Hrapavost površine bakrenih legura dobivena obradom odvajanjem čestica

Šajatović, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:747489

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište Sjever

Završni rad br. 372/PS/2022

Hrapavost površine bakrenih legura dobivena obradom odvajanjem čestica

Nikola Šajatović, 2806/336

Varaždin, ožujak 2022. godine

Sveučilište
Sjever

Odjel za strojarstvo

Završni rad br. 372/PS/2022

Hrapavost površine bakrenih legura dobivena obradom odvajanjem čestica

Student

Nikola Šajatović, 2806/336

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, ožujak 2022. godine

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

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za strojarstvo

STUDIJ: preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK: Nikola Šajatović | JMBAG: 2806/336

DATUM: 09.03.2022. | KOLEGIJ: Alatni strojevi

NASLOV RADA: Hrapavost površine bakrenih legura dobivena obradom odvajanjem čestica

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: Surface roughness of copper alloys obtained with machining

MENTOR: dr.sc. Matija Bušić | ZVANJE: docent

ČLANOVI POVJERENSTVA:

1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. dipl. ing. stroj. Marko Horvat, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva
5.

Zadatak završnog rada

BROJ: 372/PS/2022

OPIS:

U završnom radu potrebno je, na temelju dostupnih podataka iz literature, proučiti obradu odvajanjem čestica glodanjem. Navesti parametre obrade koji su specifični u glodanju. Navesti i opisati alate koji se koriste u glodanju. Detaljno opisati bakar i legure bakra te navesti specifičnosti alata koji se koriste za glodanje obojanih metala. Objasniti pojam hrapavosti površine prema normi ISO 4287.
U eksperimentalnom dijelu rada provesti obradu odvajanjem čestica glodanjem limova bakra sa različitim parametrima posmične brzine. Na obrađenim površinama provesti mjerenje stupnja hrapavosti površine. Donijeti zaključak o utjecaju parametara obrade na izmjerenu hrapavost obrađenih površina.

ZADATAK URUČEN: 10.03.2022. | POTPIS MENTORA: M. Bušić

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE SJEVER

Sveučilište
Sjever

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, NIKOLA ŠAJATOVIĆ *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom HRAPAVOST POVRŠINE BAKRENIH LEGURA DOBIVENA ODABRANIM ODVAJANJEM ČESTICA *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Nikola Šajatović
(vlastoručni potpis)

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

Ja, NIKOLA ŠAJATOVIĆ *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom HRAPAVOST POVRŠINE BAKRENIH LEGURA DOBIVENA ODABRANIM ODVAJANJEM ČESTICA *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Nikola Šajatović
(vlastoručni potpis)

Predgovor

Zahvaljujem se svim profesorima i djelatnicima sveučilišta na korisno prenesenom znanju koje sam stekao za vrijeme studiranja.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. stroj. koji me je vodio kroz pisanje završnog rada, na uloženom vremenu, savjetima i idejama za izradu završnog rada.

Ovim putem iskrenu zahvalu iskazujem svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Sažetak

U ovom radu opisan je bakar kao materijal. Prikazana su njegova svojstva, primjena te način obrade. Objašnjeno je glodanje kao postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg su glavni parametri obrade dubina rezanja, brzina rezanja te posmak. Glodanje se izvodi na alatnim strojevima glodalicama, alatima za obradu obojenih metala.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je glodanje limova bakra te je mjerena površinska hrapavost dobivena u različitim stanjima eksperimenta sa različitim parametrima obrade.

Ključne riječi: bakar, glodanje, alati, limovi

Summary

In this research paper the copper is described as a material. His characteristics are shown, his use and the way of processing copper. Milling is described as a procedure that separates particles in which the main parameters of processing copper are the depth of cutting, the speed of cutting and feedrate. The milling is performed on the machine tools of the milling machine, the tools for processing coloured metals.

In the experimental part the milling of the copper tins was carried out and the surface roughness obtained in different parts of the experiment with different parameters of the treatment.

Key words: copper, milling, tools, tins

Popis korištenih oznaka i kratica

tj.	to jest
α	alfa
β	beta
γ	gama
δ	delta
Cu	bakar
Zn	cink
Ni	nikal
Sn	kositar
Pb	olovo
Al	aluminij
Be	berilij
P	fosfor
Fe	željezo
C	ugljik
Mn	mangan
FCC	plošno centrirana kubična rešetka
BCC	prostorno centrirana kubična rešetka
HCP	heksagonska rešetka
^{o}C	Celzijev stupanj
DIN	Deutsches Institut für Normung
itd.	i tako dalje
R_{Sm}	Srednji korak elementa profila

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Bakar kao tehnički materijal 2
   2.1. Bakrove legure 2
      2.1.1. Mjedi *3*
      2.1.2. Hladno gnječene α – mjedi *4*
      2.1.3. Hladno gnječene (α +β) – mjedi *5*
      2.1.4. Posebne mjedi *6*
      2.1.5. Lijevane mjedi *6*
      2.1.6. Legure bakra s cinkom i niklom *7*
      2.1.7. Kositrena bronca *7*
      2.1.8. Crveni lijev *10*
      2.1.9. Aluminijeva bronca *10*
      2.1.10. Hladno gnječene α – legure *11*
      2.1.11. Toplo gnječene i lijevane legure *12*
      2.1.12. Olovna i olovno – kositrena bronca *12*
      2.1.13. Berilijeva bronca *12*
      2.1.14. Manganova i silicijeva bronca *13*
      2.1.15. Legure bakra s niklom *13*
   2.2. Svojstva bakra 14
   2.3. Primjena bakra 16
   2.4. Proizvodi koji se izrađuju od bakra 17
3. Glodanje kao postupak obrade odvajanjem čestica 18
   3.1. Podjela postupaka glodanja 19
   3.2. Parametri obrade 19
   3.3. Alati za glodanje 21
   3.4. Posebni alati za glodanje bakra 24
4. Eksperimentalni dio 29
   4.1. Površinska hrapavost 30
   4.2. Provođenje pokusa 33
5. Zaključak 37
6. Literatura 38

Popis slika 39

Popis tablica 41

1. Uvod

Čovjek koristi bakar i bakrove legure (bronce i mjedi) već od davnine tj. brončanog doba. Bakrove legure zbog svojeg dobrog svojstva lijevanja u početcima su se koristili za izradu različitog oruđa, ukrasnih predmeta te skulptura.

Danas se bakar upotrebljava pretežito u elektrotehnici, dok se kao konstrukcijski materijal u strojarstvu i brodogradnji koriste uglavnom njegove legure [1].

U primjeni postoji mnogo proizvoda koji su djelomično do potpuno sastavljeni od bakra i njegovih legura.

Razvojem tehnologije čovjeku se olakšava način života kako bi se smanjio dodatni rad, a samim time i povećala produktivnost. Radi lakše obrade konstruirani su razni alatni strojevi koji omogućavaju lakšu, bržu te precizniju obradu navedenog materijala.

Obrada odvajanjem čestica je jedna od najvažnijih grupa proizvodnih metoda koja objedinjuje različite postupke uslijed kojih se dobije željeni oblik metodom odvajanja [2].

Cilj završnog rada je prikazati bakar kao tehnički materijal i njegovo ponašanje pri obradi glodanjem, kako se pri promjeni parametara mijenja utjecaj topline te kako ti parametri utječu na točnost i preciznost obrađivanog materijala.

2. Bakar kao tehnički materijal

Bakar je metal koji ima svijetlocrvenkastu boju, relativno je mekan, vrlo žilav i rastezljiv. Zbog svojih dobrih svojstava, po raznovrsnosti uporabe bakar zauzima jedno od prvih mjesta među metalima. Bakar ima izvrsnu toplinsku i električnu vodljivost, otpornost na koroziju i dobra mehanička svojstva, te se njegova uporaba zasniva baš na tome. Zbog standardnog elektrokemijskog potencijala bakar ne korodira uz razvijanje vodika i prema tome spada u materijale korozijski otporne u neoksidirajućim kiselinama. U vlažnoj atmosferi, u vodi i u tlu bakar se prekriva zelenkastim i plavkastim slojem produkta korozije koji se naziva patina koja ga štiti od daljnje oksidacije. Baš zbog tako stvorene patine očuvani su predmeti stari i do tri tisuće godina. Patina je smjesa bakrova hidroksida i neke soli, ovisno o mediju u kojem se nalazi. Tako u morskoj vodi nastaje kloridna patina čiji sastav odgovara mineralu atakamitu [3].

2.1. Bakrove legure

Bakrove legure obično se klasificiraju na temelju vrste i udjela glavnih legirnih elemenata, ali svaka pojedina vrsta može sadržavati i druge elemente koji imaju značajan utjecaj na specifična svojstva. Glavne vrste legura označene su tradicionalnim imenima: mjedi i bronce. Mjedi su zapravo legure bakra s cinkom kojima mogu biti dodani i drugi elementi. Postoje osnovno dvije vrste mjedi: α-mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u hladnom stanju i (α +β)- mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u toplom stanju. Tipične bronce su legure bakra s kositrom. Ostale vrste bronca pored bakra mogu sadržavati još cink, olovo, aluminij, željezo, mangan, berilij, silicij itd. ime dobivaju po elementu koji je prisutan u najvećoj količini, npr. aluminijeva bronca, olovna bronca, berilijeva bronca itd. dakle, glavne su skupine legura:

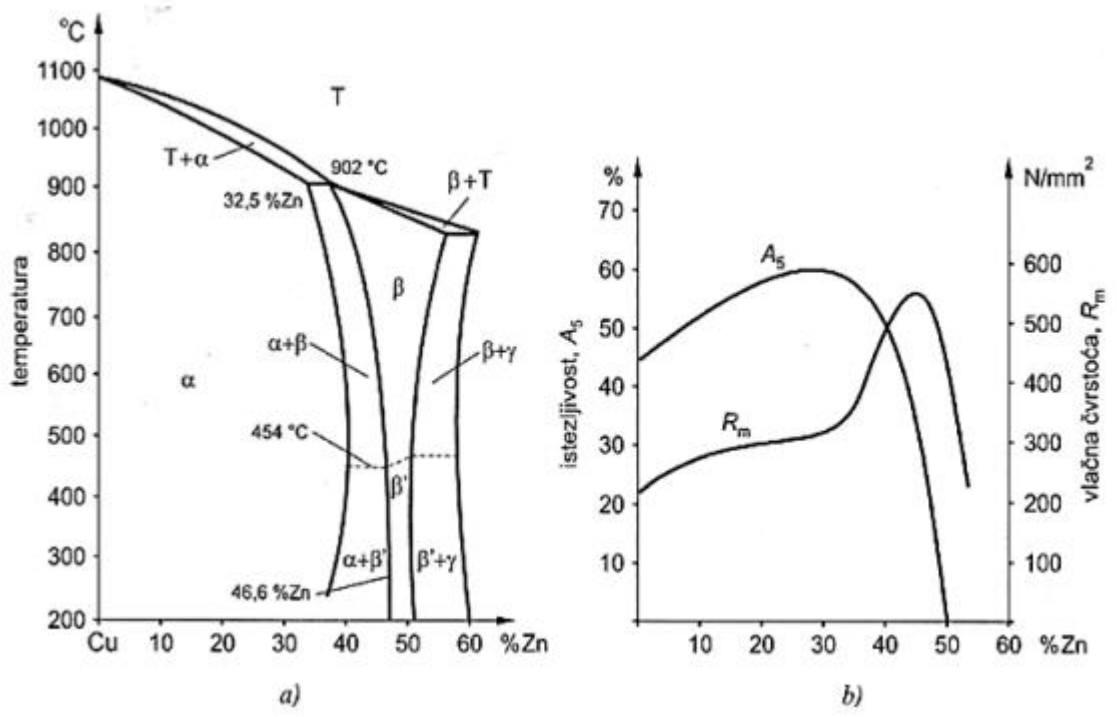
1. Legure bakra s cinkom:
   a) legure bakra s cinkom (>50% Cu i < 44% Zn) – mjedi
   b) posebne mjedi (54…62% Cu, oko 7% drugih elemenata, ostatak Zn)
   c) legure bakra s niklom i cinkom (10…30% Ni) – novo srebro
   d) Cu-Zn-Sn-Pb; >80% Cu – crveni metal, crveni lijev.

2. Legure bakra bez cinka:
    a) legure bakra s kositrom (<15% Sn) – kositrene bronce
    b) legure bakra s aluminijem (<14% Al) – aluminijeve bronce
    c) legure bakra s kositrom i/ili olovom (<10% Sn i/ili <25% Pb) – olovno-kositrene i olovne bronce
    d) legure bakra s berilijem (<2% Be) – berilijeve bronce
    e) legure bakra s manganom te silicijem i manganom – manganove i silicijeve bronce
    f) legure bakra s niklom (<45% Ni). [1]

2.1.1. Mjedi

Glavne legure bakra s cinkom, mjedi, najrasprostranjenije su legure bakra s vrlo raznolikom primjenom koja slijedi na osnovi sljedećih svojstava: dobre električne i toplinske vodljivosti, dobrih mehaničkih svojstava, mogućnosti prerade u hladnom i toplom stanju i antikorozivnosti. Vezu između mikrostrukture i mehaničkih svojstava mjedi može se pratiti usporedbom ravnotežnog dijagrama stanja Cu-Zn i dijagrama u kojem je prikazana ovisnost vlačne čvrstoće i istezljivosti o udjelu cinka (slika 2.1). Pri peritektičnoj temperaturi od 902 ºC bakra otapa do 32,4% Zn. Topljivost raste sa sniženjem temperature do 39%, pri 454 ºC. uz vrlo sporo hlađenje, što omogućava postizanje ravnoteže, topljivost cinka u bakru opada do 35,2% pri 250 ºC. Difuzija cinka je vrlo spora, tako da uz industrijske brzine ohlađivanja ostaje na sobnoj temperaturi oko 37% Zn otopljenog u kristalima mješancima bakra. Ta čvrsta otopina označena je kao α. Porastom udjela cinka u leguri iznad 37% pojavljuje se u mikrostrukturi intermetalna faza β’ (sređena struktura) koja odgovara sastavu Cu-Zn. β’- faza je tvrda, ali prilično žilava na sobnoj temperaturi. Zagrijavanjem iznad 454 ºC prelazi u oblik β (nesređena struktura) koja je oblikovljiva deformiranjem. Nasuprot bakru s FCC i cinku s HCP rešetkom, β’ ima strukturu koja se može opisati kao BCC iako to nije potpuno korektno. Naime, tu se radi o dvije vrste atoma dok se pojam BCC odnosi na kristalnu strukturu u kojoj su svi atomi iste vrste. Ovdje se zapravo radi o dvije jednostavne rešetke koje se međusobno isprepliću. U jednoj rešetki u centru je atom bakra, a na uglovima su atomi cinka, dok je u susjednoj rešetki obrnut slučaj. Kako atomi bakra i cinka zaposjedaju fiksne položaje u rešetki, ne dolazi kod skrućivanja do segregacija. Između 45 i 50% Zn legura je monofazna. Mikrostruktura se sastoji samo od intermetalne faze β’. Daljnji porast udjela cinka iznad 50% dovodi do pojave γ- faze u mikrostrukturi. Ona je vrlo krhka i zbog toga je legura nepovoljna za inženjersku primjenu.

Zbog takvih svojstava pojedinih faza tehničke legure ne sadrže više od 44 % Zn. Na osnovi prethodnog razmatranja mjedi se mogu razvrstati na hladno i toplo gnječene (oblikovljive) legure [1].



Slika 2.1 Dijagramski prikaz stanja Cu – Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b) [1]

2.1.2. Hladno gnječene α – mjedi

Hladno gnječene α- mjedi su po mikrostrukturi jednofazne homogene legure. Primjenjuju se zbog vrlo dobre duktilnosti koja je maksimalna kod 30% Zn. Da se to postigne, legura mora biti visoke čistoće, jer uključci već u vrlo maloj količini znatno smanjuju duktilnost. Zahtjevi za bakrom i cinkom visoke čistoće čine ovu leguru u proizvodnji vrlo skupom. α- mjedi su prilično osjetljive na temperaturama žarenja zbog opasnosti od naglog porasta zrna pa se leguru lako može „ spaliti“ (to je pojam iz prakse kojeg ne treba miješati s oksidacijom). Temperature žarenja su do oko 600 ºC. Zrno toliko poraste da je vidljivo bez pomoći optičkih pomagala. U mikrostrukturi inače jednofazne legure $CuZn_{37}$ mogu se u praksi pojaviti male količine β- faze. Nastaje pri temperaturama iznad fazne granice α/α+β pri žarenju legure koja je prethodno hladno gnječena i ostaje u mikrostrukturi zbog spore pretvorbe u α- fazu tijekom hlađenja na sobnu temperaturu. Znatno umanjuje sposobnost hladnog oblikovanja legure. Hladno oblikovanje α- mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju.

Tijekom hladnog oblikovanja dislokacije se nakupljaju na granicama zrna radi čega ta mjesta poprimaju stanje s višom energijom. Korozija koja se može javiti uz prisutnost manjih količina amonijaka i vlage, prodire interkristalno budući da su područja uz granice zrna „anodna“ prema njihovoj okolini. Zbog korozije slabe veze po granicama zrna i pojavljuju se pukotine radi prisutnih zaostalih naprezanja. Pojam „season cracking“ uporabljen je za opis spontanog raspucavanja opaženog kod uskladištenog streljiva (čahure) u Indiji tijekom monsunskih kiša (amonijak u zraku zbog blizine konjušnice). Ovaj nedostatak može se ukloniti žarenjem za smanjenje zaostalih naprezanja pri temperaturi od oko 250 º C nakon prerade [1].

2.1.3. Hladno gnječene (α +β) – mjedi

Toplo gnječene (α+β) – mjedi su legure sa više od 37% Zn i do 60% Cu i gotovo su potpuno oblikovljive toplom preradom. α- mjedi toplo se oblikuju samo u početnoj fazi oblikovanja. Slično se i ograničena količina hladne obrade može primijeniti na (α+β) – mjedi koje sadrže samo mali udjel β-faze. U pravilu se (α+β)- mjedi oblikuju u toplom stanju u početnim fazama prerade dok se hladno oblikovanje primjenjuje samo za dobivanje završnih dimenzija i korektnog stupnja očvrsnuća za daljnju uporabu. Topla prerada izvodi se u β- mikrostrukturnom području, α- faza je potpuno apsorbirana u β- fazi, tako da je najbolje temperaturno područje za toplu preradu između 650 ºC i 750 ºC. U tom temperaturnom intervalu tijekom hlađenja dolazi do precipitacije α- faze u obliku sitnih čestica, čemu doprinosi mehanička prerada. Time se sprječava obnavljanje grubozrnate usmjerene Widmannstättenove mikrostrukture koja snižava mehanička svojstva. Smanjena žilavost i heterogenost povoljne su za poboljšanje obradivosti ovih legura postupcima odvajanja čestica (tokarenje, bušenje, glodanje, blanjanje). Za daljnje poboljšanje obradljivosti odvajanjem čestica legurama se dodaje olovo (1% do 3%).

Ono je netopljivo u mjedi i raspoređeno je u mikrostrukturi u obliku malih kuglica koje uzrokuju lokalni lom za vrijeme rezanja. Kod (α+β)- mjedi može nastupiti još jedna vrsta korozije koja se pogrešno naziva „korozija cinka“ ili „otcinkavanje“. Može nastati u vodenim otopinama uz lokalnu koroziju. Napredovanjem otapanja bakra i cinka pomiče se elektrokemijski potencijal na graničnoj površini metal/otopina. Pri tome nastaju uvjeti uz koje se plemenitiji bakar ponovno taloži, a manje plemenita β- faza i dalje korodira. Ova pojava može se spriječiti uporabom posebnih mjedi [1].

2.1.4. Posebne mjedi

Posebne mjedi se sastoje od 54…62% Cu i do oko 7% drugih elemenata, dok je ostatak cink. Legirni elementi poboljšavaju korozijsku postojanost ili druga svojstva to su toplo oblikovljive legure, a mogu se primijeniti i u lijevanom stanju. Vlačna čvrstoća im je povećana i na više od 700 N/mm^2 u lijevanom (kokilni lijev) ili kovanom stanju. Dodatkom do 2% nikla, mangana, željeza, aluminija i silicija pojedinačno i do 1% kositra ujedno se povećava i korozijska postojanost legura. Utjecaj legirnih elemenata je sljedeći:

- Aluminij znatno povećava čvrstoću, a istezljivost pri tome ostaje nepromijenjena. Na površini mjedi aluminij stvara oksidni sloj koji štiti mjedi od oksidacije. Dodatak 2% Al štiti mjed od oksidacije na povišenim temperaturama
- Nikal povećava čvrstoću, otpornost na koroziju i djeluje na usitnjenje zrna pri žarenju
- Željezo usitnjuje zrno i tako povećava čvrstoću
- Mangan znatno povećava otpornost mjedi na koroziju u morskoj vodi i vodenoj pari, solima i kiselinama. Čvrstoća mjedi raste bez smanjenja žilavosti uz udio mangana do 4% pri udjelu iznad 4% smanjuju se žilavosti i istezljivost
- Silicij smanjuje zaostala naprezanja, povećava žitkost kod zavarivanja stvaranjem topljive troske
- Kositar povećava otpornost na koroziju u morskoj vodi. Djeluje i na povećanje čvrstoće, ali se udio kositra ograničava na oko1%, jer u većem udjelu smanjuje istezljivost [1].

2.1.5. Lijevane mjedi

Lijevane mjedi imaju u pravilu 36% do 43% Zn i 1% do 3% Pb, a posebne mjedi još i nikla, aluminija, željeza, kositra ili mangana. Posjeduju uski interval skrućivanja i zbog toga ne dolazi do segregacija u zrnu. Ove legure nisu predviđene za hladno oblikovanje zbog heterogene (α+β)- mikrostrukture, pa se primjenjuju u lijevanom stanju zbog povišene čvrstoće. Za određene namjene lijevaju se i α- mjedi [1].

2.1.6. Legure bakra s cinkom i niklom

Dodatkom od 10% do 30% Ni legurama s 55% do 63% Cu, a ostatak je cink, dobivaju se legure srebrnaste boje poznate pod različitim nazivima: novo srebro, alpaka, argentan, bijeli bakar itd. Cink poboljšava livljivost i prije svega pojeftinjuje leguru. Viši postotak cinka treba izbjegavati jer smanjuje otpornost na koroziju i čvrstoću. Po mikrostrukturi to su u potpunosti čvrste otopine i usporedive su po mehaničkim svojstvima sa sličnim mjedima. Vrlo su duktilne i mogu se hladno oblikovati. U odnosu prema pravim mjedima pokazuju bolju početnu otpornost što ih čini prikladnim za izradu relejnih opruga i posrebrenog pribora. Legure koje sadrže olovo boljih su mehaničkih svojstava od odgovarajućih im mjedi pa se koriste u finoj mehanici, optici, graditeljstvu itd. Legure bakra s niklom također su kao i mjedi osjetljive na napetosnu koroziju koja je opisana kod mjedi [1].

2.1.7. Kositrena bronca

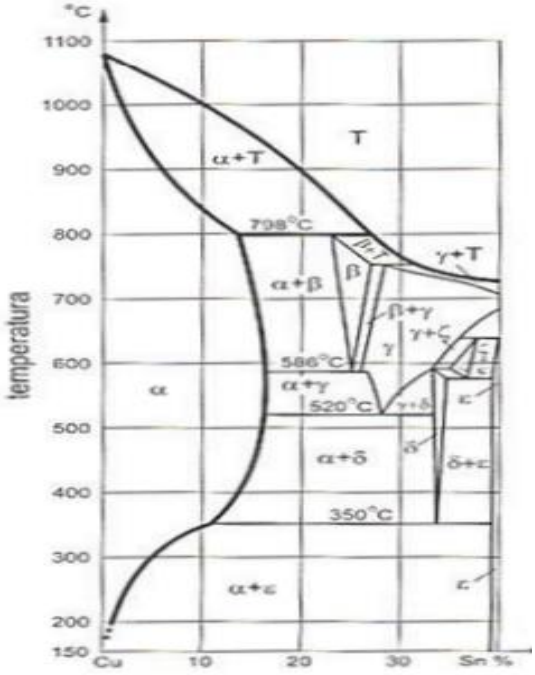
Svojstva kositrene bronce posljedica su njezine mikrostrukture koja se može objasniti ravnotežnim dijagramom stanja (slika 2.2a). Velik je razmak između likvidus i solidus linije, zbog čega je i velika razlika u kemijskom sastavu između taljevine i skrućenog dijela legure na bilo kojoj temperaturi. Brzina difuzije bakra i kositra jednog u drugom mnogo je sporija od međudifuzije bakra i cinka.

Radi svega toga dolazi do jakih mikrosegregacija tijekom skrućivanja. Osim toga, mikrostrukturne promjene ispod približno 400 ºC teku kod Cu-Sn legura vrlo sporo. Temeljem ovih činjenica lijevane će bronce, hlađene do sobne temperature u normalnim industrijskim uvjetima, postići mikrostrukturno stanje koje ne odgovara ravnotežnom dijagramu. Zato se za praktične svrhe može zanemariti dio dijagrama ispod 400 ºC, tj. mikrostruktura metala nastala hlađenjem do 400 ºC ostat će nepromijenjena i na sobnoj temperaturi (slika 2.2b i c).

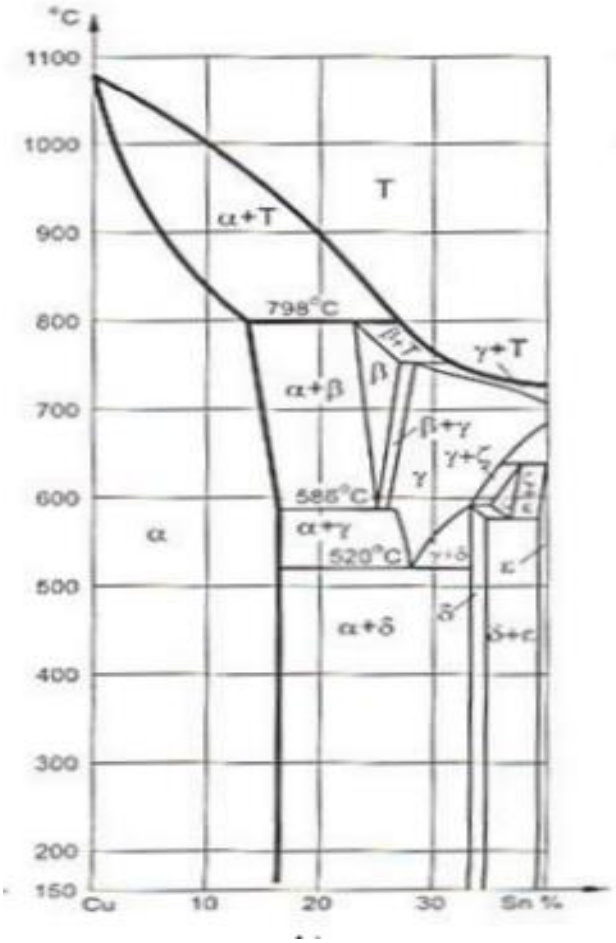
Kao i kod mjedi α- faza je čvrsta otopina (kristal mješanac), žilava i duktilna, tako da se bronca s α- mikrostrukturom može uspješno hladno oblikovati deformiranjem. δ- faza, intermetalni spoj sastava $Cu_{31}Sn_8$, prisutna u leguri s više od 8% Sn je tvrda i krhka, a njena prisutnost čini (α+δ)- bronce prilično krhkim. δ- faza ne smije biti prisutna u legurama koje su namijenjene za hladno oblikovanje. Zbog jake mikrosegregeacije lijevane legure i s manje od 6% kositra mogu sadržavati djeliće δ- faze po granicama α- faze.

Središnji dio zrna α- faze je bogatiji na bakru od nominalno 94% Cu, tako da će vanjski dijelovi zrna odgovarajuće biti bogatiji na kositru do udjela da može nastati δ- faza. Da bi se tu leguru učinilo prikladnom za hladnu preradu deformiranjem, δ- fazu može se odstraniti produljenim žarenjem na 700 ºC što ubrzava difuziju i time se postiže ravnoteža u skladu s dijagramom stanja, tj. preostaje jednolična α- faza. Nakon toga hlađenje na zraku ili čak u peći uobičajenim industrijskim brzinama je prebrzo da se omogući precipitacija ma koje od faza kada se dostigne granica topljivosti kositra u bakru (solvus). Prethodnom toplinskom obradom provedenom na ovaj način mogu se hladno oblikovati i bronce sa do 14% Sn (slika 2.2b), iako se u industrijskoj praksi hladno oblikuju samo legure sa do 7% Sn, dok se legure sa do oko 15% Sn lijevaju.

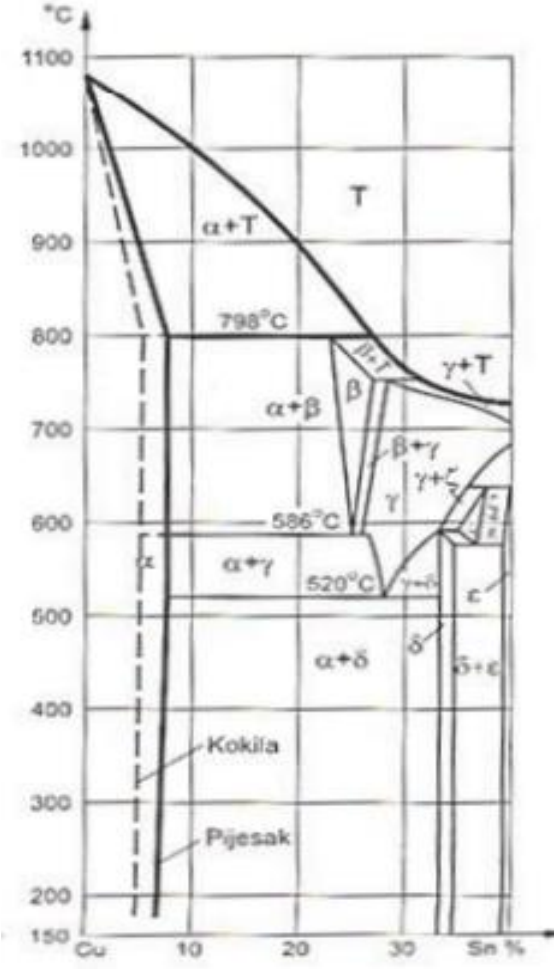
Lijevane kositrene bronce prvenstveno se koriste za izradu kliznih ležaja budući da im mikrostruktura potpuno ispunjava uvjete za tu namjenu, tvrde čestice δ- faze otporne na trošenje uložene su u matricu koju čini α- faza otporna na udarce. Većina bronci na osnovi kositra sadrži male količine fosfora (do 0,05%) preostalog od kemijske redukcije koja je provedena prije lijevanja radi uklanjanja kisika. Često ih se pogrešno naziva fosfornim broncama. Prave fosforne bronce su one kojima je fosfor namjerno dodan u masenom udjelu od 0,1% do 1%. Gnječenjem oblikovljive fosforne bronce sadrže do 8% Sn i do 0,3% P i poput kositrenih bronci su u obliku šipki, žice itd. Osim što povećava čvrstoću fosfor, poboljšava i otpornost na koroziju i smanjuje faktor trenja. Lijevane fosforne bronce imaju do 13% Sn i do 1% P i koriste se uglavnom za ležaje i druge komponente gdje se zahtijeva nizak faktor trenja uz visoku čvrstoću i žilavost. Fosfor je u tim legurama povezan s bakrom u bakrov fosfid, Cu_3P, tvrdi spoj koji tvori trojni eutektoid s α- i δ- fazom [1].



Slika 2.2 Dijagramski prikaz ravnotežnog stanja Cu – Sn [1].



Slika 2.3 Dijagramski prikaz žarenog stanja Cu – Sn [1].



Slika 2.4 Dijagramski prikaz lijevanog stanja Cu – Sn [1].

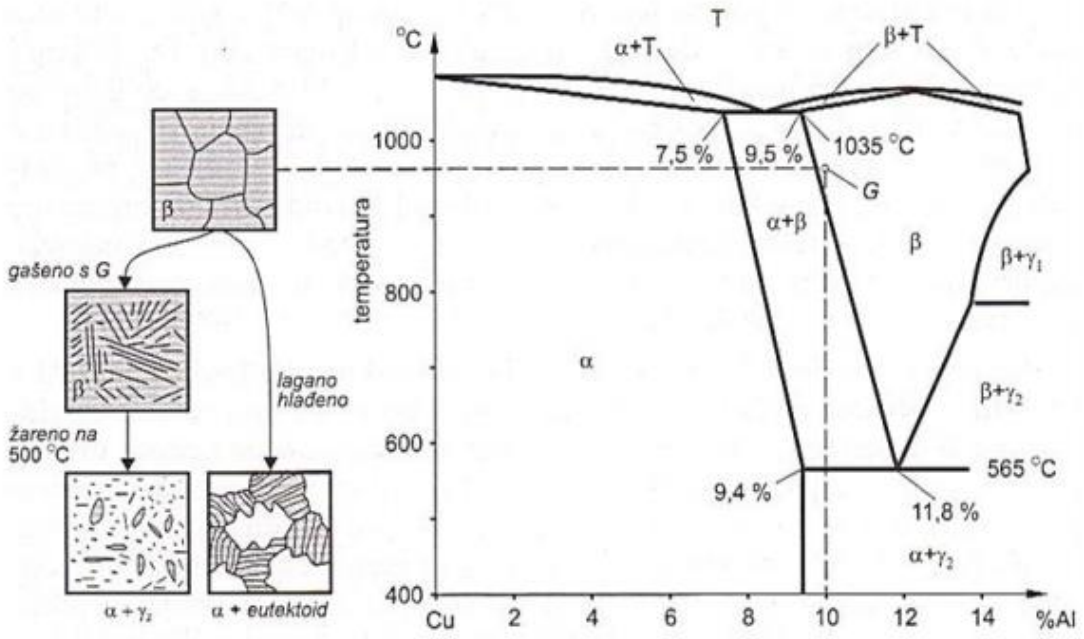
2.1.8. Crveni lijev

Crveni lijev pripada grupi bronci u kojima je skupi kositar djelomično zamijenjen jeftinijim cinkom pri čemu se mikrostruktura legure ne razlikuje od mikrostrukture čiste kositrene bronce (2% Zn ima jednako djelovanje kao i 1% Sn). Cink djeluje reducirajuće kao i fosfor, tj. tvori cinkov oksid (ZnO) koji ispliva na površinu taljevine. Kod lijevanih legura pospješuje žitkost taljevine čime doprinosi livljivosti. Osim cinka dodaje se 4 do 6% olova. Olovo povećava homogenost legure popunjavanjem mikropora između dendrita. Crveni lijev sve više zamjenjuje lijevanu broncu. Odljevci od crvenog lijeva koriste se pretežno za izradu dijelova strojeva i aparata kad se traži otpornost na koroziju, za ležaje i dijelove otporne na djelovanje morske vode. Višekomponentne kositrene bronce s manjim dodatkom legirnih elemenata mogu se i gnječiti kao npr. $CuSn_4Zn_4Pb_4$, a primjenjuju se za izradu valjanih košuljica kliznih ležaja [1].

2.1.9. Aluminijeva bronca

Slično mjedima aluminijeve bronce mogu se podijeliti u dvije glavne grupe: (hladno i toplo) oblikovljive i livljive legure. Također se i ovdje, kao i kod kositrene bronce, zbog spore difuzije mogu zanemariti mikrostrukturne promjene uz industrijske uvjete hlađenja ispod 400º C. Slika 2.3 prikazuje dijagram stanja Cu-Al pokazuje da do 9,4% Al na sobnoj temperaturi postoji α čvrsta otopina dobre oblikovljivosti. Za više od 9,4% Al javlja se γ_2 faza, intermetalni spoj sastava Cu_9Al_4. Jednako kao i druge faze tog tipa, ona je tvrda i krhka, zbog čega je i legura u kojoj je prisutna prilično krhka. Dijagram stanja Cu-Al pokazuje i sličnost s Fe-C dijagramom. U oba dijagrama prisutne su α-faze. β - faza iz Cu- Al dijagrama odgovara po položaju γ- fazi, odnosno austenitu u Fe- C dijagramu, a prisutan je i ($\alpha+\gamma_2$)-eutektoid slično (α^{id}+ Fe_3C^{id}) – eutektoidu kod Fe- C legura. Kao rezultat ovih sličnosti u položaju faznih polja u odgovarajućim dijagramima može se aluminijeva bronca s oko 10% Al toplinski obraditi, tako da dođe do martenzitne transformacije. Ipak treba razlikovati kristalografiju bronci od kristalografije čelika. Ako se broncu s 10% Al lagano hladi, nastala mikrostruktura se sastoji od α- i γ_2 – faze na sobnoj temperaturi. Ponovnim zagrijavanjem ($\alpha+\gamma_2$)- eutektoid se prekristalizira u čvrstu otopinu β iznad eutekoidne temperature (565 ºC). Daljnjim zagrijavanjem do oko 900º C α-faza se u potpunosti otopi u β - fazi, te se tako postiže monofazna čvrsta otopina β. Gašenjem ove legure u vodi s temperature 900 ºC nastaje mikrostruktura koje se sastoji od β’ faze.

U dijagramu je nema jer to nije ravnotežna faza kao i martenzit kod čelika. β' faza je tvrda i krhka poput martenzita kojem sliči i mikrostrukturnim izgledom. Popuštanjem na oko 500 ºC dolazi do precipitacije finih nakupina α- i γ_2 – faze, slično popuštenom martenzitu čelika toplinski obrađenom na sličan način. Hlađenjem na zraku aluminijeve bronce s 10% Al iz β-faznog područja nastaje mikrostruktura ili poput β' (martenzit) ili bainitnog tipa s fino precipitranim γ_2. Mikrostruktura ($\alpha+\gamma_2$) nastaje samo žarenjem nakon kojeg slijedi hlađenja u peći do okolne temperature. Ozbiljna zapreka široj uporabi aluminijeve bronce su poteškoće koje se javljaju kod lijevanja. Zbog lake oksidacije aluminija na visokim temperaturama lijevanja (iznad 1100 ºC) stvara se oksidna kožica i troska na tekućem metalu koje dospijevaju u kalup tijekom lijevanja. Zbog toga se primjenjuju posebni neturbulentni postupci lijevanja, što poskupljuje proizvod [1].



Slika 2.5 Dijagramski prikaz stanja Cu – Al s prikazom mikrostrukturnih promjena legure s 10% Al [1].

2.1.10. Hladno gnječene α – legure

Imaju 4% do 8% Al i obično do 4% Ni, koji jača korozijsku postojanost još i više. Zbog toga su legure ovog sastava pogodne za proizvodnju kondenzatorskih cijevi i izmjenjivača topline kada se traži visoka čvrstoća i korozijska postojanost do temperatura od oko 300 ºC. Sastav ovih α- faznih legura može se prilagoditi tako da se dobije boja slična onoj 18- karatnog zlata. Tanko valjani limovi od ove legure rabe se u proizvodnji dekorativnih predmeta iako ih danas sve više istiskuju proizvodi od anodiziranog aluminija [1].

2.1.11. Toplo gnječene i lijevane legure

Sadrže 8% do 12% Al, a mikrostruktura im je $\alpha+\gamma_2$. Uz to se obično dodaju i drugi elementi kao što su nikal, željezo i mangan. Toplo oblikovljive su legure sa 8% do 10% Al, a oblikuju se kovanjem ili valjanjem, ovisno o njihovoj daljnjoj primjeni. Uz aluminij dodaju se nikal i željezo, svako do 5%, pri čemu željezo djeluje na usitnjenje zrna. Legure se koriste za potrebe u kemijskoj industriji (komponente izložene visokim temperaturama) te za druge potrebe, posebno otkovke otporne na koroziju. Legure za lijevanje u pijesak ili kokilu imaju između 9,5% i 12% Al s različitim udjelom nikla i željeza, do 5% svakog, i mangana do 1,5%. Te legure primjenjuju se u pomorskoj tehnici, npr. za osovine pumpi, dijelove ventila, brodske vijke (propelere), osovine za vijke itd.
Koriste se također za sjedišta ventila, za nosače četkica u generatorima, za ležaje pri radu u teškim uvjetima, za zupčanike, za izradu neiskrećeg alata (čekići, dlijetla, kliješta) u potencijalno „opasnim“ industrijama plina, boja, benzina i eksploziva. Neiskreći alati su mekši, a odatle i podređeni alatima od berilijeve bronce za istu namjenu [1].

2.1.12. Olovna i olovno – kositrena bronca

Legure bakra s olovom (i kositrom) nazivaju se olovne bronce (olovno-kositrene bronce). Obično se broncama kao i mjedima dodaje do 3% Pb za poboljšanje rezljivosti. Veće količine (do oko 25% Pb) dodaju se za neke specijalne namjene kao što su klizni ležaji. Takve bronce podnose 20% veća opterećenja od „bijelih kovina“ na bazi olova ili kositra. Toplinska vodljivost im je također veća, tako da ih se može koristiti pri većim brzinama jer brzo odvode toplinu. Uz normalno podmazivanje imaju izvanrednu otpornost na trošenje, ali, jednako važno, i otpornost na zaribavanje je velika budući da olovo djeluje privremeno kao sredstvo za podmazivanje, ako izostane normalno podmazivanje [1].

2.1.13. Berilijeva bronca

Ova legura bakra sa berilijem je zbog svoje važnosti opisana među bakrovim legurama dok se njoj slične legure s malim postotkom legirnih elemenata (do 5%) uvrštavaju u skupinu niskolegiranog bakra budući da im je glavna karakteristika električna vodljivost. Berilijeva bronca ima oko 1,5% do 2% Be, a može sadržavati i manji dodatak kobalta ili nikla.

Dodatak kobalta ili nikla mijenja se obrnuto u odnosu na dodatak berilija. Primjenjuje se u hladno gnječenje i toplinski očvrsnutom stanju. Toplinska obrada je vrlo složena i zahtijeva preciznu kontrolu. U tom posljednjem stanju postiže najvišu čvrstoću među bakrovim legurama (do oko 1350 MPa). Otpornost na trošenje, dobra električna vodljivost, kemijska postojanost i nemagnetičnost omogućavaju primjenu za izradu opruga kod preciznih aparata, alata za lijevanje polimernih materijala i posebno za izradu neiskrećeg alata u čemu nadilazi svojstva aluminijeve bronce [1].

2.1.14. Manganova i silicijeva bronca

Manganska bronca otporna je na koroziju u morskoj vodi i ima veliku sposobnost prigušenja vibracija. Namijenjena je za lijevanje, ali se može i toplo i hladno oblikovati. Nedostatak joj je loša rezljivost (zbog žilavosti) i visoka cijena.

Silicijeva bronca je rijetko dvokomponentna legura. Uz silicij sadrži mangan, nikal, željezo ili cink, što ovisi o podrijetlu legure. Svojstva su joj: izvanredna podobnost za hladnu i toplu preradu, dobra korozijska postojanost, osrednja čvrstoća i velika žilavost [1].

2.1.15. Legure bakra s niklom

Bakar i nikal su susjedi u periodnom sustavu elemenata, imaju istu kristalnu strukturu, približno jednako velike atome i male razlike u gustoći. Zbog svega toga međusobno su topljivi u svim omjerima stvarajući niz čvrstih otopina. U lijevanom stanju mogu se javiti područja s vrlo jakim mikrosegregacijama, ali ipak to ne dovodi do precipitacije krhke sekundarne faze kao kod drugih bakrovih legura. Žarenjem legure postiže se stanje jednolične čvrste otopine. Odsutnost bilo koje sekundarne faze u mikrostrukturi omogućuje svim legurama ove vrste vrlo dobru oblikovljivost i veliku korozijsku postojanost. Istovremeno se povećava i čvrstoća, tako da se čvrstoća na povišenim temperaturama može usporediti sa čvrstoćom nehrđajućih čelika. Legure su prilagodljive u odnosu na tehniku obrade i može ih se oblikovati toplo ili hladno: valjanjem, kovanjem, prešanjem, utiskivanjem, vučenjem, natiskivanjem itd. Dodatkom 1,5% Fe i 2% Mn može se korozijska postojanost i povećati. Zaštita od korozije postiže se stvaranjem pasivnog sloja u prisutnosti kisika. Posebno su korozijski postojane u boćatnim vodana i morskoj vodi pa se koriste za izradu dijelova kondenzatora na brodovima i postrojenjima za demineralizaciju morske vode. Posebna namjena legure $CuNi_{25}$ je za izradu kovanog novca što koriste mnoge zemlje [1].

2.2. Svojstva bakra

Osnovna svojstva bakra su:

- električna vodljivost čistog bakra bolja je od svih metala izuzev srebra na volumnoj osnovi i aluminija na masenoj osnovi,
- velika toplinska vodljivost,
- svojstva čistog bakra kao: čvrstoća, otpornost na oksidaciju, otpornost na puzanje, otpornost na umor, otpornost na koroziju ili livljivost mogu se poboljšati legiranjem, ali se pri tome snizuju električna i toplinska vodljivost,
- većina legura ima izvrsnu duktilnost u žarenom stanju i posebno su pogodne za proizvodnju cijevi, duboko vučenje, kovanje, oblikovanje u toplom stanju itd.,
- dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskoj sredini stvaranjem „patine“. [1].

U tablici 2.1 navedene su vrijednosti za fizikalna i mehanička svojstva bakra.

Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra [1].

gustoća	kg/m^3	8930
talište	ºC	1083
modul elastičnosti	MPa	125000
toplinska rastezljivost	$10^{-6}/K$	17
električna vodljivost	$m/\Omega mm^2$	35…58
toplinska vodljivost	W/mK	240…386
vlačna čvrstoća	MPa	200…360
istezljivost	%	2…45

U nedostatke se može ubrojiti: visoka cijena, visoko talište, ne smije se koristiti u dodiru s hranom ili za preradu namirnica jer se prekrije otrovnom zelenom prevlakom (bakrov acetat). Najvažnije tehničko svojstvo bakra je njegova električna vodljivost. Čisti bakar ima poslije srebra najbolju električnu vodljivost koja je u velikoj mjeri ovisna o čistoći. Posebno nepovoljno utječu primjese topljive u bakru. Nepovoljan utjecaj drugih elemenata mijenja se od malog utjecaja kadmija do vrlo značajnog utjecaja fosfora. Tako se kadmij, u količini do 1%, dodaje telefonskim žicama radi povećanja čvrstoće.

Hladno vučena žica ovog sastava doseže čvrstoću od 460 MPa , za razliku od hladno vučenog bakra s čvrstoćom od 340 MPa , dok je električna vodljivost još uvijek preko 90% od one meko žarenog bakra.

Fosfor kao najdjelotvorniji dezoksidans već u vrlo malim količinama vrlo jako snižava električnu vodljivost. S druge strane elementi koji se ne tope u bakru u čvrstom stanju, gotovo da i ne utječu na električnu vodljivost. Njima pripada kisik koji može zaostati u bakru od postupka dobivanja, kao i olovo i telur koji se dodaju najvodljivijim kvalitetama za poboljšanje rezljivosti. Materijali za električne vodiče moraju imati najmanju vodljivost od 57% $m/\Omega mm^2$.

Prema DIN-u 1708 ove vrste imaju dodatak E u svojoj oznaci. Dobra toplinska vodljivost bakra, kao i električna vodljivost, temelje se na pokretljivosti slobodnih elektrona metalnih stanja. To svojstvo je važno kod izmjenjivača topline, ali u pravilu nije potreban bakar najviše čistoće. Naime, budući da se u obzir mora uzeti prijelaz topline i preko graničnih površina, to značajnu ulogu ovdje imaju naslage oksida i slojevi drugog porijekla zbog čega se u potpunosti ne može iskoristiti toplinska vodljivost bakra. Čvrstoća nelegiranog bakra ovisna je u velikoj mjeri o otopljenim primjesama. Najčišći bakar ima nisku čvrstoću. Zato veće povišenje temperature naglo smanjuje čvrstoću. Zbog toga je za velike električne strojeve bilo potrebno razviti posebne vrste s poboljšanom statičkom izdržljivosti. Kod promjenjivih opterećenja preporučuju se vrste bez kisika budući da su u mikrostrukturi bakra koji sadrži kisik prisutni uključci bakrovog (I)-oksida, a oni djeluju kao unutarnji urezi. Čvrstoća bakra može se povisiti dodavanjem malih količina pravilno odabranih legirnih elemenata, a da se pritom još uvijek održi zadovoljavajuća električna vodljivost. Jedni se elementi otapaju u kristalu mješancu bakra (srebro i arsen), a drugi omogućuju precipitacijsko očvrsnuće (krom, cirkonij, kadmij, željezo, fosfor). Kako otopljeni elementi u kristalu mješancu znatno smanjuju električnu vodljivost bakra, to se precipitacijskim očvršćivanjem mogu postići optimalne kombinacije vrijednosti čvrstoće i električne vodljivosti. Takav bakar koristi se u elektrotehnici i strojarstvu. Od ovih legura za strojarstvo je najvažniji bakar legiran berilijem. Izdvojen je iz ove grupe bakrovih materijala zbog svojih, prvenstveno mehaničkih i triboloških, svojstava koja se postižu toplinskim očvršćivanjem i opisan je među bakrovim legurama bez cinka (berilijeva bronca). Osim električne vodljivosti i čvrstoće niskolegiranih bakar pokazuje i dobru otpornost na popuštanje [1].

2.3. Primjena bakra

Bakar je kemijski postojan u neutralnim i lužnatim vodenim otopinama dok ga nagrizaju kiseline, naročito oksidirajuće. Zato se može upotrijebiti za izradu vodovodnih cijevi i posuda za vrenje u pivarstvu. Nije prikladan za preradu i smještaj voćnih sokova i vina, kao i prehrambenih namirnica koje sadrže kiseline (može nastati otrovni bakrov acetat).

Lijevane mjedi ovisno o kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima mogu se primjenjivati za konstrukcije, kućišta i armature za plin i vodu, za statički opterećene ležajeve s malom brzinom vrtnje, vijence pužnih kola s malom brzinom vrtnje. Gnječene legure bakra s niklom i cinkom primjenjuju se za obradu odvajanjem čestica, opruge, stolni pribor, ukrasne predmete u graditeljstvu itd.

Gnječene legure bakra s kositrom primjenjuju se za spiralne cijevi, tlakomjere, dijelove u kemijskoj industriji, klizne ležajeve i drugo.

Gnječene legure bakra s aluminijem koriste se u kemijskoj industriji, za izradu dna kondenzatora, osovine, vijke, blazinice ležaja i slično, dok se lijevane legure bakra s aluminijem koriste u strojogradnji, elektroindustriji, automobilskoj i tekstilnoj industriji za izradu raznih konusnih zupčanika, mazalica, dijelova aparata u petrokemiji, brodske propelere, kućišta crpki, pužne vijke, pužna kola i drugo.

Lijevane legure bakra s olovom i kositrom otporne su na koroziju i sumpornu i solnu kiselinu. Najčešće se koriste za izradu ležaja vozila, valjačkih strojeva, mlinova, crpki itd.

Gnječene legure bakra s berilijem, kobaltom i niklom koriste se za sve vrste opruga, embrane, neiskreće alate, kalupe za lijevanje polimernih materijala i slično.

Gnječene legure bakra s niklom primjenjuju se za izradu podnica i ploča za kondenzatore i izmjenjivače topline kao i za pregrijače pare, klima uređaje, vodove za kočnice, rebraste cijevi i drugo [1].

2.4. Proizvodi koji se izrađuju od bakra

Neki od proizvoda koji se izrađuju od bakra su specijalni bakreni i supravodljivi kabeli i žice koji se najčešće upotrebljavaju u eletrotehničke svrhe.

Ostali proizvodi su razne profilne cijevi, adapteri, drške i držači elektroda kao i kapice za točkasto zavarivanje koje se koriste na robotskim strojevima za zavarivanje, prvenstveno u automobilskoj industriji. [4]

Neki od proizvoda prikazani su na slici 2.6.



Slika 2.6 Proizvodi koji se izrađuju od bakra [4].

3. Glodanje kao postupak obrade odvajanjem čestica

Glodanje definiramo kao postupak obrade s odvajanjem čestica kojim se obrađuju različite vrste površina. Izvodi se pretežno na određenim alatnim strojevima, uglavnom na glodalicama te obradnim centrima (slika 3.1), glavno gibanje je kružno kontinuirano te je pridruženo alatu. Posmično je gibanje kontinuirano te je najčešće pridruženo obratku. Kod glavnog gibanja os okretanja zadržava položaj ka alatu bez obzira na utjecaj smjera posmičnog gibanja odnosno njegove brzine. Alat za postupak glodanja je glodalo određene geometrije reznog dijela, s više reznih oštrica na zubima tog glodala. Rezne oštrice ulaze u zahvat s predmetom te izlazi, sa osnovnim obilježjima dinamičkog opterećenja, iz njega. U zahvatu s predmetom je istovremeno nekoliko oštrica [2].



Slika 3.1 Primjer portalne glodalice [5].

3.1. Podjela postupaka glodanja

Glodanje možemo podijeliti na osnovi određenih kriterija podjele [2]:

a) Prema kvaliteti obrađene površine:
   - završno
   - grubo
   - fino.

b) Prema kinematici glodanja:
   - protusmjerno
   - istosmjerno.

c) Prema obliku obrađivane površine:
   - okretno (okruglo ili ne okruglo)
   - profilno (glodanje utora, modulno glodanje)
   - ravno
   - oblikovno (CNC ili kopirno)
   - odvalno.

d) Prema položaju oštrica glodala:
   - obodno
   - čeono. [2]

3.2. Parametri obrade

Parametri obrade kod glodanja su brzina rezanja, dubina rezanja te posmak. Određuju se u odnosu na alat i materijal obratka, postojanost oštrice, kvalitetu površine koja je obrađena, okretaje stroja (broj i snaga okretaja). Kod fine obrade koriste se veće brzine, a manje dubine rezanja i posmaci, dok je kod grube obrade obrnuta situacija. [2]

Brzina rezanja v_c označava put koji glavna oštrica prijeđe u odnosu na obrađivanu površini u određenoj jedinici vremena. Kod glodanja brzina rezanja jednaka je obodnoj brzini glodala te se izračunava po jednadžbi (1):

$$v_c = \frac{D_g \times \pi \times n_g}{1000}, [m/min] \qquad (1)$$

Gdje je:

v_c – brzina rezanja [m/min]

D_g – promjer glodala [mm]

n_g – frekvencija vrtnje glodala [min^{-1}]

Posmak f označava veličinu puta, u smjeru posmičnog gibanja, alata odnosno glavne oštrice.[2]

Postoje posmaci:

- po (jednom) okretaju glodala f [mm/okr]
- po zubu glodala f_z [mm/zub]
- posmična brzina v_f [mm/min].

Dužina koja treba glodalu da se pomakne za vrijeme određenog okretaja naziva se vrijednost posmaka *f*. Hrapavost površine, sile na zubima te presjek odvojenih čestica povećavaju se porastom posmaka.

Posmaci su povezani međusobno određenim relacijama prikazanim u jednadžbama (2 i 3):

$$f = z_g \cdot f_z \text{ , [mm/okr]} \qquad (2)$$

$$v_f = n_g \cdot f = n_g \cdot z_g \cdot f_z \text{ , [mm/min]} \qquad (3)$$

Gdje je:

f – posmak [mm]

z_g – broj zubi glodala

f_z – posmak po zubu glodala [mm]

v_f – ukupna posmična brzina [mm/min]

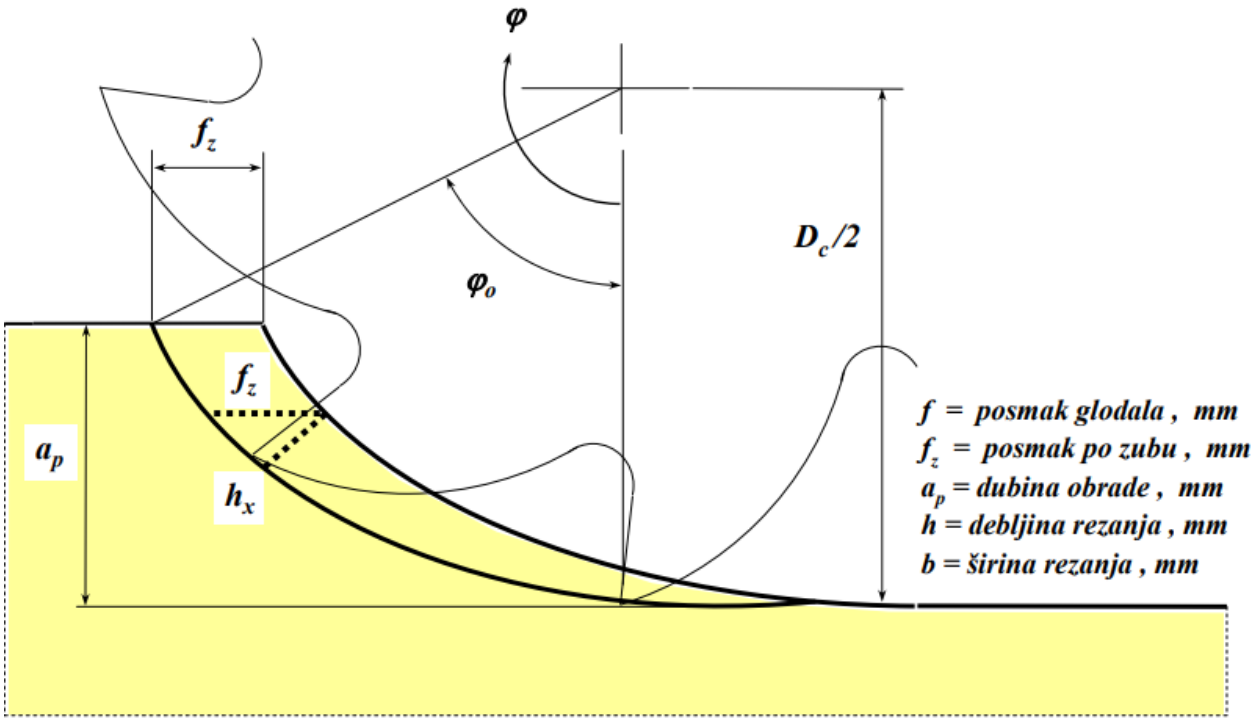
n_g – frekvencija vrtnje glodala [min^{-1}]

Dubina rezanja a_p definiramo kao veličinu sloja odvojenog od materijala, određenog razmaka između površina. Osnovna zadaća je odvojiti što je moguće veću količinu čestica, ali uz prihvatljivu točnost i kvalitetu površine koja se obrađuje, što se uglavnom ostvaruje pomoću višestrukih prolaza te se samim time za završnu obradu izabire konačni rez sa malom dubinom.[2]

Treba spomenuti i ostale bitne veličine obrade :

- debljina rezanja – udaljenost između uzastopnog položaja određenih površina putem jednog okretaja ili jednog prolaza alata ili obradka. Oznaka je *h*.
- širina rezanja – udaljenost između površine koja se obrađuje i površine koja je obrađena. Oznaka je *b*. [2]

Slika 3.2 prikazuje parametre obrade glodanjem.



Slika 3.2 Parametri zahvata [2]

3.3. Alati za glodanje

Svaki alat u postupku obrade odvajanjem čestica mora ispuniti dvije osnovne zadaće:

• u jedinici vremena odvojiti što veću količinu određenog sloja materijala sa obratka

• uz minimalne troškove te uz određenu kvalitetu površine, osigurati geometriju oblika te potrebne dimenzije.

Alati za glodanje odnosno glodala mogu biti napravljeni od jednog komada, ali također mogu biti sa umetnutom reznom oštricom. Postoje različiti oblici glodala prvenstveno zbog široke upotrebe samog glodala. [2]

Pa ih tako razlikujemo prema:

a) Načinu izrade
   - glodala sa glodanim zubima
   - glodala sa brušenim i tokarenim zubima

- glodala odnosno glave sa umetnutim zubima.

b) Obliku zubi
   - s ravnim zubima
   - sa zubima u križ
   - sa zubima u spirali.

c) Obliku tijela
   - glodalo valjkastog oblika
   - glodalo valjkastog oblika za ozubljenje
   - glodalo valjkastog oblika za navoje
   - profilna glodala
   - modulna glodala
   - vretenasta glodala
   - konusna glodala. [2]

Rezni dio glodala je izrađivan od materijala puno veće tvrdoće u odnosu na obrađivani materijal, a tu se najčešće koriste tvrdi metali, keramika, brzorezni čelici te nitrid bora. Cijelo glodalo se izrađuje od brzoreznih čelika. [2]



Slika 3.3 Glodala izrađena iz jednog komada [2]

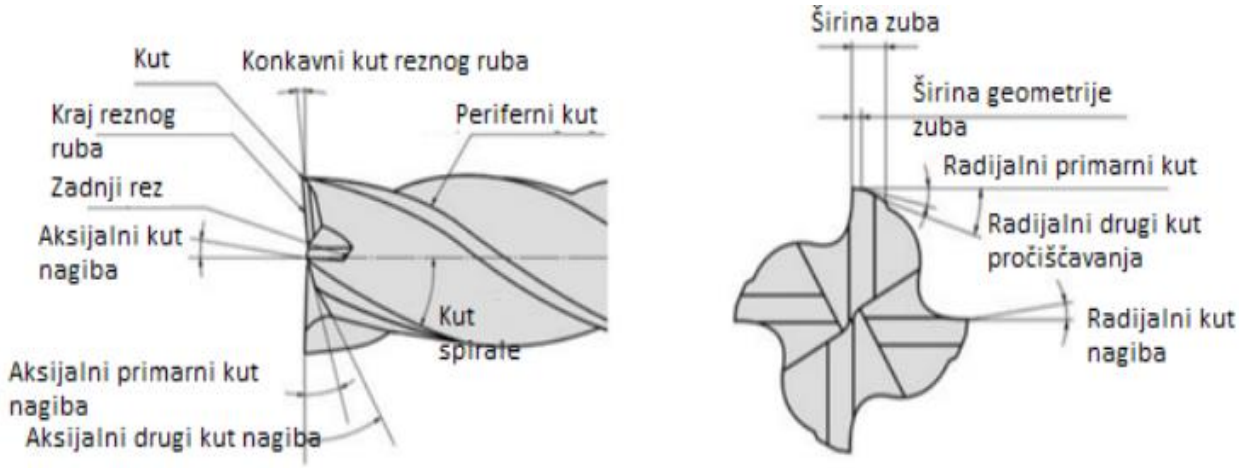


Slika 3.4 Glodala s umetnutim reznim oštricama [2]

Za obradu s odvajanjem čestica, alati većinom imaju geometrijski oblik koji je zajednički kod svih postupaka, što znači da se određeni osnovni materijali kao što su oštrica, kutovi te površina pojavljuje kod svih postupaka obrade. Zub je osnovni oblik alata sa oštricama. Kutovi alata neophodni su za položaj oštrice te stražnje i prednje površine dijela alata. Na reznoj oštrici, odnosno na određenoj točci na njoj, određuju se kutovi. Na slici 3.5 prikazana je geometrija glodala.

Rubovi glodala na krajevima imaju različitu geometriju, što ima utjecaj u procesu rezanja.

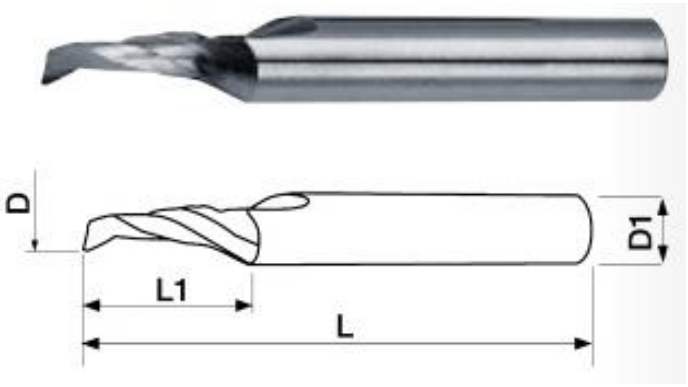
Režimi obrade su parametri koji upravljaju procesom glodanja, odnosno kontroliraju ga. Režimi sadrže nekoliko točaka koje treba detaljnije objasniti za bolje razumijevanje utjecaja na obradu, prilikom čega se teži što boljem omjeru kvalitete obrade, brzine i trajanju alata. Ovisno koji se materijal obrađuje, poželjan je određeni kut na alatu. Kut zuba mora biti veliki i pozitivan kada je riječ o rastezljivim materijalima, te manji ukoliko je riječ o krhkim materijalima. Ako je kut vrha zuba veći, to pridonosi boljem odvajanju strugotine, a ukoliko je kut negativan onda strugotinu vodi prema materijalu, te povećava snage rezanja, a ponekad i trenje. S povećanjem tog negativnog kuta, zub alata dobiva na svojoj čvrstoći, a samim time i snaga oštrice raste. [2]



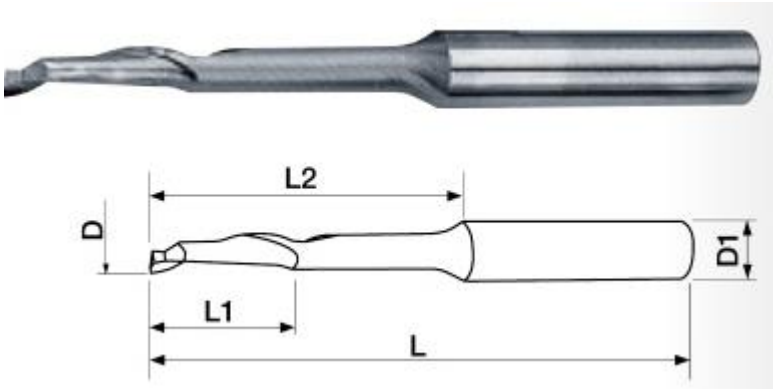
Slika 3.5 Geometrija alata [2]

3.4. Posebni alati za glodanje bakra

1. Glodalo za urezivanje s drškom [6]
   - primjena za područja promjera od 3 do 8 mm
   - jedna rezna oštrica
   - proizvodi se u kratkoj (slika 3.6) i dugačkoj (slika 3.7) izvedbi.



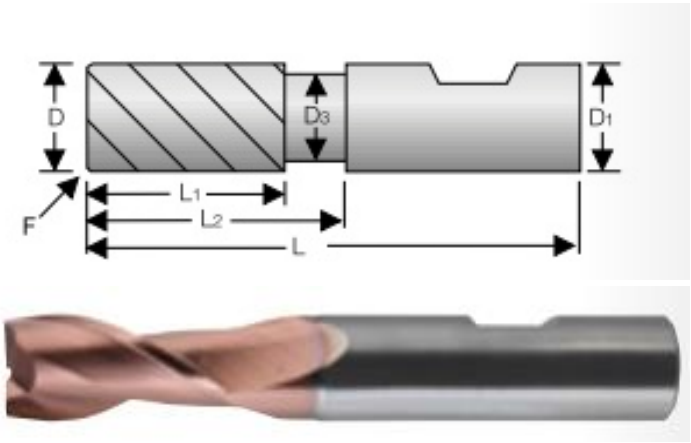
Slika 3.6 Kratka izvedba glodala za urezivanje s drškom[6]



Slika 3.7 Dugačka izvedba glodala za urezivanje s drškom [6]

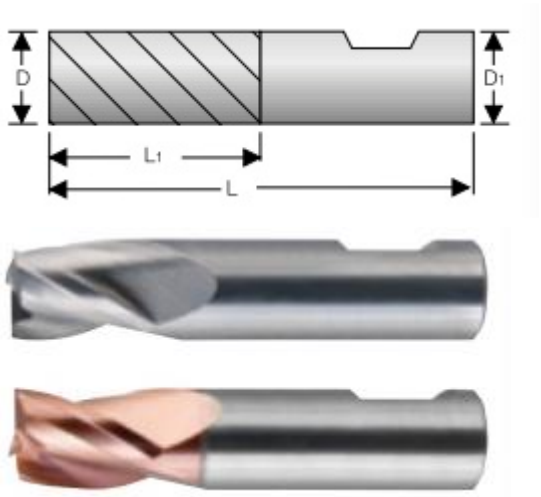
2. Vretenasto glodalo [6]
   - najbolje odvođenje strugotina zahvaljujući izuzetno glatkoj površini
   - rezni materijal VHM najfinije granulacije, TiAlN- Ultra presvlaka
   - primjena za područja promjera od 0,3 do 20 mm
   - dvije rezne oštrice.

   Slika 3.8 prikazuje vretenasto glodalo.



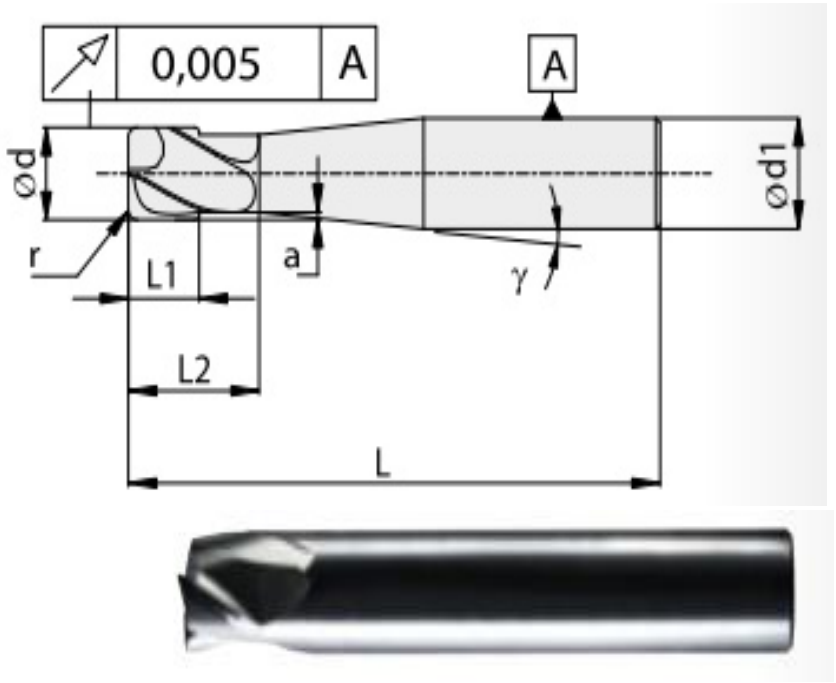
Slika 3.8 Vretenasto glodalo [6]

3. Mini glodalo s drškom (slika 3.9) [6]
   - rezni materijal VHM najfinije granulacije, TiAlN- Ultra presvlaka
   - primjena za područja promjera od 0,5 do 20 mm
   - tri rezne oštrice.



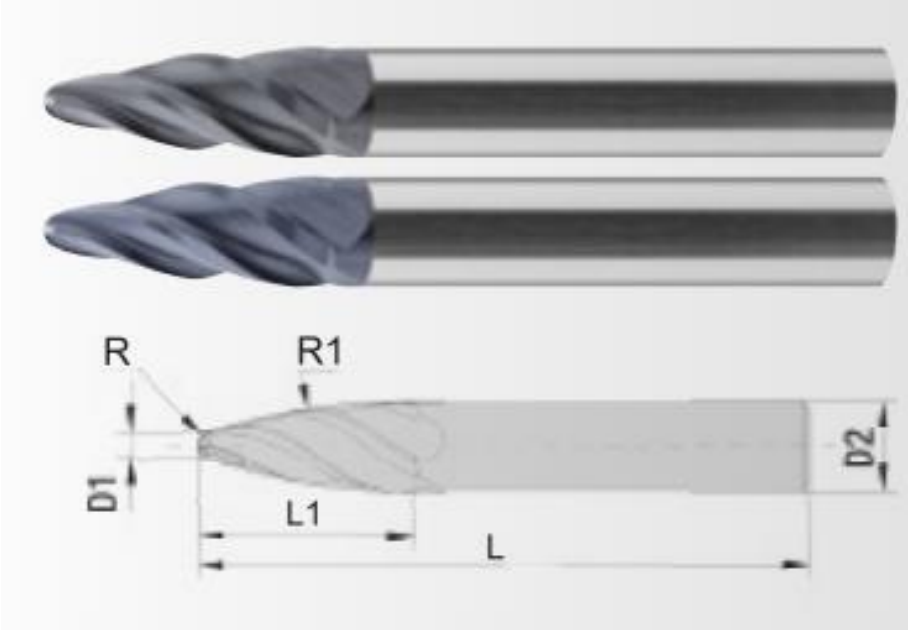
Slika 3.9 Mini glodalo s drškom [6]

4. Trohoidalno glodalo za brtvene površine (slika 3.10) [6]
    - za proizvodnju koncentričnih brtvenih površina za kvalitetne proizvode
    - samo koncentrične linije glodanja
    - nije potrebna naknadna obrada (glatke površine)
    - četiri rezne oštrice.



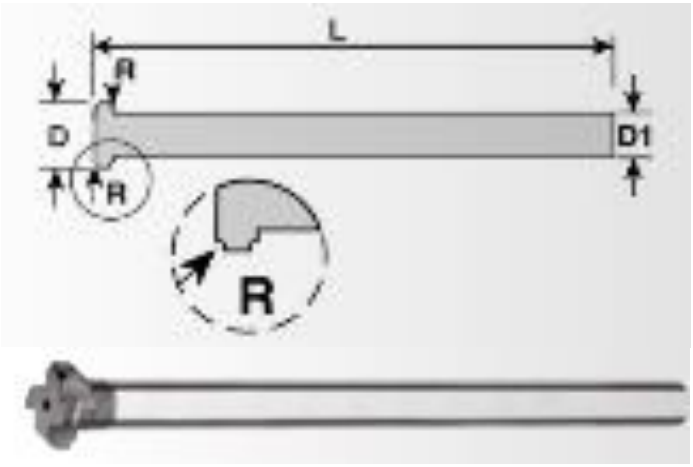
Slika 3.10 Trohoidalno glodalo za brtvene površine [6]

5. Kružno segmentno glodalo (slika 3.11) [6]
    - nove mogućnosti izrade (podrezi, predobrada i fina obrada uskih kontura, mogući varijabilni prilagodljivi kutovi, obrada uskih unutarnjih polumjera, površina slobodnog oblika)
    - poboljšanje površine i produljena dugovječnost alata.



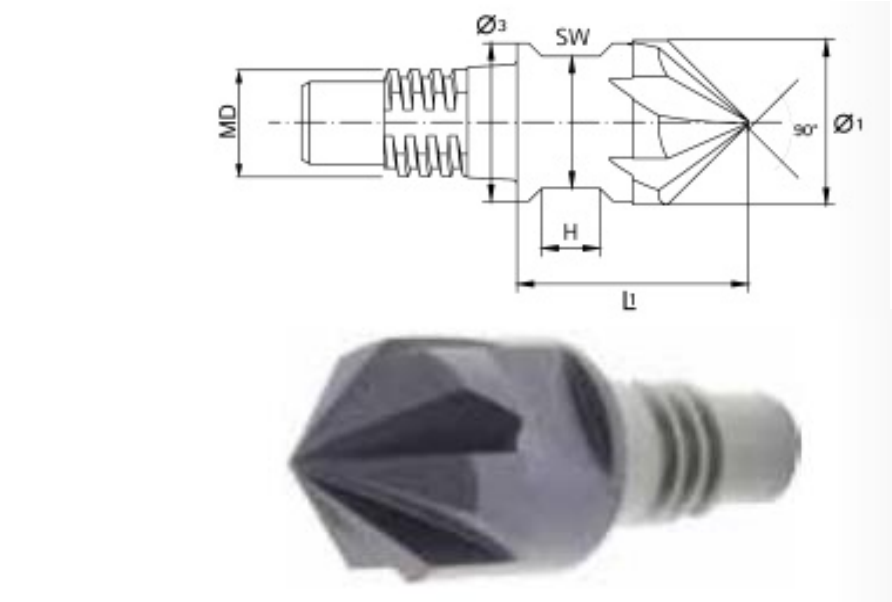
Slika 3.11 Kružno segmentno glodalo [6]

6. Četvrtkružno konkavno glodalo s pomakom naprijed i natrag (slika 3.12) [6]
   - za linearno i cirkularno radijalno glodanje s pomakom naprijed i natrag.



Slika 3.12 Četvrtkružno konkavno glodalo [6]

7. Glodalo za skidanje srha s izmjenjivom glavom (slika 3.13)[6]

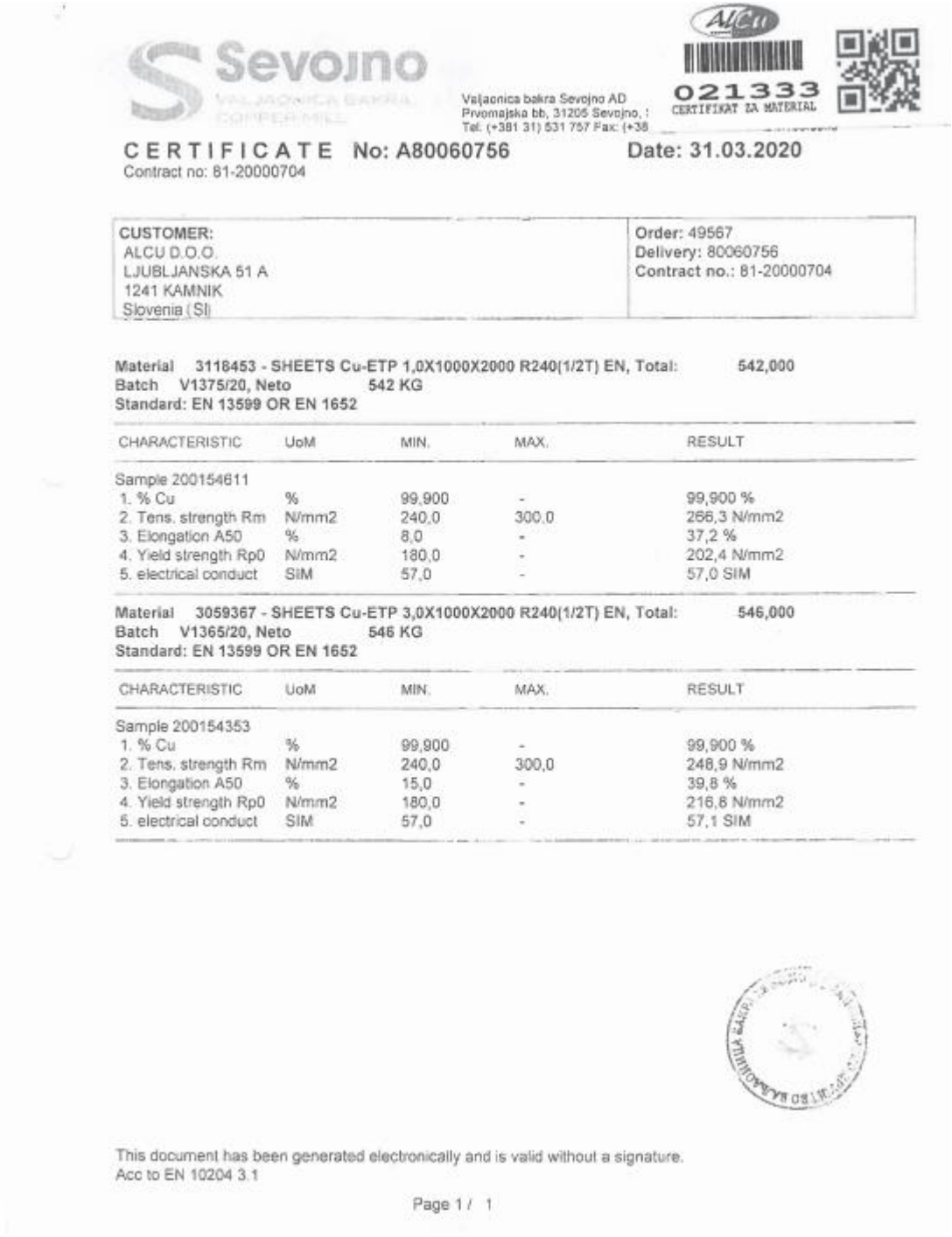


Slika 3.13 Glodalo za skidanje srha [6]

4. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu prikazano je glodanje bakrenih limova debljine 3 mm, glodalom sa 4 oštrice 10×10 HSS M42 na univerzalnoj alatnoj glodalici „Alfa 5“. Nakon glodanja na svakom uzorku mjerena je hrapavost površine. Eksperiment se je provodio u laboratoriju Odjela za strojarstvo Sveučilišta Sjever.

Atest bakra prikazan je na slici 4.1.



Sevojno
VALJAONICA BAKRA
COPPER MILL

Valjaonica bakra Sevojno AD
Prvomajska bb, 31205 Sevojno, :
Tel: (+381 31) 531 757 Fax: (+38

ALCU
021333
CERTIFIKAT ZA MATERIAL

CERTIFICATE No: A80060756 Date: 31.03.2020
Contract no: 81-20000704

CUSTOMER:	Order: 49567
ALCU D.O.O. LJUBLJANSKA 51 A 1241 KAMNIK Slovenia (SI)	Delivery: 80060756 Contract no.: 81-20000704

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

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

Material 3059367 - SHEETS Cu-ETP 3,0X1000X2000 R240(1/2T) EN, Total: 546,000
Batch V1365/20, Neto 546 KG
Standard: EN 13599 OR EN 1652

CHARACTERISTIC	UoM	MIN.	MAX.	RESULT
Sample 200154353				
1. % Cu	%	99,900	-	99,900 %
2. Tens. strength Rm	N/mm2	240,0	300,0	248,9 N/mm2
3. Elongation A50	%	15,0	-	39,8 %
4. Yield strength Rp0	N/mm2	180,0	-	216,8 N/mm2
5. electrical conduct	SIM	57,0	-	57,1 SIM

This document has been generated electronically and is valid without a signature.
Acc to EN 10204 3.1

Page 1 / 1

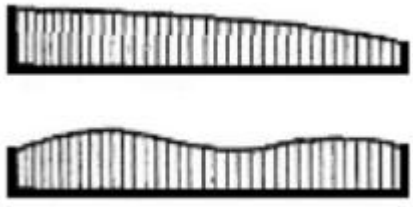
Slika 4.1 Atest bakra

4.1. Površinska hrapavost

Površinska hrapavost se definira kao sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su prouzrokovane postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima, a mnogo puta su manje od dimenzija promatranog djela površine. Pod pojam hrapavosti ne svrstavamo makrogeometrijske nepravilnosti površine kod kojih se dimenzije približavaju duljinskoj mjeri promatrane površine ili je premašuju.[7]

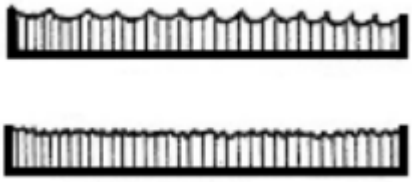
Osnovne vrste deformacija površine mogu se sažeti u slijedeće skupine:

- makroneravnine (slika 4.2)
  - neparelelnost površine
  - valovitost



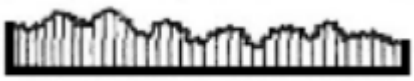
Slika 4.2 Makroneravnine [7]

- mikroneravnine (slika 4.3)
  - izbrazdanost
  - hrapavost



Slika 4.3 Mikroneravnine [7]

- nanoneravnine
- rezultanta deformacije (slika 4.4) [7].



Slika 4.4 Rezultanta deformacije [7]

Tehničke površine nisu idealno glatke geometrijske plohe, nego su to, mikroskopski gledano, hrapave plohe karakterizirane nizom neravnina raznih veličina, oblika i rasporeda.

Bitne veličine koje opisuju hrapavost površine jesu:

- R_a – srednje odstupanje profila hrapavosti
- R_z – maksimalna visina neravnina.

Srednje odstupanje profila hrapavosti R_a je srednja aritmetička udaljenost profila od srednje linije, te je teoretski iskazano formulom (4):

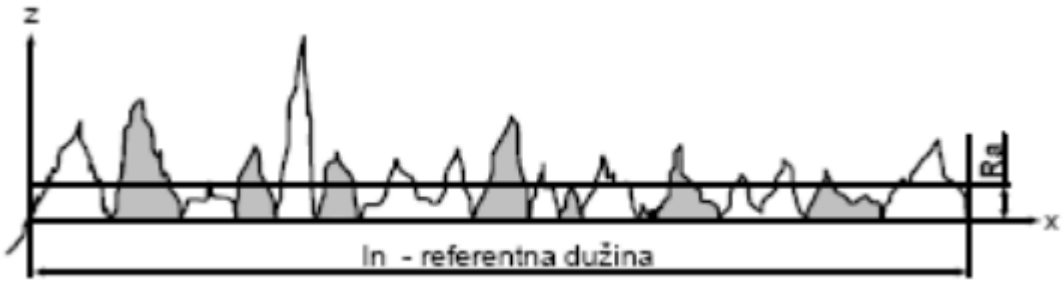
$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y|\, dx \qquad (4)$$

Kod izračunavanja srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a kao prvo je potrebno snimiti najveće visine vrha profila Z_p i najveće dubine dna profila Z_v i potom odrediti i nacrtati srednju liniju hrapavosti profila kao što je pokazano slikom 4.5.



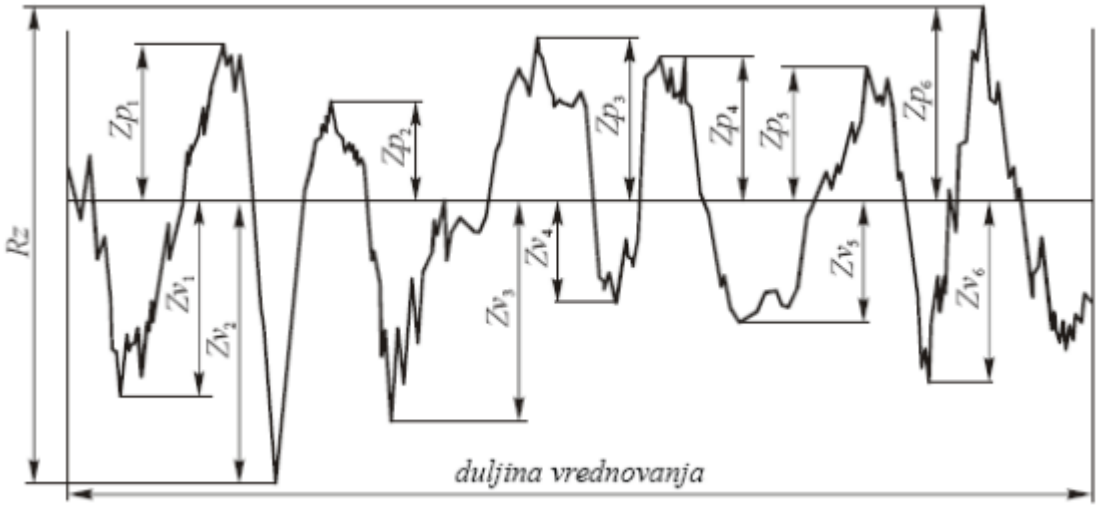
Slika 4.5 Određivanje srednje linije hrapavosti oblika [7]

Potom se određuje srednje aritmetičko odstupanje R_a koje predstavlja ravninu koja najbolje aproksimira površine koje se nalaze iznad i ispod linije R_a, slika 4.6.



Slika 4.6 Određivanje srednjeg prosječnog odstupanja [7]

Maksimalna visina neravnina R_z je zbroj duljine najveće visine vrha profila Z_p i najveće dubine dna profila Z_v na dužini mjerenja. Određivanje maksimalne visine profila R_z prikazano je na slici 4.7 [7].



Slika 4.7 Određivanje maksimalne visine neravnina [7]

4.2. Provođenje pokusa

Postupak glodanja proveden je na četiri uzorka pri konstantnoj brzini vrtnje alata od 720 o/min dok je posmak mijenjan. Protusmjerno glodanje provedeno je uz dubina obrade uzorka od 0,4 mm. U prvom prolazu obrade su poravnate površine dok je u drugom proveden eksperiment prema zadanim parametrima.

U tablici 4.1 prikazani su parametri obrade za sva četiri uzorka.

Tablica 4.1 Parametri obrade

BROJ UZORKA	BRZINA VRTNJE [okr/min]	DUBINA OBRADE [mm]	POSMAK [mm/min]
UZORAK 1	720	0.4	40
UZORAK 2			65
UZORAK 3			100
UZORAK 4			185

Na slici 4.8 prikazani su označeni uzorci, dok slika 4.9 prikazuje glodalo kojim je vršena obrada na univerzalnoj alatnoj glodalici (slika 4.10).



Slika 4.8 Označeni uzorci



Slika 4.9 Pero 10×10 HSS M42



Slika 4.10 Postupak obrade u jednom stanju pokusa

Nakon provedene obrade glodanjem na uzorcima je provedeno mjerenje površinske hrapavosti sa uređajem AMETEK Taylor Hobson Surtronic S-100 Series (slika 4.11)



Slika 4.11 Uređaj AMETEK Taylor Hobson Surtronic S-100 Series

Svaki uzorak obrađivan je različitim posmakom da bi prilikom mjerenja površinske hrapavosti vidjeli razlike u rezultatima, te zaključili što je do njih dovelo. Na svakom uzorku napravljena su po tri mjerenja za isti mjerni opseg. Mjerenje je napravljeno dva puta sa različitim mjernim opsegom.

Rezultati prvog mjerenja sa rasponom mjerenja od 4 mm, gornjom i donjom granicom od 200 µm i sjecištem između komponenti hrapavosti i valovitosti λ_c = 0,25 mm prikazani su tablicom 4.2.

Rezultati drugog mjerenja sa rasponom mjerenja od 5 mm, gornjom i donjom granicom od 200 µm i λ_c = 2,5 mm prikazani su tablicom 4.3

Tablica 4.2 Rezultati prvog mjerenja

MJERENJE		1	2	3	SREEDNJA VRIJEDNOST
UZORAK 1	R_a [µm]	1,50	1,70	1,30	1,50
	R_{Sm} [µm]	65	65	58	62,67
UZORAK 2	R_a [µm]	1,62	1,80	1,72	1,71
	R_{Sm} [µm]	82	103	103	96
UZORAK 3	R_a [µm]	1,30	1,38	1,04	1,24
	R_{Sm} [µm]	72	84	67	74,33
UZORAK 4	R_a [µm]	1,80	1,70	1,70	1,73
	R_{Sm} [µm]	114	88	107	103

Tablica 4.3 Rezultati drugog mjerenja

MJERENJE		1	2	3	SREEDNJA VRIJEDNOST
UZORAK 1	R_a [µm]	1,60	1,60	1,60	1,60
	R_{Sm} [µm]	61	63	61	61,67
UZORAK 2	R_a [µm]	1,70	1,70	1,80	1,73
	R_{Sm} [µm]	94	97	86	92,30
UZORAK 3	R_a [µm]	1,60	1,60	1,70	1,63
	R_{Sm} [µm]	78	82	89	83
UZORAK 4	R_a [µm]	1,80	1,70	1,70	1,73
	R_{Sm} [µm]	114	88	107	103

Iz rezultata mjerenja možemo zaključiti kako uzorak 2 odskače od očekivanih vrijednosti jer uzorak 4 obrađivan s najvećim posmakom bi trebao imati najveću hrapavost (slika 4.12)



Slika 4.12 Obrađeni uzorci

5. Zaključak

U ovom završnom radu bilo je potrebno opisati bakar kao materijal te provesti eksperiment glodanja bakrenih limova radi mjerenja površinske hrapavosti.

Prije samog početka izrade eksperimenta opisane su bakrove legure, svojstva bakra, primjene bakra te neki od proizvoda koji se izrađuju od bakra. U drugom dijelu pisano je o glodanju kao tehnologiji strojne obrade odvajanjem čestica, podjeli postupaka glodanja, parametrima obrade te alatima za glodanje.

Završno poglavlje rada, eksperimentalni dio bavi se obradom bakrenih limova glodanjem različitim posmacima nakon čega se mjeri površinska hrapavost svih limova u više mjerenja radi dobivanja točnijih rezultata. Analizom dobivenih rezultata mjerenja utvrđena je nedosljednost, nisu dobiveni očekivani rezultati. Do tih odstupanja u rezultatima došlo je zbog vibracija između uzorka i glodala.

Zbog sve veće konkurencije na tržištu potrebno je plasirati proizvode što kvalitetnije obrade koja se postiže što manjim troškovima proizvodnje radi veće produktivnosti. Visoka kvaliteta površine nakon obrađivanja je bitna pa se provode razni eksperimenti u svrhu zadržavanja te kvalitete.

6. Literatura

[1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2011.

[2] J. Kovčalija: Karakteristike obrade s odvajanjem čestica – glodanje , Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2018.

[3] E. Stupnišek – Lisac: Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala. Zagreb; Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2007.

[4] URL: https://oprema-strojevi.com/wordpress/

[5] URL: https://www.luvata.com/

[6] Katalog alata Sartorius 2019./2020., Strojotehnika, str. 412 – 600

[7] D. Bolarić: Proizvodne tehnologije pri izradi steznog stola za zavarivanje, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.

Popis slika

Slika 2.1 Dijagramski prikaz stanja Cu-Zn (a) i prikaz utjecaja cinka na mehanička svojstva (b) [1] 4
Slika 2.2 Dijagramski prikaz ravnotežnog stanja Cu-Sn [1] 8
Slika 2.3 Dijagramski prikaz žarenog stanja Cu-Sn [1] 9
Slika 2.4 Dijagramski prikaz lijevanog stanja Cu-Zn [1] 9
Slika 2.5 Dijagramski prikaz stanja Cu-Al s prikazom mikrostrukturnim promjena legure s 10% Al [1] 11
Slika 2.6 Proizvodi koji se izrađuju od bakra [4] 17
Slika 3.1 Primjer portalne glodalice [5] 18
Slika 3.2 Parametri zahvata [2] 21
Slika 3.3 Glodala izrađena iz jednog komada [2] 22
Slika 3.4 Glodala s umetnutim reznim oštrica [2] 22
Slika 3.5 Geometrija alata [2] 23
Slika 3.6 Kratka izvedba glodala za urezivanje s drškom [6] 24
Slika 3.7 Dugačka izvedba glodala za urezivanje s drškom [6] 24
Slika 3.8 Vretenasto glodalo [6] 25
Slika 3.9 Mini glodalo s drškom [6] 25
Slika 3.10 Trohoidalno glodalo za brtvene površine [6] 26
Slika 3.11 Kružno segmentno glodalo [6] 27
Slika 3.12 Četvrtkružno konkavno glodalo [6] 27
Slika 3.13 Glodalo za skidanje srha [6] 28
Slika 4.1 Atest bakra 29
Slika 4.2 Makroneravnine [7] 30
Slika 4.3 Mikroneravnine [7] 30
Slika 4.4 Rezultanta deformacije [7] 30
Slika 4.5 Određivanje srednje linije hrapavosti oblika [7] 31
Slika 4.6 Određivanje srednjeg prosječnog odstupanja [7] 32
Slika 4.7 Određivanje maksimalne visine neravnina [7] 32
Slika 4.8 Označeni uzorci 33

Slika 4.9 Pero 10 x 10 HSS M42 34
Slika 4.10 Postupak obrade u jednom stanju pokusa 34
Slika 4.11 Uređaj AMETEK Taylor Hobson Surtronic S-100 Series 35
Slika 4.12 Obrađeni uzorci 36

Popis tablica

Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra [1] 4
Tablica 4.1 Parametri obrade 33
Tablica 4.2 Rezultati prvog mjerenja 35
Tablica 4.3 Rezultati drugog mjerenja 36