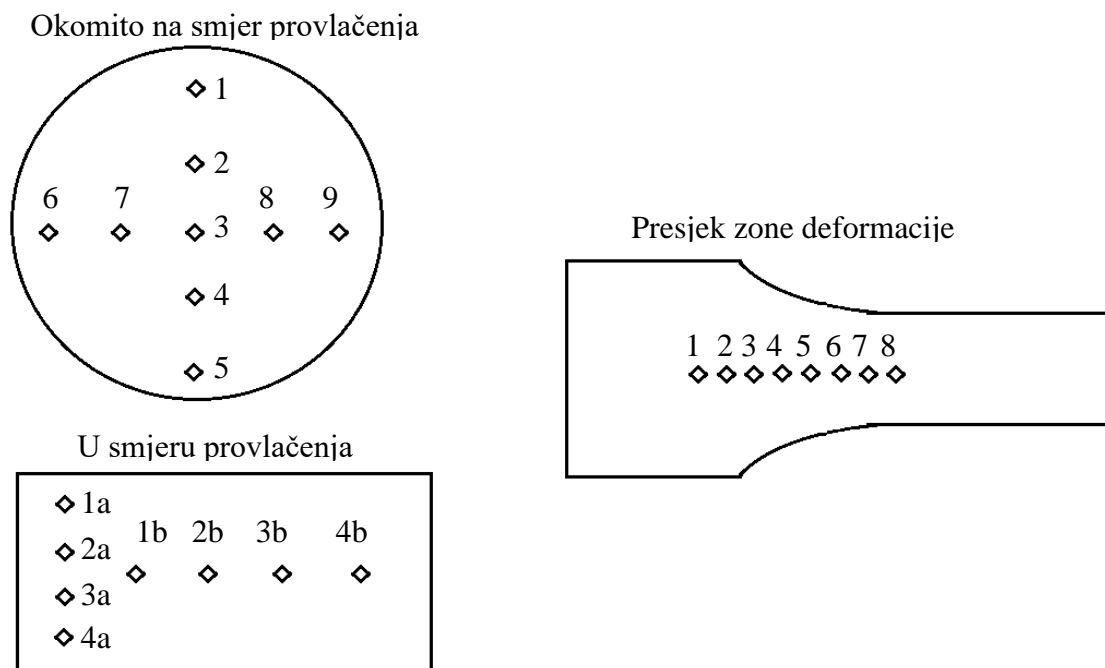
Slika 16. Metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70

3.4. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće provedeno je na uređaju za mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu (slika 17). Tvrdoća po Vickersu predstavlja otpor što materijal pruža prema prodiranju četverostrane dijamantne piramide s vršnim kutom od 136° pod djelovanjem neke sile (F). Prije samog početka mjerenja uređaj je potrebno provjeriti pomoću etalona. Etalon je ploča poznatih vrijednosti tvrdoće i opterećenja. Nakon provjere uređaja, mjerenje tvrdoće uzoraka je provedeno redom od prvog do posljednjeg uzorka prema danim shemama, slika 18. Vrijeme utiskivanja iznosilo je 15 s pod opterećenjem od 100 N.



Slika 17. Uređaj za mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu

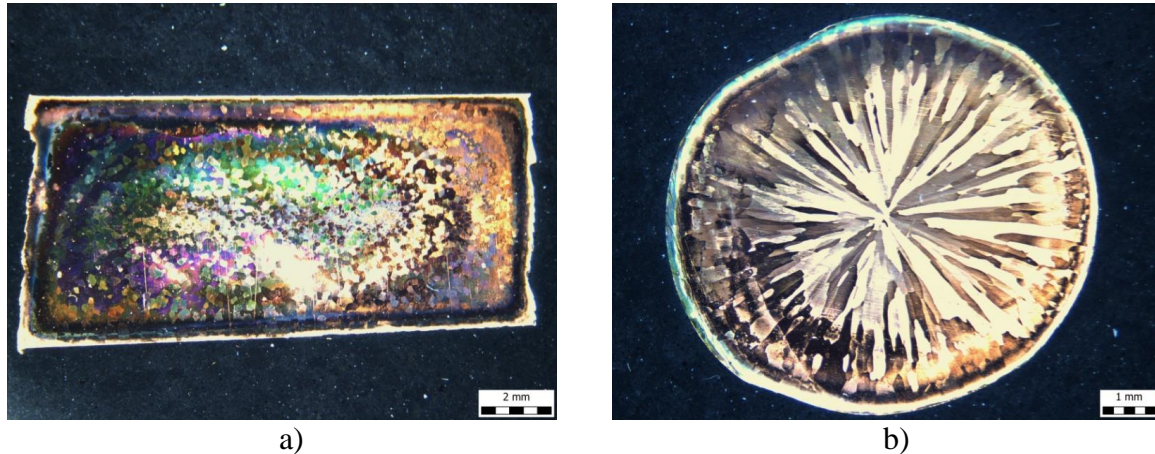


Slika 18. Shema mjerenja tvrdoće na uzorcima

4. REZULTATI I DISKUSIJA

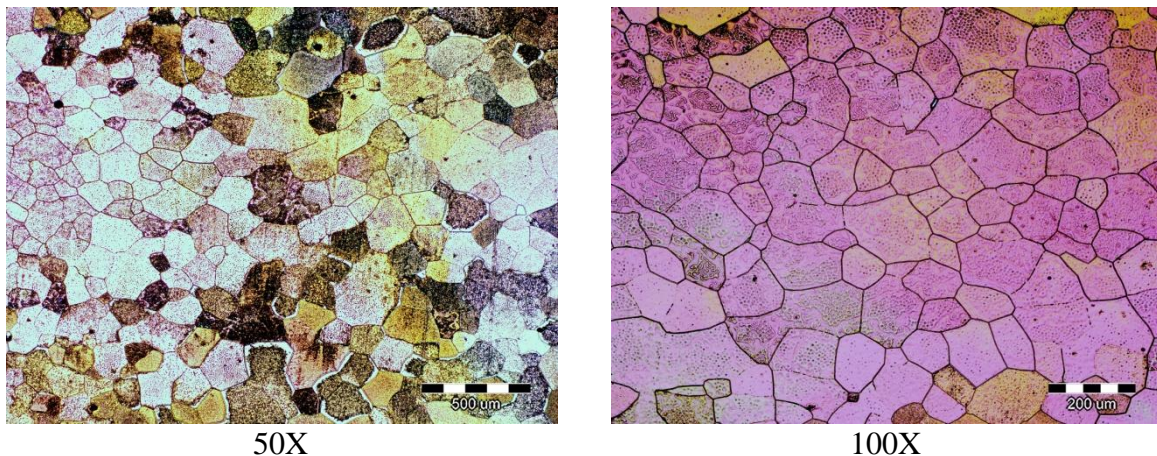
4.1. Početna struktura i izmjerene vrijednosti tvrdoće lijevane žice

Na uzorcima iz kontinuirano lijevane žice u smjeru lijevanja i okomito na smjer lijevanja, provedena je metalografska priprema i pomoću mikroskopa je promatrana makrostruktura žice, slika 19.



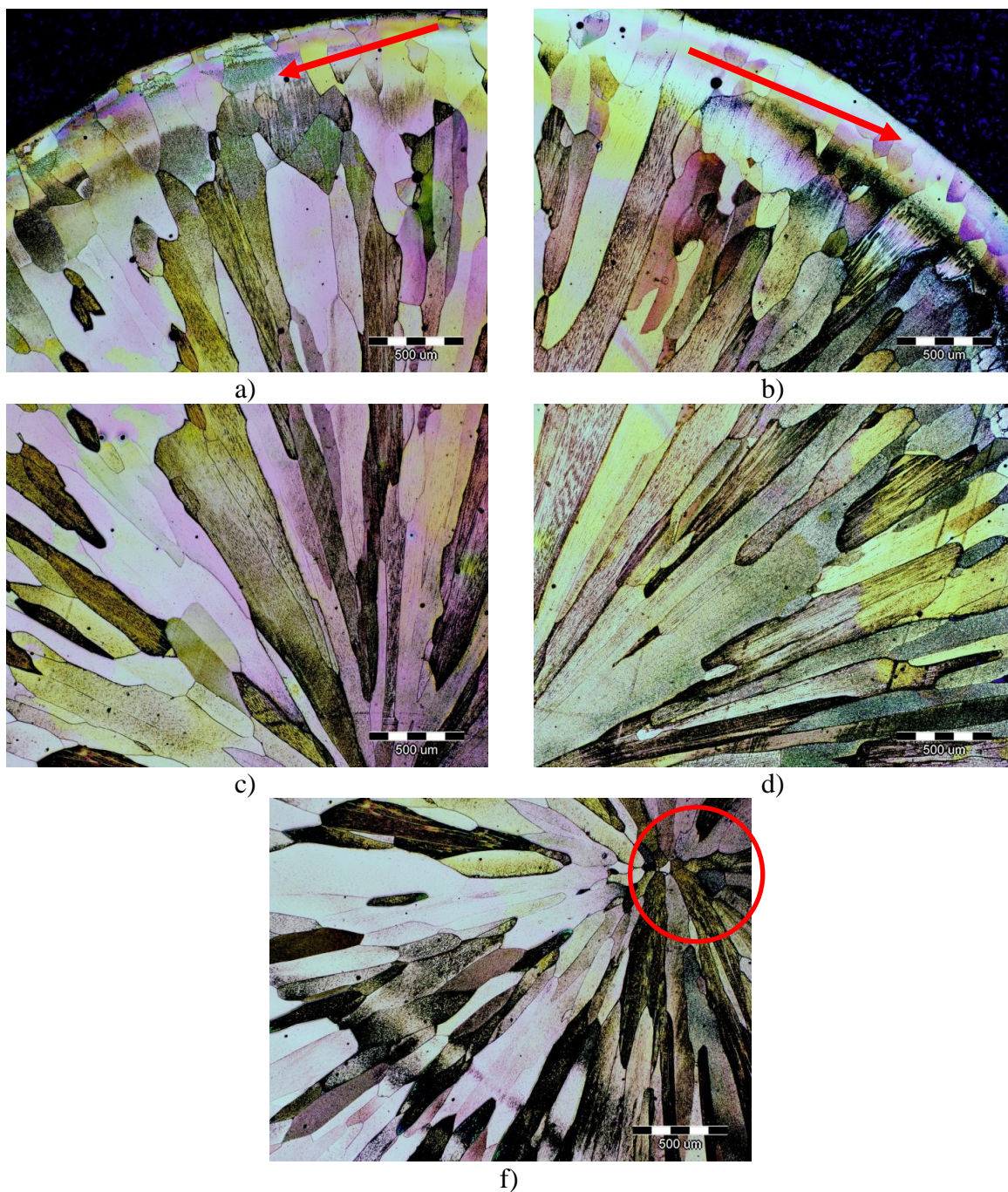
Slika 19. Makrostruktura početne žice u lijevanom stanju
a) u smjeru lijevanja
b) okomito na smjer lijevanja

Makrostruktura pokazuje tipičnu strukturu koja se javlja kod kontinuirano lijevane bakrene žice. Iz presjeka (slika 19 b) se jasno vide velika izdužena zrna koja su skrućivanjem rasla od samog ruba pa sve do centra presjeka. Mikrostruktura u smjeru lijevanja prikazana je na slici 20.



Slika 20. Mikrostrukture u smjeru lijevanja

U smjeru lijevanja se vidi jednolik izgled strukture lijevane žice. Na prvi pogled može se reći kako se radi o istoosnim zrnima, no iz presjeka okomito na smjer lijevanja vidljivo je kako se radi o izduženim zrnima. Mikrostruktura promatrane žice okomito na smjer lijevanja prikazana je slikom 21.



Slika 21. Snimljene mikrostrukture po presjeku okomitom na smjer lijevanja

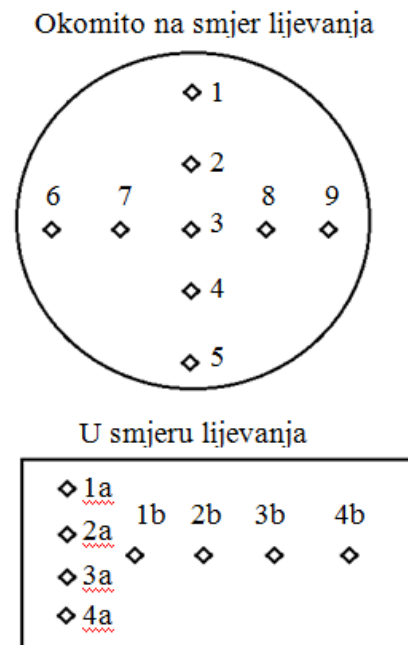
U vanjskom rubnom dijelu nalazi se tanka zona smrznutih kristala (slika 21 a i slika 21 b naznačeno strelicom). Oni nastaju uslijed velike brzine hlađenja taline u dodiru s grafitnom kokilom prilikom kontinuiranog lijevanja. Nakon zone smrznutih kristala slijedi zona stubičastih kristala, slika 21 c) i slika 21 d). Stubičasti kristali se protežu od rubne zone

smrznutih kristala pa sve do samog centra kontinuirano lijevane žice. Radi se o vrlo dugačkim kristalima te će biti vrlo zanimljivo vidjeti što se s njima događa tijekom plastične deformacije provlačenjem kroz matrice. U samom centru presjeka žice mogu se uočiti istoosni kristali, (slika 21 f) - označeno krugom)), koji se nalaze u vrlo malom broju.

Tablicom 1. dane su vrijednosti izmjerene tvrdoće po presjeku kontinuirano lijevane Cu - žice i to u smjeru lijevanja i okomito na smjer lijevanja, prema danoj shemi slika 22.

Tablica 1: Izmjerene vrijednosti tvrdoće u početnom stanju

	Okomito na smjer lijevanja		U smjeru lijevanja
1.	66,0	1.a)	79,2
2.	69,4	2.a)	73,7
3.	64,9	3.a)	73,0
4.	69,3	4.a)	70,5
5.	71,8	1.b)	73,0
6.	79,5	2.b)	69,6
7.	69,3	3.b)	63,7
8.	65,2	4.b)	70,3
9.	78,0		

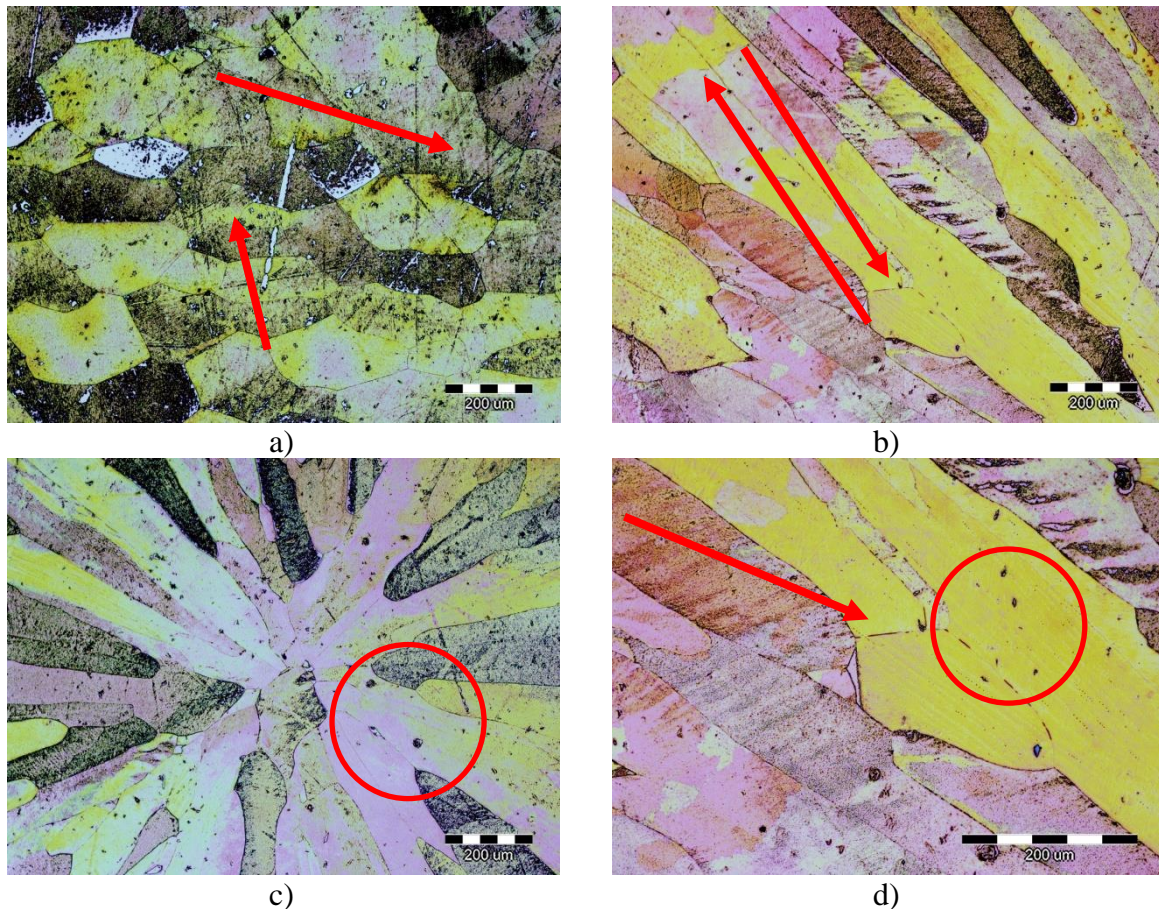


Slika 22. Mjerne pozicije

Izmjerene vrijednosti tvrdoće pokazuju jednoliku raspodjelu tvrdoće po presjeku žice u lijevanom stanju. Moguće je uočiti kako su nešto veće vrijednosti izmjerene u samom rubnom dijelu žice u području smrznutih kristala, no razlika nije značajna u odnosu na samu sredinu žice.

4.2. Struktura i tvrdoća Cu-žice nakon prve redukcije

Na uzorcima žice nakon redukcije žice za 23 %, prvo je promatrana mikrostruktura, slika 23.



Slika 23. Snimljene mikrostrukture po presjeku u smjeru provlačenja i okomito na smjer provlačenja nakon 23 % redukcije

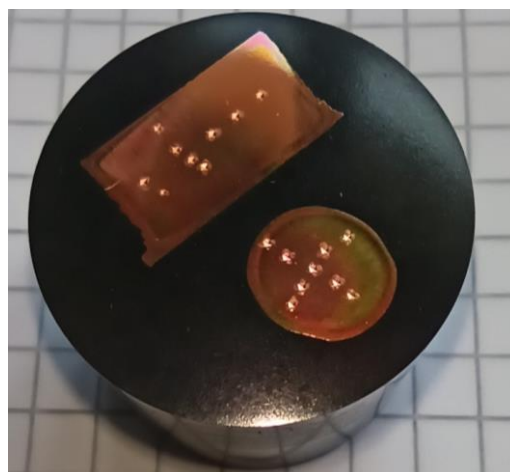
- a) mikrostruktura po presjeku u smjeru provlačenja pri povećanju, povećanje 200X
- b) i c) mikrostruktura po presjeku okomito na smjer provlačenja, povećanje 200X
- d) mikrostruktura okomito na smjer provlačenja, lom zrna pri povećanju 200X

Makrostruktura u smjeru i okomito na smjer ne ukazuje na značajne promjene nakon redukcije od 23 %, stoga su prikazane slike mikrostrukture. Nakon redukcije, uočljive su dislokacije, koje su na slikama označene strelicama. Pojava dislokacija je jasnije vidljiva u samom rubnom području žice, tj. u području smrznutih kristala, slika 23 a).

Također je moguće vidjeti kako je uslijed deformacije došlo do loma jednog dijela izduženih zrna, slika 23 b) i d). No, taj lom zrna nije jače izražen pri ovoj redukciji. Tablicom 2. dane su vrijednosti izmjerenih tvrdoća nakon 23 % ostvarene deformacije.

Tablica 2: Izmjerene vrijednosti tvrdoće nakon 23% redukcije, HV10

	Okomito na smjer lijevanja		U smjeru lijevanja
1.	97,5	1.a)	83,6
2.	90,3	2.a)	87,2
3.	90,9	3.a)	90,3
4.	89,4	4.a)	94,7
5.	91,4	1.b)	89,5
6.	92,0	2.b)	91,3
7.	87,0	3.b)	91,8
8.	91,8	4.b)	92,8
9.	84,1		

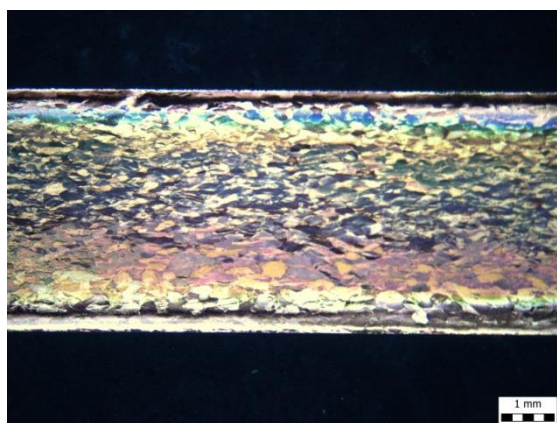


Slika 24. Mjesta na kojima su mjerene tvrdoće

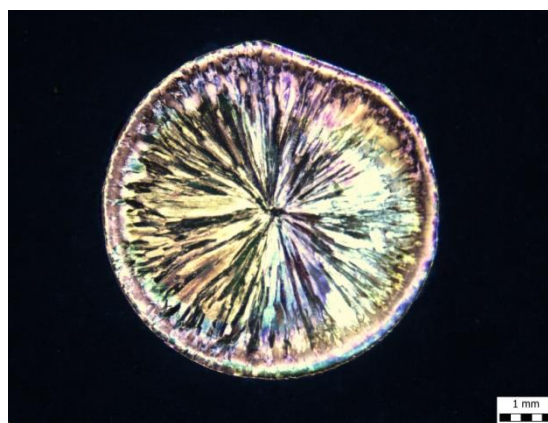
Iz izmjerenih vrijednosti tvrdoće jasno je vidljivo kako je uslijed redukcije došlo do očvršćivanja bakrene žice. Tvrdoće su ravnomjerno porasle po cijelom presjeku u odnosu na lijevano stanje. Iz izmjerenih vrijednosti tvrdoće nije vidljivo da u pojedinim dijelovima dolazi do izražajnijeg očvršćivanja.

4.3. Struktura i tvrdoća Cu-žice nakon druge redukcije

Nakon drugog provlačenja ostvareno je 46 % redukcije u odnosu na početno stanje. Također je promatrana makrostruktura Cu-žice, slika 25.



a)

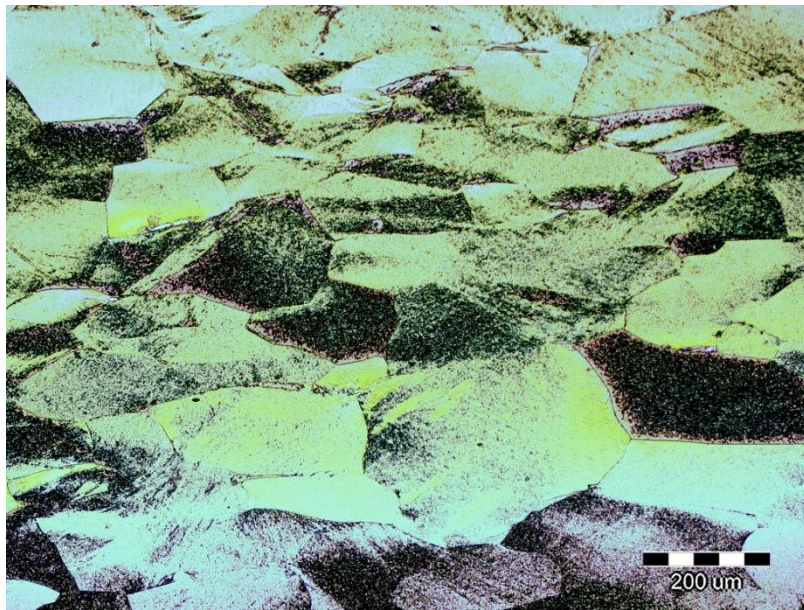


b)

Slika 25. Snimljene makro – strukture, a) u smjeru i b) okomito na smjer provlačenja

U odnosu na početno stanje, slika 25 a), vidi se da je uslijed deformacije došlo do značajnijeg usmjerenja zrna u smjeru provlačenja žice. To je posebno vidljivo u rubnom dijelu žice u

području gdje su u početku uočeni zamrznuti kristali. Mikrostruktura nakon 46 % redukcije prikazana je slikom 26.



a)



b)

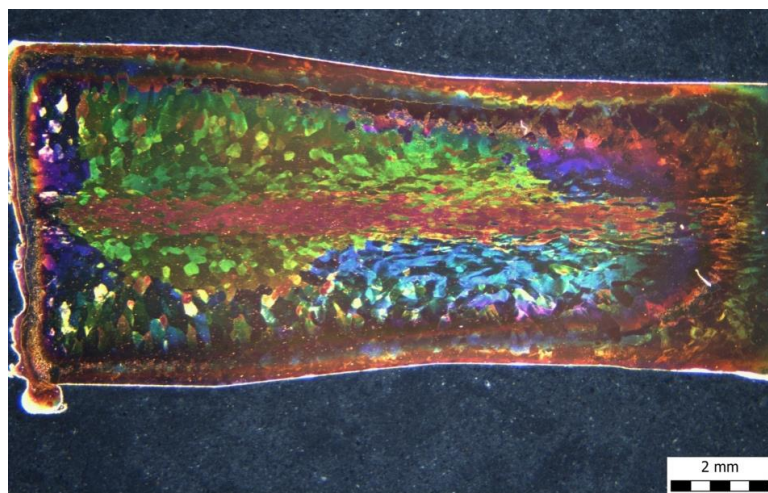
Slika 26. Snimljene mikro-strukture, a) u površinskom dijelu i b) centralni dio uzorka nakon ostvarenih 46 % redukcije

Pri ovoj redukciji dolazi do značajnijeg usmjerenja zrna u smjeru provlačenja, slika 26 a) i izraženog loma početnih izduženih stubičastih kristala. Porastom stupnja deformacije također dolazi do većeg broja dislokacija u presjeku Cu žice (slika 26 b) te je za očekivati i porast u vrijednostima tvrdoće. Rezultati ispitivanja tvrdoće dani su tablicom 3.

Tablica 3: Izmjerene vrijednosti tvrdoće nakon ostvarene 48 % redukcije, HV10

	Okomito na smjer lijevanja		U smjeru lijevanja
1.	113,1	1.a)	112,6
2.	110,8	2.a)	107,4
3.	102,7	3.a)	110,1
4.	104,3	4.a)	109,5
5.	114,4	1.b)	108,7
6.	113,6	2.b)	104,2
7.	110,9	3.b)	108,7
8.	109,3	4.b)	104,1
9.	109,2		

Izmjerene tvrdoće također ukazuju na značajno ojačanje Cu-žice tijekom daljnjeg provlačenja kroz matrice. Isto kao i kod prethodne provlake, može se uočiti kako je do veće promjene u tvrdoći došlo upravo u rubnom dijelu žice koji je u kontaktu s matricom tijekom izvlačenja. Ujedno je uočeno kako u tom dijelu dolazi do većeg usmjerenja u strukturi. Ovo je posebno uočljivo iz same zone deformacije, slika 27.

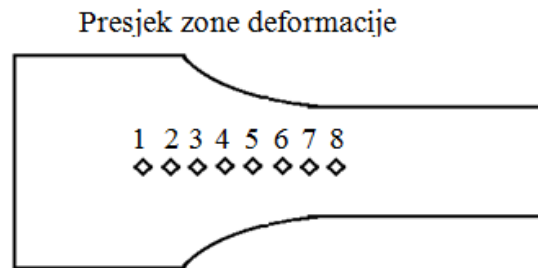


Slika 27. Struktura po zoni deformacije tijekom druge provlake

Vidljivo je kako u zoni deformacije tijekom provlačenja dolazi do usmjerenja strukture, te se pri tome istoosna zrna izdužuju u smjeru deformacije i prelaze u izdužena zrna. Kroz zonu deformacije također su izmjerene vrijednosti tvrdoće, tablica 4.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti tvrdoće po zoni deformacije tijekom druge provlake

	Izmjerene vrijednosti tvrdoće u smjeru izvlačenja
1.	89,4
2.	89,5
3.	90,3
4.	98,4
5.	99,5
6.	107,0
7.	106,6
8.	105,8

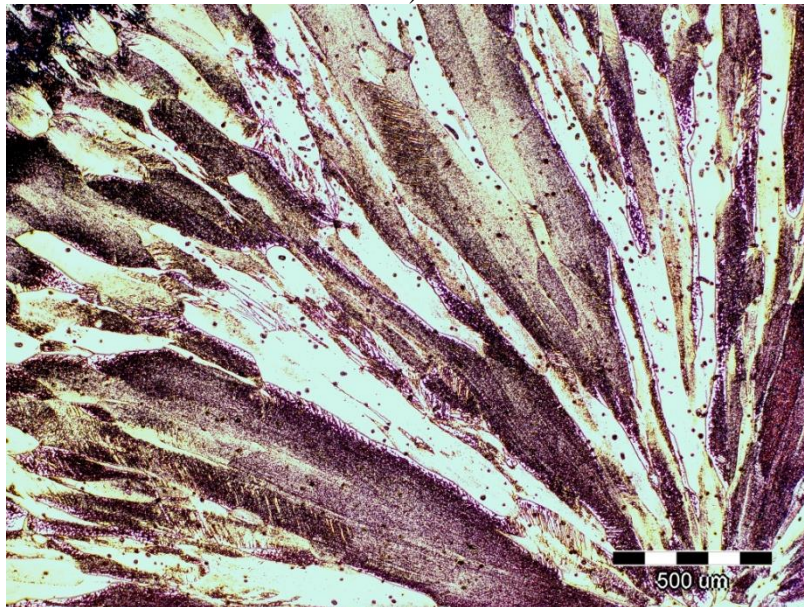


Slika 28. Pozicije mjerenja tvrdoće duž zone deformacije

Jasno je vidljivo kako tijekom deformacije dolazi do ojačanja i porasta vrijednosti tvrdoće Cu-žice. Mjerenjem tvrdoće uzduž zone deformacije (slika 28) vidi se kako porastom stupnja deformacije raste i tvrdoća. Usporedbom promjena u tvrdoći i strukturi, može se zaključiti kako do ojačanja dolazi uslijed usitnjenja zrna, povećanja gustoće dislokacija i usmjerenja strukture tijekom provlačenja Cu-žice. Povećanjem stupnja redukcije, porast tvrdoće je izraženiji te se paralelno s time uočava i usmjerenija struktura sa sitnijim zrnima koja nastaju drobljenjem početnih izduženih zrna, slika 29.



a)



b)

Slika 29. Usporedba mikrostrukture u početnom a) i konačnom stanju nakon druge redukcije presjeka b)

Ono što se vidi iz priložene usporedbe struktura (slika 29) je da tijekom redukcije dolazi do loma izduženih kristala i to je izraženije u vanjskom rubnom dijelu presjeka žice. Pri tome se jasno uočavaju dislokacije, čija gustoća raste s porastom stupnja redukcije.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada je bio uz opis jednog od najčešće korištenih postupaka proizvodnje bakrene žice, snimiti početnu mikro i makro strukturu te mikrostrukturne promjene do kojih dolazi tijekom provlačenja žice te kako se to manifestira na iznose tvrdoće žice. Istraživanja pokazuju sljedeće:

- Početna makrostruktura pokazuje tipičnu strukturu koja se javlja kod kontinuirano lijevane bakrene žice.
- U vanjskom rubnom dijelu nalazi se tanka zona smrznutih kristala, nakon koje slijedi zona dugih stubičastih kristala koji se protežu od površine sve do samog centra presjeka žice.
- U samom centru presjeka žice može se uočiti vrlo mali broj istoosnih kristala.
- Uslijed deformacije provlačenjem Cu-žice kroz matrice dolazi do značajnih promjena u strukturi u vidu usitnjenja zrna.
- Porastom stupnja deformacije dolazi do loma stubičastih kristala, te usmjerenja strukture u smjeru provlačenja.
- Porastom deformacije ekvialsijalna zrna se izdužuju u smjeru deformacije i prelaze u izdužena zrna.
- Povećanjem stupnja redukcije također se uočava pojava dislokacija po presjeku Cu žice.
- Uslijed navedenih strukturnih promjena dolazi do očvršćivanja žice što je jasno vidljivo iz izmjerenih vrijednosti tvrdoće.
- Porastom stupnja deformacije paralelno se povećava i izmjerena tvrdoće žice.
- Iz strukturnih promjena i izmjerenih vrijednosti tvrdoće, može se zaključiti kako se tijekom provlačenja glavnina deformacije ostvaruje u rubnom vanjskom dijelu žice. Vrijednosti tvrdoće su nešto većeg iznosa u rubnim dijelovima te se u istom području uočava i jače usitnjenje zrna i usmjerenija struktura po presjeku.

LITERATURA

- [1] R. F. Mehl, M. B. Bever, Metallurgy and metallurgical engineering series, McGraw-Hill, New York, 1961.
- [2] N. R. Wright Wright, Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy, 2 izdanje, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016.
- [3] M. Notis, The history and evolution of wire drawing techniques, Materials Engineering, Mechanical Engineering, Jom, 2004
- [4] <https://www.electricalworksflorida.com/basic-steps-involved-in-the-manufacturing-of-copper-wires/> [posljednji pristup, 8. lipanj 2020.]
- [5] <https://upcast.com/upcast-continuous-casting-technology/> [posljednji pristup, 10. lipanj 2020.]
- [6] http://www.versacorp.rs/index_en.html [posljednji pristup, 10. lipanj 2020.]
- [7] Zbornik radova, Naučno-stručni skup Ekoist, Univerzitet u Beogradu – Tehnički fakultet u Boru, 2009
- [8] <https://energy-utilities.com/contirod-continuous-casting-plant-prod1240803.html> [posljednji pristup, 14. lipanj 2020.]
- [9] V. Stoiljkovic, M. Arsenovic, L. Stoiljkovic, N. Stojanovic, Determination of the Optimal Parameters of Castin a Copper Wire by the Application of Neural Networks. In: Kuljanic E. (eds) Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 372. Springer, Vienna, 1996.
- [10] Utvrđivanje objedinjenih uvjeta zaštite okoliša za izmjenu zahvata poslovno – proizvodnog kompleksa „Eurocable Group“, III Tehničko-tehnološko rješenje, Zagreb, 2012.
- [11] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985
- [12] <https://patents.google.com/patent/CN102168180A/en> [posljednji pristup, 16. lipanj 2020.]
- [13] S. K. Ganguli, Power Cable Technology, CRC Press, Boca Raton, 2016.
- [14] H.U. Künzi, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001.
- [15] <https://www.indiamart.com/shreemahalaxmidie/diamond-wire-dies.html> [posljednji pristup, 19. lipanj 2020]

- [16] U. Kiwus, PCD MANT wire drawing dies for drawing fine copper wire, Aachen, Germany, 2010.
- [17] G. E. Dieter. Mechanical Metallurgy. 3rd ed., Mc Graw-Hill Book Co., New York 1986.
- [18] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [19] A. Akbari , G. H. Hasani, M. Jamshidi Jami, An experimental investigation on the effect of annealing treatment on strain inhomogeneity in the cross-section of drawn copper wires, Department of Material Science and Engineering, Department of Metallurgical and Material Engineering, Iran, Roznov pod Radhostem, Czech Republic, EU, 2010.
- [20] M. Zidani, M. D. Hadid , S. Messaoudi , F. Dendouga, L. Bessais, F. Baira , M. Bayarassou, A. L. Helbert , M. H. Mathon, T. Baudin, The drawing process of the wires of copper and aluminum: Evolution of the microstructure and (mechanical/electrical) properties, Brno, Czech Republic, EU, 2014.
- [21] S. Messaoudi, M. Zidani, T. Baudin, C. E. Derfouf, A. Boulagroun, M. H. Mathon, Temperature and deformation effects on the recrystallization microstructure of wire drawn copper, Department of Metallurgy, University of Biskra - Laboratory of Physico-chemistry of Solid State - University Paris - South, Léon Brillouin Laboratory – France, Brno, Czech Republic, EU, 2011.