

# Sinterirani filteri za plin

---

**Peša, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:003809>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matej Peša**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Matej Peša

Zagreb, 2021.

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

Posebno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na ukazanom povjerenju, strpljenju, razumijevanju i pruženim informacijama koje su omogućile i olakšale izradu ovog rada.

Također zahvaljujem se asistentu Daliboru Viderščaku, mag. ing. mech., na svim korisnim savjetima i pomoći tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se gospodinu Željku Kostanjskom na pomoći pri izradi uzoraka i doc. dr. sc. Ani Pilipović na izdvojenom vremenu i velikoj pomoći prilikom provedbe ispitivanja i analize dobivenih rezultata. Isto takao zahvaljujem se laborantima Laboratorija za toplinsku obradbu, Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za ljevarstvo koji su sudjelovali i olakšali izradu ovog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima na strpljenju, beskrajnoj potpori i svemu što su učinili za mene tijekom svih ovih godina studiranja.

Matej Peša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATEJ PEŠA**

Mat. br.: 0035198060

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sinterirani filteri za plin**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sintered gas filters**

Opis zadatka:

U petrokemijskoj industriji postavljaju se vrlo visoki zahtjevi na kvalitetu prirodnog plina. U tu svrhu se koriste različiti mediji za čišćenje od kojih su najčešći zeoliti. U njihovoj primjeni u postrojenjima se koriste filteri koji sprečavaju ulazak zeolita u plinovode.

U ovom radu potrebno je analizirati mogućnost izrade i primjene filtera za plinove od sinteriranih brončanih kuglica. U tu svrhu potrebno je proučiti literaturu i upoznati se s trenutnim stanjem na području sinteriranih filtera. Potrebno je odabrati materijal i dimenzije kuglica za izradu uzoraka te tehnologiju izrade uzoraka i glavne tehnološke parametre. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je pripremiti kalup za izradu uzoraka te izraditi uzorke za ispitivanje. Na izrađenim uzorcima potrebno je provesti ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava i strukture.

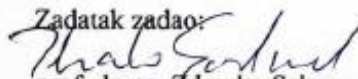
Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o mogućnosti primjene sinteriranih filtera u sustavima sa zeolitom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:  
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....                                       | III  |
| POPIS TABLICA.....                                      | IV   |
| POPIS OZNAKA .....                                      | V    |
| POPIS KRATICA .....                                     | VI   |
| SAŽETAK.....  | VII  |
| SUMMARY .....   | VIII |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 2. BAKAR I NJEGOVE LEGURE .....                         | 2    |
| 2.1. Legure bakra .....                                 | 3    |
| 2.1.1. Mjedi .....                                      | 5    |
| 2.1.2. Posebne mjedi .....                              | 6    |
| 2.1.3. Legure bakra s cinkom i niklom .....             | 7    |
| 2.1.4. Kositrene bronce .....                           | 7    |
| 2.1.5. Aluminijska bronca.....                          | 8    |
| 2.1.6. Silicijska bronca.....                           | 9    |
| 2.1.7. Olovna i olovno-kositrena bronca.....            | 9    |
| 3. METALURGIJA PRAHA.....                               | 11   |
| 3.1. Proizvodnja prahova .....                          | 13   |
| 3.2. Svojstva praha .....                               | 14   |
| 3.3. Karakteristike praha bakra i njegovih legura ..... | 16   |
| 3.3.1. Čisti bakar .....                                | 16   |
| 3.3.2. Bronca .....                                     | 17   |
| 3.3.3. Aluminijska bronca.....                          | 18   |
| 3.3.4. Mjed i novo srebro .....                         | 18   |
| 3.3.5. Legure bakra s niklom .....                      | 18   |
| 3.3.6. Olovno-kositrene i olovne bronce.....            | 19   |
| 4. SINTERIRANJE.....                                    | 20   |
| 4.1. Parametri procesa sinteriranja .....               | 21   |
| 4.2. Sinteriranje bez kompaktiranja praha .....         | 22   |
| 4.3. Sinteriranje bakra i njegovih legura .....         | 24   |
| 5. FILTERI .....  | 26   |
| 5.1. Osnove filtriranja .....                           | 26   |
| 5.2. Sinterirani metalni filteri.....                   | 28   |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO .....                            | 31   |
| 6.1. Prahovi .....                                      | 31   |
| 6.1.1. Analiza kemijskog sastava.....                   | 33   |
| 6.2. Kalup.....   | 34   |
| 6.3. Sinteriranje bez zaštitne atmosfere .....          | 35   |

---

|  |    |
|--|----|
| 6.4. Pjeskarenje kalupa.....                                 | 37 |
| 6.5. Sinteriranje u vakuumu .....                            | 38 |
| 6.6. Sinteriranje u zaštiti argona.....                      | 42 |
| 6.7. Priprema uzoraka za daljnja ispitivanja .....           | 44 |
| 6.8. Mjerenje savojne čvrstoće.....                          | 45 |
| 6.8.1. Rezultati dobiveni ispitivanjem savojne čvrstoće..... | 48 |
| 7. ZAKLJUČAK.....  | 52 |
| LITERATURA.....  | 54 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Legure bakra [3].....  | 4  |
| Slika 2. Utjecaj cinka na mehanička svojstva mjedi [4] .....                          | 6  |
| Slika 3. Oblik čestica praha [9] .....  | 15 |
| Slika 4. Prikaz osnovnih postupaka sinteriranja [7] .....                             | 21 |
| Slika 5. Punjenje kalupa [13] .....   | 23 |
| Slika 6. Puni kalup u peći [13] .....   | 23 |
| Slika 7. Površinska filtracija [16] .....   | 26 |
| Slika 8. Dubinska filtracija [16] .....   | 27 |
| Slika 9. Sinterirani metalni filteri [17] .....                                       | 28 |
| Slika 10. Izrada filtera bez komprimiranja praha [18] .....                           | 29 |
| Slika 11. Prah s lijeve strane 600/1000 i s desne strane 150/250.....                 | 31 |
| Slika 12. Prah 53/90 .....  | 32 |
| Slika 13. Izgled čestica praha 600/1000 (a) i prah 150/250 (b) .....                  | 32 |
| Slika 14. Prah 53/92 pod SEM-om.....  | 33 |
| Slika 15. XRF-Olympus uređaj.....   | 33 |
| Slika 16. Korišteni kalup.....  | 34 |
| Slika 17. Komorna peć bez zaštitne atmosfere .....                                    | 35 |
| Slika 18. Rezultat sinteriranja bez zaštitne atmosfere.....                           | 36 |
| Slika 19. Uzorak sinteriran bez zaštite snimljen SEM-om.....                          | 37 |
| Slika 20. Kalup nakon pjeskarenja .....   | 38 |
| Slika 21. Napunjeni kalup spreman za sinteriranje u vakuumu .....                     | 38 |
| Slika 22. Prah 600/1000 nakon sinteriranja u vakuumu.....                             | 39 |
| Slika 23. Spojene čestice praha 600/1000 .....  | 39 |
| Slika 24. Pločica praha 150/250 sinterirana u vakuumu .....                           | 40 |
| Slika 25. Čestice praha 150/250 nakon sinteriranja u vakuumu .....                    | 40 |
| Slika 26. Uzorak praha 53/90 nakon sinteriranja u vakuumu .....                       | 41 |
| Slika 27. Čestice praha 53/90 nakon sinteriranja u vakuumu .....                      | 42 |
| Slika 28. Prah 600/1000 nakon sinteriranja u zaštiti argona .....                     | 43 |
| Slika 29. Čestice uzorka sinteriranog u zaštiti argona .....                          | 43 |
| Slika 30. Izrezani uzorci iz prahova sinteriranih u vakuumu .....                     | 44 |
| Slika 31. Izrezani uzorci iz zaštitne atmosfere argona .....                          | 44 |
| Slika 32. Uređaj za ispitivanje SHIMADZU AG-X .....                                   | 47 |
| Slika 33. Uzorak spreman za savijanje.....  | 48 |
| Slika 34. Dijagram savojna sila - progib za sve uzorke .....                          | 50 |
| Slika 35. Dijagram savojno naprezanje - istežanje: krivulje srednje vrijednosti ..... | 51 |
| Slika 36. Lom ispitnog uzorka .....   | 51 |



**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bakra [4] .....        | 3  |
| Tablica 2. Parametri sinteriranja raznih legura [8] .....        | 25 |
| Tablica 3. Kemijski sastav prahova .....                         | 34 |
| Tablica 4. Dimenzije uzoraka praha 600/1000 iz vakuuma .....     | 45 |
| Tablica 5. Dimenzije uzoraka praha 150/250 .....                 | 46 |
| Tablica 6. Dimenzije uzoraka sinteriranih u zaštiti argona ..... | 46 |
| Tablica 7. Vrijednosti dobivene ispitivanjem savijanjem .....    | 49 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Mjerna jedinica</b> | <b>Opis oznake</b>      |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| $\rho$        | kg/m <sup>3</sup>      | Gustoća                 |
| $T_t$         | °C                     | Temperatura tališta     |
| $E$           | N/mm <sup>2</sup>      | Modul elastičnosti      |
| $\alpha$      | 10 <sup>-6</sup> /K    | Toplinska rastezljivost |
| $G$           | m/Ωmm <sup>2</sup>     | Električna vodljivost   |
| $\lambda$     | W/mK                   | Toplinska vodljivost    |
| $R_m$         | N/mm <sup>2</sup>      | Vlačna čvrstoća         |
| $R_{ms}$      | N/mm <sup>2</sup>      | Savojna čvrstoća        |
| $\varepsilon$ | %                      | Istezljivost            |

**POPIS KRATICA**

| <b>Kratika</b> | <b>Opis</b>  |
|----------------|--|
| Al             | Aluminij   |
| Ar             | Argon  |
| As             | Arsen  |
| Be             | Berilij  |
| Co             | Kobalt   |
| Cu             | Bakar  |
| FCC            | Plošno centrirana kubična rešetka (eng. Face centered cubic) |
| Fe             | Željezo  |
| H              | Vodik  |
| HIP            | Vruće izostatičko prešanje (eng. Hot Isostatic Pressing)     |
| HRB            | Tvrdoća po Rockwellu- B                                      |
| MIM            | Injekcijsko prešanje praha (eng. Metal Injection Molding)    |
| Ni             | Nikal  |
| O              | Kisik  |
| P              | Fosfor   |
| Pb             | Olovo  |
| PM             | Metalurgija praha (eng. Powder Metallurgy)                   |
| S              | Sumpor   |
| SEM            | Skenirajući elektronski mikroskop                            |
| Sn             | Kositar  |
| Te             | Telurij  |
| Zn             | Cink   |

## **SAŽETAK**

Sinterirani metalni filteri u praksi se koriste već duži niz godina. Primjenu ostvaruju u brojnim industrijama. Široko područje primjene ostvaruju na osnovu svojih dobrih svojstava. U izradi sinteriranih metalnih filtera najviše se primjenjuje prah bronce. Iz tog razloga je u prvom dijelu ovog rada stavljen naglasak na legure bakra i njihova svojstva. Zatim se prikazuju glavne značajke metalurgije praha pri izradi brončanih filtera. U eksperimentalnom dijelu rada opisan je postupak izrade sinteriranih uzoraka primjenom različitih zaštitnih atmosfera. U zadnjem dijelu rada provedeno je ispitivanje savojne čvrstoće izrađenih uzoraka, te su doneseni određeni zaključci.

Ključne riječi: metalurgija praha, sinteriranje, kositrena bronca, sinterirani filteri.

## **SUMMARY**

Sintered metal filters have been used in practice for many years. They are used in many industries. Based on their good properties, they are used in many production plants. Bronze powder is the most used in the production of sintered metal filters. For this reason, the first part of this paper emphasizes copper alloys and their properties. The main characteristics of powder metallurgy during the production of bronze filters are then presented. The experimental part of the paper describes the procedure of production of sintered samples using different protective atmospheres. In the last part of the paper, the flexural strength of the produced samples was tested, and some conclusions were made.

Key words: powdered metallurgy, sintering, tin bronze, sintered filters.

## 1. UVOD

U raznim granama industrije i mnogim proizvodni procesima postoji stanovita potreba za filtriranjem raznih medija. Potreba za filtriranjem tekućina i plinova u raznim sustavima je iznimno velika. U svrhu filtriranja koriste se različite vrste filtera koji mogu biti načinjeni iz širokog spektra materijala. Materijali koji se koriste za izradu filtera su uglavnom razni metalni materijali i keramike. Također, proizvode se filteri od raznih tkanina, papira, stakla, sintetskih polimera i slično.

Mnogi metalni materijali koriste se za izradu filtera. U skupinu metala koji se često koriste spadaju bakar, nikal, nehrđajući čelici, bronca i aluminij. Filteri načinjeni od metalnih materijala imaju široko područje primjene. Primjenjuju se od petrokemijske industrije preko nuklearnih postrojenja sve do proizvoda široke potrošnje kao što su osobni automobili i neki kućanski aparati.

Zbog mnogih specifičnih zahtjeva koji se stavljaju pred medij filtriranja razvijena je zanimljiva tehnologija proizvodnje istih. Na specifične zahtjeve procesa filtracije, dobar odgovor daje metalurgija praha. Iz praškastih materijala koji mogu imati širok spektar veličina čestica praha relativno lako se mogu proizvesti kvalitetni filteri. Praškasti materijali podvrgavaju se procesu toplinske obrade koja se naziva sinteriranje i na taj način se proizvode čvrsti, kompaktni metalni filteri. Pri ovom procesu, raznim parametrima istog, mogu se proizvesti filteri različitih metala sa željenim stupnjem poroziteta.

Metalni materijali koji se koriste za proizvodnju sinteriranih filtera su bronca, nehrđajući čelici, legure na bazi nikla, te titan. Tehnologija proizvodnje, primjena i svojstva sinteriranih metalnih filtera detaljnije su opisana u nastavku ovog rada. U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su uzorci iz tri različita praha, pri tri različite atmosfere sinteriranja. Na kraju rada ispitana su osnovna svojstva dobivenih uzoraka i dani su pripadajući zaključci.

Metalnim filterima se ostvaruju manji padovi tlaka u postrojenjima, lako se čiste, imaju duži životni vijek, lakše se rukuje s njima. Osim navedenog, velika prednost metalnih filtera je mogućnost aplikacije u sustavima s povišenim temperaturama medija koji je potrebno filtrirati.

## 2. BAKAR I NJEGOVE LEGURE

Bakar i njegove legure se u čovječanstvu koriste već tisućama godina. Da se bakar i njegove legure koriste od davnina govori nam prapovijest s dva važna razdoblja, a to su Bakreno doba i Brončano doba. Izniman vremenski period korištenja bakar ostvaruje na osnovu svojih dobrih svojstava. Detaljna svojstva i područja primjene bakra prikazana su u ovom poglavlju. Čisti bakar je metal kojeg odlikuje svijetla crvenkasto smeđa boja. Bakar nije magnetičan, nije polimorfan i ima kubično plošno centriranu kristalnu rešetku (FCC).

U današnje vrijeme bakar i legure bakra spadaju u glavnu skupinu komercijalno primjenjivih metala. Po primjeni i proizvodnji nalaze se na trećem mjestu i to iza željeza (čelika) i aluminijska [1].

U prirodi se bakar u čistom obliku pojavljuje vrlo često. Nalazi se u obliku ruda i najčešće se dobiva iskopavanjem sulfidnih i oksidnih ruda. Najznačajnija je sulfidna ruda halkopirit ( $\text{CuFeS}_2$ ) koja u sebi sadrži oko 34,5% bakra. Pored halkopirita bakar se još nalazi u oksidnim rudama koja se naziva kuprid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), te karbonatnim rudama malahit ( $\text{Cu}_2[\text{OH}-\text{CO}_3]_2$ ) i azurit ( $\text{Cu}_3[\text{OH}-\text{CO}_3]_2$ ) [2].

Mehanička svojstva bakra ovise o njegovom stanju i definirana su njegovom kristalnom rešetkom. Bakar ima dobru oblikovljivost i žilavost na sobnoj temperaturi, a dobru žilavost zadržava i pri sniženim temperaturama. Hladnim oblikovanjem bakru se povećava čvrstoća ali se pritom smanjuje istezljivost. Važno je naglasiti kako bakar u čistom obliku ima nisku čvrstoću, te se ona povećava legiranjem [2].

Ukupna potražnja bakra u Europi iznosi približno 4,3 milijuna tona. Pritom se pretežito upotrebljava u elektrotehnici i telekomunikacijama (50%), dok se ostatak približno dijeli tako da se 25% iskorištava u građevinarstvu, 11% u strojarstvu, 7% u automobilske industriji i 7% ostali [3].

Veliku upotrebu i široko područje primjene ostvaruju na osnovu dobrih svojstava kao što su:

- Električna vodljivost čistog bakra bolja je od svih metala izuzev srebra na volumnoj osnovi i aluminijska na masenoj osnovi.
- Velika toplinska vodljivost.
- Svojstva čistog bakra kao: čvrstoća, otpornost na koroziju na oksidaciju, otpornost na puzanje, otpornost na umor, otpornost na koroziju i livljivost mogu se poboljšati legiranjem, ali se pri tome snižava električna i toplinska vodljivost.

- Većina legura ima izvrsnu duktilnost u žarenom stanju i posebno su pogodne za proizvodnju cijevi, duboko vučenje, kovanje i oblikovanje u toplom stanju.
- Dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskoj sredini stvaranjem „patine“ [4].

Detaljan prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava bakra ostvaren je tablicom 1.

**Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bakra [4]**

| Svojstvo                       | Oznaka        | Mjerna jedinica     | Iznos     |
|--------------------------------|---------------|---------------------|-----------|
| <b>Gustoća</b>                 | $\rho$        | kg/m <sup>3</sup>   | 8930      |
| <b>Talište</b>                 | $T_t$         | °C                  | 1083      |
| <b>Modul elastičnosti</b>      | $E$           | N/mm <sup>2</sup>   | 2125000   |
| <b>Toplinska rastezljivost</b> | $\alpha$      | 10 <sup>-6</sup> /K | 17        |
| <b>Električna vodljivost</b>   | $G$           | m/Ωmm <sup>2</sup>  | 35...58   |
| <b>Toplinska vodljivost</b>    | $\lambda$     | W/mK                | 240...386 |
| <b>Vlačna čvrstoća</b>         | $R_m$         | N/mm <sup>2</sup>   | 200...360 |
| <b>Istezljivost</b>            | $\varepsilon$ | %                   | 2...45    |

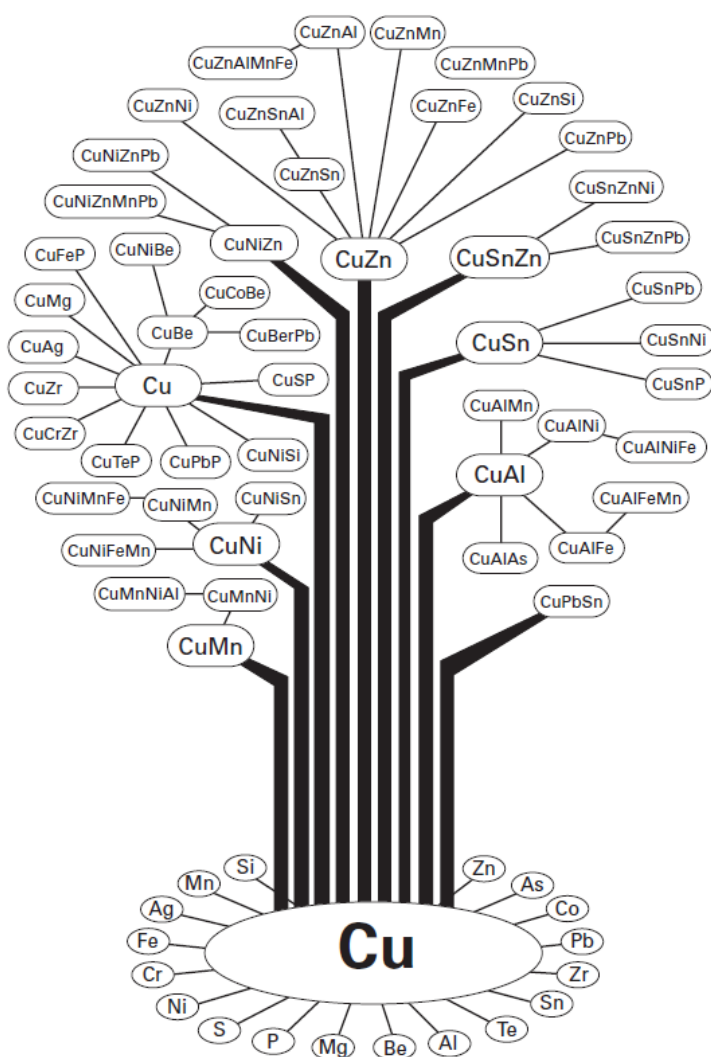
Kao minusi i nedostaci bakru mogu se navesti njegova visoka cijena i visoka temperatura tališta. Također nedostatak mu je to što se ne smije upotrebljavati u prehrambenoj industriji odnosno u dodiru s hranom. Razlog tome je stvaranje otrovne prevlake koja se naziva bakrov acetat [4].

## 2.1. Legure bakra

Klasifikacija legura bakra obično se provodi na temelju vrste i udjela glavnih legiranih elemenata. Pored glavnih legiranih elemenata, svaka pojedina vrsta može sadržavati i druge elemente koji kao takvi imaju određen utjecaj na specifična svojstva [4].

Na slici 1 prikazano je simbolično drvo bakar legura, gdje su prikazani glavni elementi za legiranje s bakrom. Neki od glavnih legiranih elemenata vidljivi sa slike su: cink, aluminij, kositar, nikal i mangan.





Slika 1. Legure bakra [3]

Najznačajnije su legure bakra s cinkom, te kositrom. Upravo su te legure označene tradicionalnim imenom i široko poznate pod nazivom mesing ili mjed i bronca.

Kada govorimo o mjedi možemo reći da su to zapravo legure bakra s cinkom u čiji sastav mogu biti dodani i drugi elementi ali u manjim količinama. U osnovi postoje dvije vrste mjedi:  $\alpha$ -mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u hladnom stanju i  $(\alpha+\beta)$ -mjedi koje su oblikovljive deformiranjem u toplom stanju [4].

Pod tipične bronce smatraju se legure bakra s kositrom. Postoje i druge vrste bronce koje osim bakra još mogu sadržavati cink, olovo, aluminij, mangan, željezo, silicij i tako dalje. Kod ovih vrsta bronce ime se određuje na osnovu legirnog elementa koji je prisutan u najvećoj količini. Tako da razlikujemo aluminijevu broncu, olovnu broncu, manganovu broncu i tako dalje [4].

Legure bakra se u osnovi mogu podijeliti na dvije glavne skupine i to su [4]:

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.

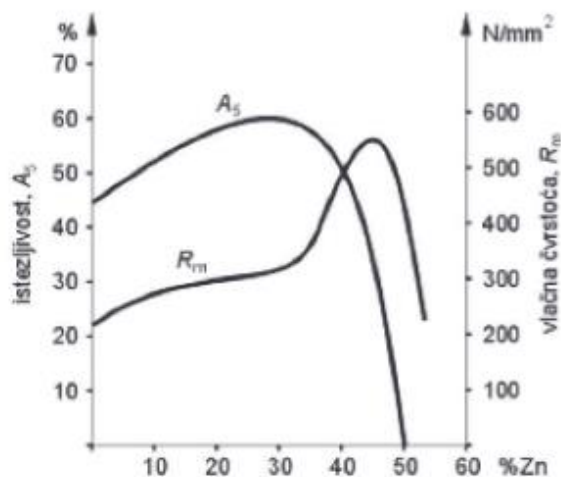
2. Legure bakra bez cinka:

- 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).

### **2.1.1. Mjedi**

Najviše u upotrebi i najraširenije su upravo legure bakra s cinkom odnosno mjedi. To je legura koja uz bakar obično sadrži od 5% do 40% cinka. Ovu leguru odlikuju svojstva poput dobre toplinske i električne vodljivosti, dobra korozijska otpornost, a ima i dobru obradivost te mogućnost prerade u hladnom i toplom stanju. Čvrstoća mjedi raste s porastom udjela cinka u sastavu sve do nekih 45% cinka, te daljnjim porastom udjela cinka dolazi do smanjenja čvrstoće.

Također, sličan utjecaj udio cinka ima i na istezljivost. Istezljivost raste s porastom udjela cinka do 30% cinka, a daljnjim povećanjem udjela cinka dolazi do sniženja istezljivosti. Iz tog razloga se legure mjedi s više od 44% cinka smatraju nepovoljnima za primjenu. Utjecaj cinka na čvrstoću i istezljivost mjedi prikazan je slikom 2.



**Slika 2. Utjecaj cinka na mehanička svojstva mjedi [4]**

Mjedi koje sadrže do 37% cinka u leguri klasificiraju se kao jednofazne alfa mjedi, dok se legure s udjelom cinka većim od 37% nazivaju alfa + beta mjedi. Količina beta faze povećava se s porastom udjela cinka. Do stvaranja veće količine beta faze može doći i pri nižem udjelu cinka ukoliko se dodaju legirni elementi kao što su silicij i aluminij. Poznato je i da dodatak aluminijska povoljno utječe na povećanje otpornosti prema erozijskoj koroziji u alfa mjedi. Usprkos tome, legure mjedi koje sadrže značajno više od 2% aluminijska više su podložne lokalnoj jamičastoj koroziji [5].

### 2.1.2. Posebne mjedi

Pod posebne mjedi smatraju se legure koje sadrže 54% do 62% bakra i do 7% određenih legirnih elemenata, pri čemu ostatak sastava čini cink. Dodavanjem točno određenih elemenata u leguri poboljšavaju se željena svojstva poput korozijske otpornosti, čvrstoće, istezljivosti, žilavosti i tako dalje [4].

Naziv legure uobičajeno se formira prema dodanom legirnom elementu. Tako se na primjer legura Cu-Zn-Al naziva aluminijska mjed. Posebne mjedi mogu se prema tehnologiji proizvodnje podijeliti u dvije skupine, a to su: lijevane i kovane posebne mjedi [2].

Legirni elementi koji se uobičajeno koriste i njihov utjecaj su:

- Aluminij- element koji značajno povećava čvrstoću, a pritom se istezljivost ne mijenja. Također, aluminij pridonosi stvaranju površinskog zaštitnog oksidnog sloja.
- Nikal- dovodi do porasta čvrstoće, poboljšanja svojstava korozijske otpornosti i usitnjuje zrno pri postupku toplinske obrade žarenjem.
- Željezo- usitnjuje zrno i na taj način utječe na porast čvrstoće.

- Mangan- uvelike utječe na porast korozijske otpornosti mjedi u morskoj vodi i vodenoj pari. Povećava čvrstoću, uz udio do 4% ne smanjuje žilavost, dok više od 4% dovodi do smanjenja žilavosti i istezljivosti.
- Silicij- djeluje na smanjenje zaostalih naprezanja.
- Kositar- poboljšava antikorozivna svojstva, ali se ograničava na 1% u leguri jer u većem udjelu djeluje na smanjenje istezljivosti [4].

### **2.1.3. Legure bakra s cinkom i niklom**

Ove legure sastoje se od 55% do 63% bakra uz dodatak od 10% do 30 % nikla pri čemu ostatak u udjelu čini cink. Na ovaj način nastaje legura koja ima srebrnu boju i iz tog razloga se naziva novo srebro. Cink poboljšava svojstvo livljivosti i snižava cijenu legure, ali je veći sadržaj cinka potrebno izbjegavati jer smanjuje otpornost na koroziju i čvrstoću. U manjim količinama za poboljšanje svojstava kao legirni elementi dodaju se: nikal, mangan, željezo, kositar i olovo [4].

Ove legure imaju iznimnu vlačnu čvrstoću pri sniženim temperaturama, a isto tako imaju dobru vlačna čvrstoća na povišenim temperaturama. Čak i male količine nikla u sastavu povećavaju vlačnu čvrstoću pri povišenim temperaturama. Uz dodatak željeza, poboljšavaju se mehanička svojstva ne samo na sobnoj temperaturi već i na povišenim temperaturama. Otpornost prema koroziji legura bakra s niklom je izvrsna i može se ubrojiti među najotpornije materijale. Otpornost prema koroziji ostvaruje se stvaranjem oksidnog sloja. Legure koje sadrže 10% do 30 % nikla imaju dobru otpornost čak i prema vrućoj morskoj vodi [3].

### **2.1.4. Kositrene bronce**

Legura bakra i kositra naziva se kositrena bronca i ova legura se uobičajeno naziva „samo“ bronca. Dijagram stanja kositrene bronce jedan je od složenijih osobito na dijelu između 20% i 40% kositra. U tehničkoj primjeni važne su samo legure koje sadrže manje od 20% kositra. Kositrene bronce s većim udjelom kositra poprilično su krhke zbog prisutnosti intermetalne faze i iz tog razloga se ne primjenjuju u praksi [2].

Legiranje bakra s kositrom ima sličan utjecaj na svojstva bronce kao i dodavanje cinka kod mjedi. Na taj način se povećava čvrstoća, otpornost na trošenje i otpornost prema koroziji. Bronce s većim udjelom kositra (do 20%) uglavnom se koriste za lijevanje, dok se bronce s do 7% kositra u praksi najčešće hladno oblikuju. U praksi se lijevane bronce koriste puno češće od kovanih bronci. Lijevana bronca ima dobru čvrstoću i žilavost, veliku korozijsku

otpornosti i dobru otpornost prema trošenju. Prilikom lijevanja i hlađenja bronca ima mali postotak skupljanja koji iznosi oko 1% [2].

Lijewane kositrene bronce s niskim udjelom kositra (CuSn1) imaju dovoljnu električnu vodljivost i kao takve se koriste u elektrotehnici. Bronce CuSn5 i CuSn10 imaju vlačnu čvrstoću 180 MPa i 220 MPa, duktilnost 15% i imaju dobru otpornost na koroziju. Ove legure se uglavnom koriste kod dijelova turbina, kompresora i pumpi. Bronca CuSn12 koristi se za dijelove koji su izloženi velikim naprezanjima i trošenju, pa se primjenjuje za izradu zupčanika. Zbog visoke cijene bronca s udjelom kositra od 14% do 16% zamjenjuje se broncama s udjelom kositra do 6% koja ima dobra klizna svojstva. Lijewane bronce uglavnom imaju dobru otpornost na trošenje i dobra klizna svojstva i iz tih razloga se primarno koriste za izradu kliznih ležajeva [2].

Mnogo kositrenih bronci u svom sastavu sadrže relativno male količine fosfora. Ta količina iznosi oko 0,05% i javlja se kao ostatak kemijske reakcije pri procesu lijevanja. Takve se bronce nerijetko i pogrešno kategoriziraju kao fosforna bronca. Zapravo su prave fosforne bronce one u čiji je kemijski sastav namjerno dodan fosfor u udjelu od 0,1% do 1% [4].

### **2.1.5. *Aluminijeva bronca***

Aluminijeva bronca je legura bakra pri čemu je glavni legirni element aluminij. U praksi se uglavnom koriste legure koje sadrže do 12% aluminija. S obzirom na kemijski sastav ove legure se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe i to su:

1. osnovne aluminijeve bronce
2. višekomponentne aluminijeve bronce

Osnovne aluminijeve bronce su legure koje osim bakra i aluminija nemaju niti jedan drugi legirni element. Pod višekomponentne aluminijeve bronce spadaju legure koje pored aluminija i bakra u sastavu sadrže i druge legirne elemente poput željeza, magnezija i nikla pri čemu njihov udio ne prelazi 6% [2].

Željezo kao legirni element je u aluminijevoj bronci dosta čest. Njegovim dodavanjem u leguru povećava se čvrstoća. Magnezij se dodaje iz razloga što djeluje deoksidirajuće na rastaljenu leguru. Nikal je element koji se u ovu leguru najčešće dodaje. On djeluje na povećanje korozijske otpornosti u agresivnim okolinama kao što je morska voda [2].

Homogene aluminijske bronce s udjelom aluminija do 9,4% su žilave i pogodne su za hladno i toplo oblikovanje. Heterogene legure aluminijske bronce su čvršće i tvrđe, te su nešto manje

pogodne za hladno oblikovanja u usporedbi s homogenim legurama. One su pogodnije za toplo oblikovanje i lijevanje [2].

Ove legure svoju upotrebu u praksi ostvaruju na osnovu dobrih svojstava kao što su otpornost na trošenje i otpornost prema koroziji. Također ostvaruju dobre vrijednosti čvrstoće i pri povišenim temperaturama. Na povišenim temperaturama imaju veliku otpornost na oksidaciju. Pored svega toga imaju lijepu boju koja omogućuje primjenu u dekorativne i ukrasne potrebe, a koristi se kao zamjena za zlato u izradi umjetnog nakita. Glavni nedostatak koji onemogućuje široku upotrebu ovih legura su poteškoće kod lijevanja. Prilikom lijevanja dolazi do lake oksidacije i stvaranja oksidnog sloja na površini rastaljenog metala koji ulazi u kalup i stvara poteškoće. Iz tog razloga je potrebno koristiti specijalne postupke lijevanja koji u konačnici dodatno poskupljuju proizvod [4].

#### **2.1.6. Silicijeva bronca**

U ovoj leguri sadržaj silicija kreće se u rasponu od 0,9% do 3,5%. Ukoliko se silicijeva bronca koristi u slučaju gdje je potrebna veća električna vodljivost tada sadržaj silicija ne smije prelaziti 1%. Silicijeva bronca rijetko je dvokomponentna. Češće se u sastav legure dodaju legirni elementi poput mangana, nikla, cinka, željeza i olova. Dodatkom mangana se povećava tvrdoća, čvrstoća i korozijska otpornost. Cink utječe na poboljšanje svojstva lijevanja i na mehanička svojstva slično djeluje kao mangan. Olovo se dodaje kako bi se osigurala dobra klizna svojstva [2], [4].

Silicijske bronce imaju dobra svojstva hladnog i toplog oblikovanja, a mogu se i lijevati. Imaju dobru korozijsku postojanost i otporni su na sumpornu kiselinu, solnu kiselinu i na neke lužine. Zbog svojih dobrih mehaničkih, kemijskih svojstava i dobre otpornosti prema trošenju, silicijske bronce mogu se koristiti kao zamjena za kositrenu broncu. U odnosu na kositrenu broncu, silicijeva bronca ima veću čvrstoću i pogodna je za primjenu na višim temperaturama [2].

#### **2.1.7. Olovna i olovno-kositrena bronca**

Kod ove vrste bronci u kemijskom sastavu se kositar djelomično ili u potpunosti zamjenjuje olovom. Olovo se kao legirni element dodaje bakru s ciljem poboljšanja kliznih svojstava, ali da se pritom negativno ne utječe na svojstvo toplinske vodljivosti bakra. Olovo se dodaje i u svrhu poboljšanja rezljivosti i obično se dodaje do 3% olova u leguru [2], [4].

Ove bronce se zbog dobrih kliznih svojstava koriste za izradu ležajeva. Postoje dvije osnovne grupe olovnih bronci koje se koriste u tu svrhu: bronca s niskim udjelom olova od 10% do

---

20% koja sadrži dodatak kositra od 5% do 10%; bronca s visokim udjelom olova (25% do 30%) pri čemu u sastavu nema kositra [2].

Olovna bronca koja sadrži veće količine olova koriste se za specijalne namjene kao što su klizni ležajevi. Takve legure podnose do 20% veća opterećenja u odnosu na olovno-kositrene bronce. Uz sve to olovne bronce imaju i bolju toplinsku vodljivost pa se mogu koristiti pri većim brzinama jer brže odvede toplinu [4].

### 3. METALURGIJA PRAHA

Metalurgija praha (PM; eng. powder metallurgy) kao tehnologija izrade proizvoda nije nova i koristi se još od prapovijesti. Početak dvadesetog stoljeća možemo smatrati ključnim za razvoj suvremene metalurgije praha. U to doba dolazi do razvoja praškastih materijala i do masovne proizvodnje dijelova ležajeva načinjenih od porozne bronce. Nadalje, tokom drugog svjetskog rata dolazi do daljnjeg razvoja i proizvodnje metalnih i nemetalnih materijala, a do značajnog razvoja metalurgije praha dolazi u poslijeratnom razdoblju. U zadnjih dvadesetak godina metalurgija praha etablirala se za izradu preciznih strojnih dijelova na osnovu metalnih prahova koji u konačnici imaju svojstva usporediva s dijelovima dobivenim konvencionalnim postupcima izrade [6].

Metalurgija praha može se definirati kao tehnologija proizvodnje metalnih prahova koji se dodatnom obradom, u prvom redu kompaktiranjem i sinteriranjem, mogu pretvoriti u kompaktne i čvrste proizvode.

Tehnologija metalurgije praha može se opisati kao proces unutar kojeg se metal, legure ili keramika, u obliku čvrstih čestica određenog promjera, pretvara u inženjersku komponentu kojoj su svojstva i oblik unaprijed određena. Proizvodnja dijelova se odvija na takav način da u većini slučajeva nije potrebna dodatna obrada proizvoda. Kao osnovne operacije pri proizvodnji tehnologijom metalurgije praha smatraju se [7]:

- proizvodnja prahova
- miješanje praha s aditivima
- kompaktiranje praha
- sinteriranje.

Metalurgija praha u današnje vrijeme sve se više primjenjuje u mnogim industrijskim granama, a to ostvaruje na osnovu prednosti poput [7]:

- Mogu se proizvesti dijelovi od jednostavne do jako složene geometrije.
- Stupanj iskorištenja materijala je jako visok.
- Ušteda energije i manji troškovi proizvodnje.
- Razvoj materijala s novim mikrostrukturama.
- Visok stupanj automatiziranosti proizvodnje.
- Mogućnost proizvodnje poroznih dijelova.
- Točne dimenzije gotovih proizvoda.



- Proizvodnja dijelova kojima nije potrebna dodatna obrada.

Nedostaci metalurgije praga koji se mogu izdvojiti su [7]:

- Visoka cijena prahova.
- Visoka cijena potrebne opreme i alata.
- Ekonomična proizvodnja jedino kod velikoserijske proizvodnje.
- Moguća oksidacija koja dovodi do smanjenja mehaničkih svojstava.
- Ograničenja po pitanju oblika i dimenzija gotovih proizvoda.
- Moguća pojava razlike u gustoći gotovih proizvoda.
- Potreban strogi nadzor svih dijelova procesa.
- Skupa i složena izrada kalupa.

Metode proizvodnje metalurgijom praha mogu se podijeliti u dvije glavne skupine:

1. konvencionalni postupci (eng. press-and-sinter methods)
2. postupci za postizanje teoretske gustoće (engl. full density processes) [8].

Konvencionalni postupci metalurgije prah kreću s operacijom miješanja osnovnog praha s eventualnim aditivima. Nakon miješanja praha slijedi kompaktiranje praha, pri čemu kompaktiranje može biti hladno ili toplo. Kompaktiranjem se dobiju čvrsti poluproizvodi kojima se omogućuje lakše daljnje rukovanje. Toplim kompaktiranjem izrađuju se poluproizvodi koji imaju veću gustoću i čvrstoću u odnosu na one dobivene hladnim kompaktiranjem. Tako dobivene poluproizvode potrebno je podvrgnuti procesu sinterirati. Sinteriranje je proces koji predstavlja vrlo važan korak u proizvodnji i na njega treba obratiti dodatnu pažnju. U nastavku proizvodnje nakon sinteriranja slijedi eventualna dodatna mehanička obrada proizvoda i eventualna završna obrada. Po završetkom navedenih koraka dobiva se gotov proizvod.

Druga metoda proizvodnje metalurgijom praha formirana je posebno za dobivanje proizvoda koji imaju gustoću što je bliže moguće teoretskoj gustoći. Ova metoda je u suprotnosti s konvencionalnim postupkom gdje postizanje teoretske gustoće nije primarni cilj.

Postupci za postizanje teoretske gustoće su sljedeći [8]:

- kovanje praha (engl. powder forging)
- injekcijsko prešanje praha (engl. metal injection molding, MIM)
- toplo izostatičko prešanje (engl. hot isostatic pressing, HIP)
- kompaktiranje valjanjem (engl. roll compaction)
- toplo prešanje (engl. hot pressing)

- ekstrudiranje (engl. extrusion).

Ovi postupci primjenjuju se s ciljem odstranjivanja poroziteta iz strukture proizvoda. Eliminiranje poroziteta ključno je za proizvode koji se koriste u određenim eksploatacijskim uvjetima. Kod strojnih dijelova koji su opterećeni većim opterećenjima bitno je da u strukturi nema poroziteta jer ona predstavljaju mjesta gdje dolazi do koncentracije naprezanja. Većinu navedenih postupaka prilikom proizvodnje karakterizira istovremena primjena tlaka i temperature. U današnje vrijeme se u znanstveno-istraživačke svrhe kombiniraju različiti postupci s ciljem da se u konačnici dobiju što je moguće bolja svojstva [9].

### 3.1. Proizvodnja prahova

Tehnike proizvodnje metalnih prahova koje se danas koriste omogućuju proizvodnju širokog spektra metalnih prahova. Metalni prahovi koji se u današnje vrijeme proizvode dizajnirani su tako da mogu ispuniti zahtjeve velikog broja područja primjene. Mogu se proizvoditi prahovi gotovo svih metala. Višestruki načini proizvodnje prahova omogućuju preciznu kontrolu kemijskog sastava i fizikalnih karakteristika pri čemu se omogućava i prilagođavanje praha za točno određenu primjenu.

Proizvodnja prahova može se ostvariti na osnovu nekog od četiri osnovna procesa, a to su:

- mehanički
- elektrolitički
- kemijski
- atomizacija

Najraširenija metoda za proizvodnju prahova tvrdih metala i oksida je mehanička metoda. Primjenom ove metode prahovi se izrađuju tako da se djelovanjem vanjske sile usitnjuje polazni materijal. Na ovaj način dobivaju se prahovi s česticama nepravilnog oblika. Sječenje, tlačenje, atritiranje i udarno djelovanje osnovni su načini usitnjavanja primjenom vanjske sile. Ovi načini se prilikom dobivanja prahova često međusobno kombiniraju. Kemijske metode pogodne su za izradu prahova od skoro svih metala, pri čemu se oblik i veličina čestica praha mogu dobro kontrolirati tokom procesa izrade. Elektrolitička metoda ubraja se pod fizikalnu metodu. Pri ovoj metodi prahovi metala dobivaju se taloženjem prahova na katodi nekog metala u procesu elektrolize. Tijekom galvanizacije se prilagodbom kemijskih i fizikalnih uvjeta ostvaruje taloženje metala na katodi u obliku grudica i pahuljica. Tako nataloženi metal vrlo lako se usitnjuje u prah. Ovim načinom se proizvode iznimno čisti prahovi s dobrim svojstvima. Metoda koja je najvažnija za proizvodnju prahova je atomizacija. Najviše se

koristi za proizvodnju metalnih prahova i predlegiranih prahova od aluminija, bronce, željeza, legura titana, nehrđajućih i alatnih čelika. Svaki materijal koji se može rastaliti pogodan je za proces atomizacije. Prednost ovog postupka je izrada prahova visoke čistoće izravno iz rastaljenog metala. Ovaj proces je neovisan o mehaničkim i fizikalnim svojstvima polaznog materijala. Atomizacija se sastoji od tri stadija, a to je taljenje, atomizacija odnosno dezintegracija taljevine u kapljice, skrućivanje i hlađenje [7].

### 3.2. Svojstva praha

Određivanje osnovnih svojstava, odnosno karakterizacija prahova iznimno je bitna za kompletan proces proizvodnje dijelova na osnovu prahova. Kako je prah polazna sirovina za daljnju proizvodnju bitno je da su svojstva praha poznata prije nastavka proizvodnje. Na osnovu karakteristika praha mogu se odabrati povoljniji uvjeti proizvodnje. Karakterizacija praha obuhvaća određivanje sljedećih svojstava:

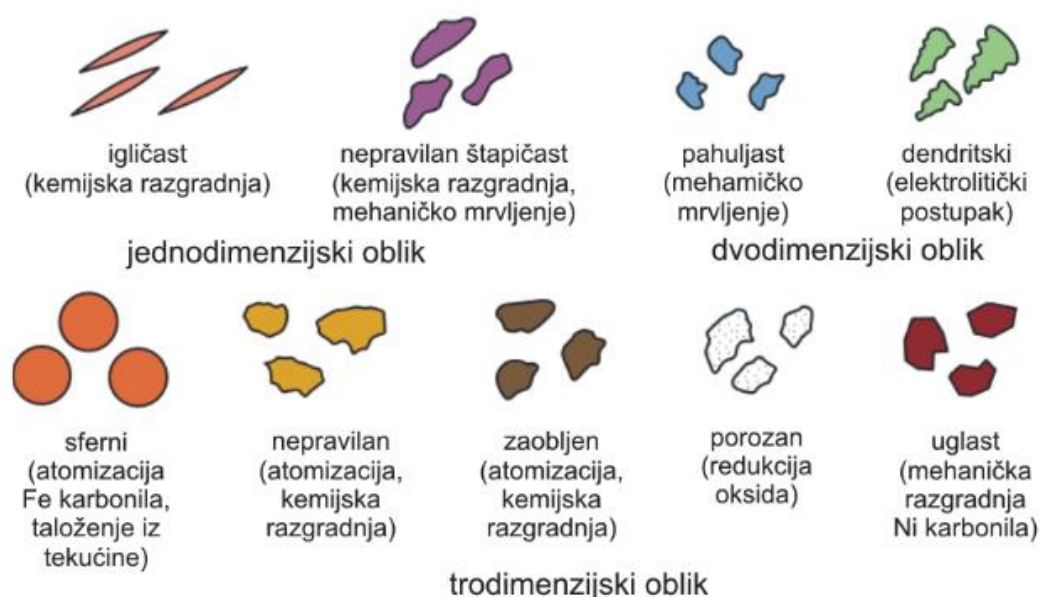
- kemijska svojstva (poput sastava i čistoće)
- fizikalna svojstva (poput dimenzija i oblika čestica)
- tehnološka svojstva (poput stlačivosti i brzine tečenja) [9].

#### Kemijska svojstva praha

Kemijski sastav praha predstavlja jedan bitan faktora u metalurgiji praha i ima veliki utjecaj na tijek daljnje proizvodnje postupcima metalurgije praha. Kemijski sastav ima direktan utjecaj na način i temperaturu sinteriranja, upotrebu zaštitne atmosfere, a utječe i na svojstva gotovog proizvoda. Kemijskom analizom služimo se kako bi odredili udio nečistoća u prahu. Utjecaj na čistoću praha prvenstveno ima način izrade praha. Raznim kemijskim metodama lako se može utvrditi i analizirati kemijski sastav praha. Analizom se utvrđuje udio nečistoća u prahu, poput plinova, kao što su kisik, sumpor, vodik dušik te ostali netopivi elementi, primjerice silicija [9].

#### Fizikalna svojstva praha

Oblik i veličina čestica praha osnovna su fizikalna svojstva čestica praha. Prikaz oblika čestica praha i načini dobivanja pojedinog tipa prikazani su slikom 3.



Slika 3. Oblik čestica praha [9]

Fizikalna svojstva jednako kao i kemijska imaju utjecaj na parametre postupka dobivanja gotovog proizvoda. Ova svojstva utječu na nasipnu gustoću, mogućnost kompaktiranja, a imaju utjecaj i na parametre sinteriranja. Postoje razni oblici čestica praha koji ovise o sirovini i načinu dobivanja praha.

Značajnu ulogu pri dobivanju konačnih svojstava sinteriranog materijala ima oblik čestica praha. Čestice nepravilnog, štapičastog oblika imaju nešto niže vrijednosti nasipne gustoće i brzine tečenja, ali vrlo dobru stlačivost i dobro sraščuju. S druge pak strane, čestice sfernog oblika posjeduju više vrijednosti nasipne gustoće i brzine tečenja, ali pritom imaju lošiju stlačivost i sraščivanje. Temeljem iskustva i dosad provedenih istraživanja determinirano je kako čestice sfernog oblika unatoč nešto lošijoj mogućnosti kompaktiranja i sinteriranja ipak u konačnici daju povoljne rezultate [9].

### Tehnološka svojstva praha

Tehnološka svojstva praha utječu na ponašanje praha i mješavine prahova prilikom tehnoloških operacija mljevenja, granuliranja i posebno kompaktiranja. Najznačajnija tehnološka svojstva praha su [9]:

- Sposobnost sinteriranja
- Sposobnost sabijanja
- Sposobnost tečenja.

Sposobnost sinteriranja predstavlja mogućnost uspostavljanja i održavanja čvrste veze između čestica praha pri procesu zagrijavanja. Sposobnost sinteriranja odnosno mogućnost formiranja čvrstih veza ima direktan utjecaj na svojstva završnog proizvoda [10].

Sposobnost sabijanja vezana je uz mogućnost dobivanja gustog formiranja čestica praha. Sabijanje prahova obuhvaća kompaktiranje praha. Generalno se sposobnost kompaktiranja može definirati kao minimalni potrebni pritisak za postizanje poluproizvoda postojanih dimenzija i oblika [10].

Sposobnost tečenja važan je čimbenik u tehnologiji proizvodnje metalurgije praha. Tečenje praha ima utjecaj na brzinu proizvodnog procesa. Od sposobnosti tečenja zavisna je brzina punjenja kalupa. Što je mogućnost tečenja veća, brže i bolje se kalupi popunjavaju. Ako je pak tečnost praha slabija, dolazi do problema u popunjavanju kalupa što u krajnosti ima loš utjecaj na kvalitetu proizvoda [10].

### **3.3. Karakteristike praha bakra i njegovih legura**

#### **3.3.1. Čisti bakar**

Fizikalna i mehanička svojstva bakra dobivenog konvencionalnim metodama proizvodnje dana su u drugom poglavlju ovog rada. Kako je u tom poglavlju navedeno, između ostalog bakar ima izvrsna svojstva električne i toplinske vodljivosti. U usporedbi s njime jedna čestica praha bakra čistoće 99,95% koji se može proizvesti ima identična svojstva kao i čisti bakar. Primjenom bakrenog praha i njegovim kompaktiranjem, a zatim i sinteriranjem nije za očekivati da se u praksi dobije teoretska gustoća bakra koja iznosi  $8,94 \text{ g/cm}^3$ . Svojstva dijelova izrađenih iz prahova ovisit će o postignutoj gustoći nakon kompaktiranog i sinteriranja proizvoda. Postignuta gustoća proizvoda može se povećati dodatnim operacijama u proizvodnji kao što su dvostruko komprimiranje i dvostruko sinteriranje. Povećanjem gustoće svojstva proizvoda iz prahova mogu se približiti svojstvima konvencionalno dobivenim materijalima. Gustoća nakon sinteriranja ima značajan utjecaj na električnu i toplinsku vodljivost. Vodljivost je direktno vezana uz poroznost. Što je veći stupanj poroziteta to je vodljivost manja [11].

Kompaktiranjem i sinteriranjem praha čistog bakra može se postići vrijednosti električne vodljivosti od 80% do 90% IACS. Visoka električna vodljivost i dobra istezljivost može se postići upotrebom prahova čistog bakra. Takav prah se upotrebljava većinom za dijelove koji se koriste u elektronici i elektrotehnici [11].

### 3.3.2. **Bronca**

Svojstva dijelova načinjenih od brončanog praha su uveliko ovisna od parametara proizvodnje kao što su brzina zagrijavanja, vrijeme sinteriranja i temperatura sinteriranja. Brže zagrijavanje može prouzročiti veći rast zrna u odnosu na sporije zagrijavanje. Temperatura sinteriranja utječe na rast zrna, ali i na čvrstoću. Vrijeme sinteriranja pored čvrstoće najviše utječe na kontrolu dimenzija. Brži rast zrna javlja se na početku sinteriranja i taj proces je praćen predvidivim sporim skupljanjem. Skupljanje brončanog praha predstavlja problem u samoj proizvodnji, ali se on može kontrolirati odabirom parametara sinteriranja tako da skupljanje ostane u intervalu od jedan do dva posto [11].

Jedinstveno svojstvo koje pruža metalurgija praha jeste proizvodnja proizvoda s raznim stupnjem poroziteta u strukturi. Upravo je to svojstvo omogućilo razvoj samostalno podmazivih brončanih ležajeva. Takvi ležajevi su produkt ranog razvoja metalurgije praha i prvi ležajevi su se koristili u Buick automobilima 1920-tih godina. Ležajevi proizvedeni na takav način mogu apsorbirati određenu količinu ulja i na taj način isporučiti kontinuirano podmazivanje čak i pri niskim brzinama. Ovi ležajevi doveli su do revolucije u industriji metalurgije praha. Daljnjim razvojem nalažene su nove mogućnosti i područja primjene brončanog praha, ali i dalje najveći udio ovog praha koristi se u proizvodnji ležajeva [11].

Mogućnost da se primjenom prahova postigne željena poroznost u strukturi i da se pritom veličina pora može kontrolirati, otvara novo područje primjene. Upravo su poroznost i postizanje ženjene veličine pora ključne značajke pri proizvodni filtera od sinteriranih prahova. Upotrebom prahova koji imaju čestice sfernog oblika i dimenzijama koje su vrlo točne može se proizvesti filter s točno određenom veličinom pora. U svrhu proizvodnje filtera iz praškastih materijala prvenstveno se koristi bronca [11].

U praksi je za proizvodnu filtera najviše korištena kositrena bronca, ali osim nje se još koriste novo srebro i legure bakra kositra i nikla. Efektivna veličina pora u filterima može se kretati u rasponu od 5  $\mu\text{m}$  do 125  $\mu\text{m}$ . Naravno da je pored navedenog raspona moguće izraditi posebne filtere koji će imati veličinu pora oko jednog mikrona, uz to se za posebne namjene izrađuju i filteri s većim porama. Brončani sinterirani filteri se mogu proizvesti s vrijednostima vlačne čvrstoće od 20 MPa do 140 MPa, te s dobrim vrijednostima istezljivosti koje mogu biti i do 20%. Sinterirana bronca ima ista korozijska svojstva kao i ona lijevana, uz uvjet da je kemijski sastav identičan. Uz dobra korozijska svojstva može se primjenjivati u raznim okolinama i atmosferama [8].

### 3.3.3. *Aluminijeva bronca*

Prahovi aluminijeve bronce sadrže od 5% do 11% aluminija. Ovisno od udjela aluminija u kemijskom sastavu razlikuju se mehanička svojstva. Tako na primjer granica razvlačenja aluminijeve bronce s 7% aluminija iznosi 26 MPa, dok ista iznosi 276 MPa kod legure s 11% aluminija u kemijskom sastavu. Dodatnom toplinskom obradom se leguri s 11% aluminija može povećati granica razvlačenja na oko 400 MPa. Vlačna čvrstoća se povećava s porastom postotka aluminija, pa tako za leguru s 7% aluminija čvrstoća iznosi 221 MPa, a za toplinski obrađenu leguru s 11% aluminija 448 MPa. Istezljivost je bolja kod legura s manjim postotkom aluminija (5% do 9%) i ono se kreće u rasponu od 25% do 30%. Navedena svojstva pokazuju kako je prah ove legure primjereniji za proizvodnju dijelova gdje je potrebna veća čvrstoća od one koju pruža prah kositrene bronce [11].

### 3.3.4. *Mjed i novo srebro*

Komercijalno dostupni prahovi mjedi kreću se u rasponu osnovnih mjedi i to u sastavu od pet do četrdeset posto cinka u kemijskom sastavu. Pored toga dostupne su i olovne varijante mjedi, te modificirane mjedi koje sadrže elemente poput fosfora, mangana i silicija. Legure novog srebra koje su komercijalno dostupne na tržištu su uglavnom 64Cu18Ni18Zn i 64Cu18Ni16,5Zn1,5Pb. Prahovi ovih legura proizvode se metodom atomizacije iz legiranog metala. Optimalna svojstva postižu se predgrijavanjem kako bi se uklonilo mazivo, a zatim sinteriranjem u zaštitnoj atmosferi. Ove legure proizvedene na ovakav način imaju svojstva usporediva s istovjetnim legurama dobivenim postupkom lijevanja [11].

Uz prah bronce, prahovi mjedi se najviše koriste u pogledu legura bakra. Mjed i novo srebro primjenjuju se za izradu raznih dijelova, a neki od njih su: dijelovi tokarskih strojeva, cilindri na lokotima, zupčanici, dijelovi kamera i mnogi drugi [11].

### 3.3.5. *Legure bakra s niklom*

Legure 75Cu25Ni i 90Cu10Ni razvijene se u svrhu proizvodnje kovanog novca, te u primjeni gdje je potrebna izvrsna korozivna otpornost. Legura 75Cu25Ni nakon prešanja pod tlakom od 772 MPa postigla je gustoću 89% od svoje teoretske gustoće. Sinteriranjem na temperaturi od 1090 °C u zaštitnoj atmosferi dobiju se sljedeća svojstva: istežljivost iznosi 14%, a tvrdoća po Rockwellu HRB 20. Ponovnim prešanjem pri tlaku od 690 MPa postiže se gustoća od 95%. Ova legura ima boju sličnu onoj nehrđajućim čelicima i može se polirati tako da se dobije površina visokom sjaju. 90Cu10Ni legura u proizvodnji i prešanju pri sličnim uvjetima

postiže konačnu gustoću od 99,4%, što je iznimno visoko. Ova legura ima svijetlu brončanu boju i lako poliranjem postiže visoki sjaj. Zbog ovih svojstava može se koristiti u dekorativne svrhe. Tako se od ovih materijala proizvode kovanice, medalje i medaljoni [8].

### 3.3.6. Olovno-kositrene i olovne bronce

Metali kao što su olovo i bakar, koji imaju ograničenu topivost jedan u drugom vrlo su složeni za legiranje i proizvodnju na konvencionalan način. U takvim situacija svoje prednosti iskazuje metalurgija praha. Prahovi ovih legura imaju izvrsnu mogućnost hladnog oblikovanja prešanjem. Imaju mogućnost ostvariti relativno visoke vrijednosti gustoće pri niskim tlakovima kompaktiranja. Pa tako ostvaruju 80% gustoće pri tlačenju od 76 MPa. Nakon sinteriranja može se provesti ponovno prešanje i na taj način postići proizvod koji gotovo nema poroziteta u strukturi [8].

Legure s udjelom olova od 40 do 45% koriste se za proizvodnju ležajeva. Takve legure imaju tvrdoću po Vickersu oko 32, dok svu vrijednosti čvrstoće oko 76 MPa. Legure s nešto nižim udjelom olova, oko 30%, imaju veću čvrstoću, ali se javljaju problemi s izgledom površine. Smanjivanjem udjela olova, a dodavanjem kositra postiče se povećanje čvrstoće. Tako legura 74Cu22Pb4Sn posjeduje čvrstoću od 117 MPa, dok je tvrdoću po Vickersu 50. Ukoliko postoji potreba da se zadovolji još veća tvrdoća i čvrstoća primjenjuje se prah legure 80Cu10Pb10Sn. Takva legura može postići tvrdoću po Vickersu u rasponu od 60 do 80, te se dodatnom obradom može i još malo podići [11].



## 4. SINTERIRANJE

Kako je u prethodnom poglavlju navedeno, sinteriranje se smatra jednom od osnovnih operacija u proizvodnji dijelova iz metalnih prahova. Pored toga sinteriranje se može smatrati najvažnijim korakom u tehnologiji proizvodnje metalurgije praha.

Sam postupak sinteriranja može se definirati kao proces konsolidacije praha ili prethodno kompaktiranog poluproizvoda pod utjecajem povišene temperature određen vremenski period. Sinteriranje se još naziva i srašćivanje. Ovaj dio proizvodnog procesa smatra se procesom toplinske obrade pri čemu se prah ili kompaktirani poluproizvod podvrgavaju zagrijavanju na temperature nešto niže od temperature taljenja glavnog konstituenta u prahu. Svrha zagrijavanja na dovoljno visoku temperaturu ali uvijek ispod temperature taljenja je povezivanje čestica praha, a time i poboljšanje čvrstoće. Temperature sinteriranja uvelike ovise o temperaturi taljenja glavnog konstituenta u prahu i obično se sinteriranje provodi na temperaturama 70% do 90% temperature taljenja glavnog konstituenta [9].

Sinteriranje se smatra složenim i posebnim postupkom toplinske obrade koji zahtjeva poseban skup uvjeta kako bi se osiguralo uspješno povezivanje. Za svaki materijal prilikom sinteriranja javljaju se određeni i specifični fenomeni. Glavni fenomeni koji se javljaju u procesu sinteriranja su:

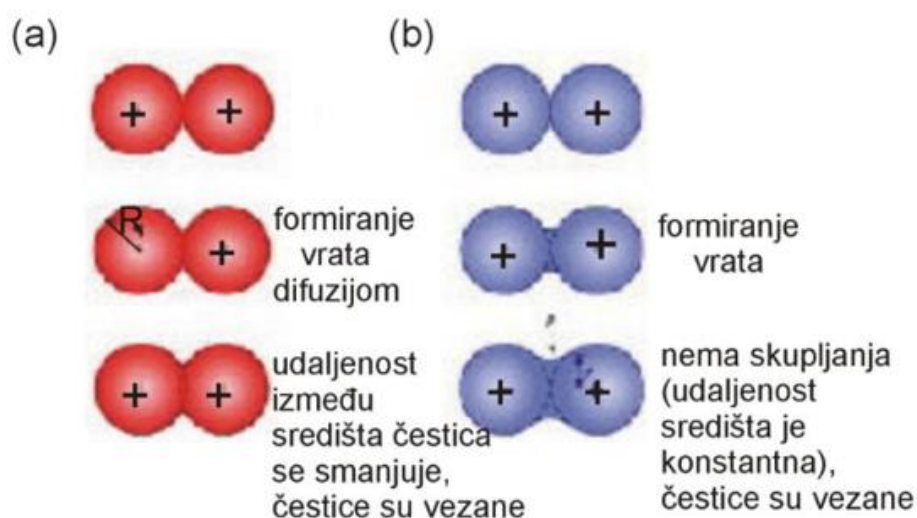
- Povećano kretanje atoma uzrokovano povišenjem temperature, dovodi do promjene u volumenu.
- Promjene kontaktne površine između čestica (obično dolazi do povećanja).
- Smanjenje zaostalog naprezanja.
- Promjena oblika čestica.
- Rekristalizacija.
- Pomicanje čestica povezano s promjenama volumena i poroznosti.
- Deoksidacija i uklanjanje adsorbiranih tekućina i plinova [12].

Sinteriranjem se utječe na promjene fizikalnih i mehaničkih svojstava koje su uzrokovane promjenama veličine i prirode kontakta između čestica praha. Može se reći kako su sve promjene koje se događaju u procesu sinteriranja na neki način vezane uz promjenu kontakta između čestica praha [12].

Najčešće se sinteriranjem želi ostvariti gotovo teoretska gustoća i eliminirati poroznost u strukturi. Pored toga sinterirati se mogu proizvodi kojima je primarni cilj ostvariti određen stupanj poroziteta. Najčešće se porozni dijelovi izrađuju u svrhu filtriranja.

Postupke sinteriranja možemo razdijeliti na dva osnovna postupka (slika 4), a to su:

- a) sinteriranje u krutom stanju (eng. solid state sintering)
- b) sinteriranje u tekućoj fazi (eng. liquid phase sintering)



Slika 4. Prikaz osnovnih postupaka sinteriranja [7]

Sinteriranje u tekućoj fazi odvija se kada se tijekom procesa sinteriranja pojavljuje tekuća faza, dok se kod sinteriranja u krutom stanju ne pojavljuje tekuća faza, već se srašćivanje u potpunosti odvija u čvrstom stanju.

Zbog svojih prednosti kao što su visoka produktivnost i nisko troškovi proizvodnje u praksi je više zastupljeno sinteriranje u tekućoj fazi. Procjene ukazuju na to kako se više od 70% sinteriranih dijelova izrađuje ovim postupkom [9].

#### 4.1. Parametri procesa sinteriranja

Za svaki pojedini metal i njegovu leguru potrebni su specifični parametri sinteriranja. Parametri procesa sinteriranja iznimno su važni i imaju direktan utjecaj na krajnji proizvod.

Parametri koji u procesu sinteriranja imaju najznačajniju ulogu su:

- temperatura sinteriranja
- vrijeme sinteriranja

- atmosfera sinteriranja.

### **Temperatura sinteriranja**

Temperatura sinteriranja utječe na brzinu sinteriranja. Što je temperatura sinteriranja viša to su željene promjene brže. Samim time što su promjene beže, generalno se može zaključiti kako je potrebno kraće vrije sinteriranja [6].

### **Vrijeme sinteriranja**

Stupanj sinteriranja odnosno srašćivanja raste s porastom vremena trajanja sinteriranja. Utjecaj vremena sinteriranja u odnosu na temperaturu je relativno mali. Prilikom sinteriranja trebalo bi se voditi idejom da je potrebno u što kraćem vremenskom periodu postići željena svojstva. Vrijeme sinteriranja se može skratiti primjenom viših temperatura. Međutim, to može utjecati na povećanje troškova održavanja i potrošnje energije pa pritom treba biti oprezan [6].

### **Atmosfera sinteriranja**

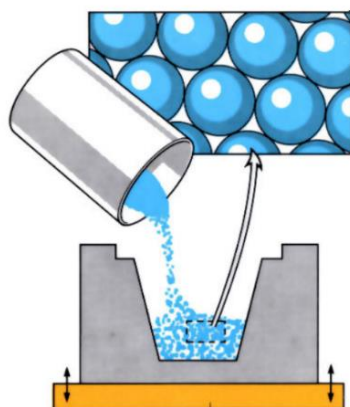
Za kvalitetnu proizvodnju sinteriranih dijelova važna je zaštitna atmosfera. Većina metala pri povišenim temperaturama reagira s elementima iz okolne atmosfere i te reakcije većinom nisu poželjne. U prvom redu tehničke materijale potrebno je zaštititi od pougljičavanja, razugljičavanja i oksidacije. Iz tog razloga se pri sinteriranju koriste razne zaštitne atmosfere poput vakuuma, argona, helija, dušika i tako dalje [6].

## **4.2. Sinteriranje bez kompaktiranja praha**

Kompaktiranje je postupak kojim se uslijed djelovanja vanjskog tlaka, čestice praha želi što više povezati i oblikovati u odgovarajuću formu. Ovim postupkom dolazi do uklanjanja poroziteta između čestica praha i u većini slučajeva to je od iznimne koristi. U slučajevima kada se želi ostvariti veći stupanj poroziteta u strukturi sinteriranog dijela kompaktiranje praha se ne provodi ili se primjenjuju manji pritisci.

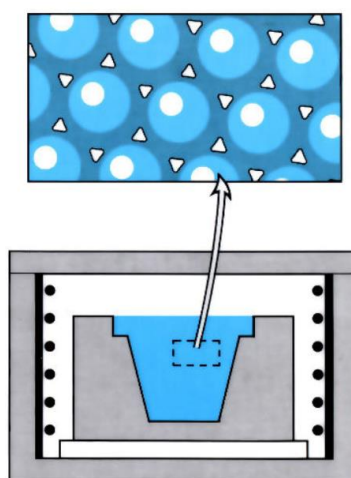
Proizvodnja sinteriranjem bez kompaktiranja u svrhu postizanja željenog stupnja poroziteta uglavnom se koristi za dobivanje visoko poroznih dijelova, kao što su u prvom redu filteri.

U osnovi ovog procesa, metalni se prah nasipava u kalup, a kalup može biti izložen vibracijama kako bi se ostvarilo bolje popunjavanje kalupne šupljine. Upravo je taj dio procesa prikazan slikom 5.



Slika 5. Punjenje kalupa [13]

Nakon što se kalup u potpunosti ispunio nasipanim česticama slijedi sinteriranje na određenoj temperaturi uz odgovarajuću zaštitnu atmosferu. Na slici 6 prikazan je kalup u peći za sinteriranje, te je vidljivo kako je došlo do formiranja veza između čestica praha i pritom se ostvaruje željeni porozitet.



Slika 6. Puni kalup u peći [13]

Oblik i složenost oblika koji se mogu proizvesti ovom metodom uvelike ovise o karakteristikama praha. U tom pogledu iznimno je važan oblik čestica praha. Također prilikom dizajniranja oblika potrebno je voditi računa o skupljanju praha koji se javlja tokom sinteriranja. Skupljanje predstavlja još jedno ograničenje u ovoj proizvodnji [6].

Prilikom dizajniranja kalupa potrebno je obratiti pažnju na materijal od kojeg će se kalup izraditi. Potrebne karakteristike materijala za izradu kalupa koji se koristi pri ovom procesu su:

- Mogućnost lagane strojne obrate i lako oblikovanje u željeni oblik.
- Podnošenje temperature sinteriranja bez deformacija.
- Tijekom sinteriranja ne smije doći do spajanja čestica praha s materijalom kalupa [6].

Za izradu kalupa koriste se uglavnom razni čelici i grafit. Kako se pri sinteriranju bez kompaktiranja ne primjenjuju pritisci na čestice praha, neke metalne prahove nije moguće sinterirati na ovaj način. Ukoliko se na površini čestice nalazi sloj oksida koji se ne može razbiti, on će spriječiti kontakt metala s metalom i na taj način onemogućiti sinteriranje tj. srašćivanje. Iz tog razloga je gotovo nemoguće izvršiti sinteriranje bez kompaktiranja na aluminijskim prahovima [6].

### **4.3. Sinteriranje bakra i njegovih legura**

#### **Bronca**

Bronca kao legura koja se najviše primjenjuje u ovoj grupi metala sinterira se na temperaturama između 815°C i 870°C. Ukupno vrijeme sinteriranja na navedenim temperaturama može se kretati od 15 minuta do 30 minuta. Vrijeme sinteriranja ovisi o temperaturi, pa je tako za niže temperature potrebno duže vrijeme sinteriranja. Osim toga vrijeme sinteriranja ovisi i o željenoj optimalnoj strukturi, ali i o dimenzijskim promjenama. Atmosfera za sinteriranje bronce trebala bi biti zaštitna i reducirajuća kako bi se ostvarilo lakše srašćivanje [8].

#### **Mjedi i novo srebro**

Sinteriranje mjedi i novog srebra izvodi se pod zaštitnom atmosferom. Najviše se primjenjuje zaštitna atmosfera na bazi dušika. Temperature sinteriranja kreću se od 815°C do 925°C i ovise o sastavu legure. Kako bi se izbjeglo stvaranje deformacija i mjehura u kompaktiranom prahu bitno je da temperatura sinteriranja ne prelazi solidus temperaturu legure [8].

#### **Olovne bronce**

Legure bakra i olova sinteriraju se na temperaturama od 550°C do 950°C u zaštitnoj atmosferi. Za ove legure tipično vrijeme sinteriranja iznosi između 30 minuta i 60 minuta.

Sinterirani dijelovi ovih legura obično se dodatno obrađuju u svrhu postizanja željenih dimenzijski točnosti [8].

Tipična vremena i temperature sinteriranja za različite legure dane su tablicom 2. Može se vidjeti razlika u parametrima za legure bakra i legure nikla, te čelika. Legure bakra uglavnom se sinteriraju na mnogo nižim temperaturama od legura na bazi nikla i čelika.

**Tablica 2. Parametri sinteriranja raznih legura [8]**

| Materijal           | Temperatura, °C | Vrijeme, min |
|---------------------|-----------------|--------------|
| <b>Bakar</b>        | 840-900         | 12-45        |
| <b>Bronca</b>       | 760-870         | 10-30        |
| <b>Mjed</b>         | 840-900         | 10-45        |
| <b>Čelik</b>        | 1010-1150       | 30-45        |
| <b>Legure nikla</b> | 1010-1150       | 30-45        |

## 5. FILTERI

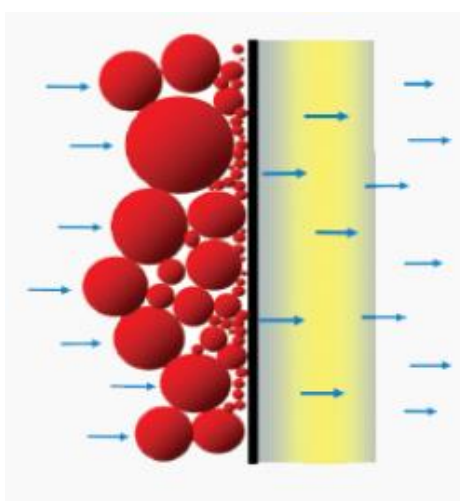
### 5.1. Osnove filtriranja

Poznavanje osnovnih principa procesa filtriranja i samih filtera neophodno je za kvalitetan razvoj proizvoda. Kako bi se osigurao odgovarajući dizajn filtarskog medija, te optimalan i kvalitetan dizajn filtera potrebno je posjedovati određeno znanje iz ove domene.

Kada se govori o filtriranju, mogu se razmotriti dva glavna načina filtracije i to su [14]:

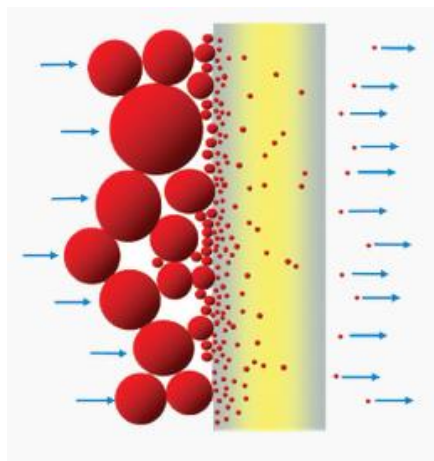
- dubinska filtracija
- površinska filtracija.

Smatra se da je filtrirajući medij porozan ili polupropustan i predstavlja barijeru koja se stavlja u protok medija koji se želi filtrirati. Ukoliko ta barijera ima jako male pore u usporedbi s najmanjim česticom koju je potrebno filtrirati, dolazi do filtracije koja se odvija na površini barijere. U takvom slučaju, bilo koja čestica manja od promjera pora provukla bi se kroz pore barijere, a svaka čestica veća od pora ostala bi na površini. Veće čestice koje ostaju na površini barijere smjestit će se u pore na površini i na taj način ih zatvoriti. Na taj način se površina filtera sve više i više puni i blokira pore, sve dok se protok filtriranog medija ne smanji ispod prihvatljive razine. U tom trenutku filtracija se zaustavlja i pristupa se čišćenju površine barijere. Ovakav mehanizam filtriranja naziva se površinska filtracija (slika 7), jer se u potpunosti djeluje na veličinu čestica i veličinu pora na površini barijere [15].



Slika 7. Površinska filtracija [16]

Drugi mehanizam nazvan dubinsko filtriranje (slika 8) primjenjuje se onda kada se čestice kreću kroz pore barijere sve dok ne dođu do točke gdje je pora pre mala za određenu česticu i u tom trenutku čestica biva zaustavljena u barijeri. I u ovom slučaju dolazi do blokiranja pora i filtriranje se vrši dok medij za filtriranje ne postane previše začepljen. U ovom slučaju eventualno čišćenje barijere odvija se izbacivanjem zarobljenih čestica obrnutim protokom ili se mora baciti i početi koristiti nova [15].



**Slika 8. Dubinska filtracija [16]**

Razumijevanje mogućnosti i sposobnosti filtra da uklanja određene čestice iz struje fluida koji prolazi kroz njega ključno je za uspješan dizajn, a samim time i njegov uspješan rad. Za fluide s niskom razinom onečišćenja u vidu čestica koje je potrebno izdvojiti, filtracija hvatanjem čestica unutar dubine poroznog medija ključna je za postizanje visokog stupnja filtracije. Upravo za ovakvu primjenu savršeno odgovara struktura proizvoda od praškastih materijala dobivena sinteriranjem. Tako dobivena struktura osigurava zavojiti put prepun poroziteta u koji se hvataju čestice. Hvatanje čestica provodi se sve dok se na površini filtera ne nataloži određena količina čestica koja dovodi do smanjenja protoka. Životni vijek sinteriranih metalnih filtera ovisit o njegovom kapacitetu zadržavanja nečistoća i pripadajućem padu protoka. Za fluide s velikom razinom onečišćenja, operativni filtracijski mehanizam postaje sloj nataloženih čestica na površini filtra. Preko samog filtera razvija se sloj nataloženih čestica koje postaju filtracijski sloj, ali dovode i do dodatnog pada protoka. Pad protoka raste kako raste i formirani nataloženi sloj čestica. Jednom kada se postigne razina graničnog protoka, filtriranje se zaustavlja i pristupa se čišćenju filtera. Čišćenje se može provesti propuhivanjem čistim plinom ili nekom od kemijskih metoda pri čemu se razgrađuje



nataloženi sloj. Ukoliko je veličina pora pravilno odabrana u filtrirajućem mediju, nakon čišćenja se propusnost filtera vraćena u prvobitno stanje. Međutim, ako veličina pora nije dobro odabrana može se desiti da prilikom čišćenja čestica zaglavi u strukturi filtera. Kada se to desi, nažalost nije moguće filteru vratiti njegovu prvobitnu propusnost [14].

## 5.2. Sinterirani metalni filteri

Sinterirani metalni filteri izrađuju se od raznih vrsta metalnih prahova, a koji će se prah koristiti ovisi o specifičnosti uvjeta eksploatacije filtera. Najčešće korišteni prašci uključuju bronci, nehrđajuće čelike, nikal i legure na bazi nikla, titan i aluminij. Materijali koji se također koriste, ali rjeđe su: volfram, molibden i tantal. Za proizvodnju filtera mogu se koristiti i plemeniti metali kao što su zlato i srebro [8].

Sinterirani metalni filteri u odnosu na polimerne filtere omogućuju bolju kontrolu veličine pora, oblik i ujednačenost pora su također bolja kod metalnih filtera. Metalni filteri u odnosu na neke druge materijale koji se koriste u izradi filtera kao što su polimeri, razne tkanine i papiri imaju jednu veliku prednost. Prednost metalnih filtera je mogućnost upotrebe istog na povišenim temperaturama. Na slici 9 prikazani su razni oblici metalnih filtera, a mogu se izrađivati od različitih materijala. Veličine pora sinteriranih metalnih filtera mogu se kretati u rasponu od ispod jednog mikrona pa do čak jednog milimetra. Prema tome, barem teoretski, metalnim filterima može se filtrirati širok raspon čestica i to od finih do onih ultra finih. Međutim, u praksi je komercijalni raspon filtriranja ipak malo modificiran [15].



Slika 9. Sinterirani metalni filteri [17]

Poroznost ili udio šupljina u ukopnom volumenu materijala može se kontrolirati primjenom širokog raspona sinteriranih metalnih materijala. Povećanjem poroznosti smanjuje se otpor protjecanju fluida, ali pritom dolazi do smanjenja čvrstoće. Smanjenje čvrstoće filtera iznimno je opasno prilikom velikih brzina strujanja fluida, jer pritom može doći do raznih oštećenja. Iz tog razloga, za razumnu čvrstoću potrebno je ograničiti poroznost. U slučaju metalnih filtera poroznost se može kretati i do 70%, a može biti i malo veća za primjenu u sustavima filtracije gdje su prisutni mali tlakovi. Još jedna velika prednost metalnih filtera u usporedbi s drugim materijalima jeste njihova čvrstoća i krutost. Iz tih razloga metalni filteri su jako pogodni za primjenu u sustavima pod visokim tlakom [15].

Metalni filteri načinjeni sinteriranjem od metalnog praha mogu se podijeliti u dvije kategorije. U prvu kategoriju spadaju filteri proizvedeni slobodnim nasipavanjem praha u kalupe, nakon čega slijedi sinteriranje. Punjenje kalupa za izradu filtera iz ove kategorije vidljivo je na slici 10.



**Slika 10. Izrada filtera bez komprimiranja praha [18]**

Drugu kategoriju čine filteri čiji se prah prvobitno stlačio u kalup, te tako stlačeni prah biva podvrgnut procesu sinteriranja. I za jednu i za drugu kategoriju najpoželjniji oblik čestica praha je sferni. Sferne čestice su se pokazale najboljima iz razloga što se ujednačeno rašire po kalupu i tako pružaju ujednačene veličine pora. Filteri grublje građe proizvode se od čestica promjera oko jednog milimetra. Veličina pora predstavlja oko 15% promjera korištenih čestica praha, u slučaju grublje građe dobile bi se pore veličine 150 mikrona. Takve filtere skupo je proizvesti. Troškovi proizvodnje sinteriranih metalnih filtera smanjuju se kako se smanjuje veličina korištenih čestica praha. Sinterirani metalni filteri po pitanju troška proizvodnje postaju sve isplativiji kako se veličina pora smanjuje. Tako se može reći da su konkurentni za veličinu pora od sto mikrona pa na manje. U drugoj krajnosti, gdje se nalaze

fine čestice praha veličine od 5 do 10 mikrona, javlja se problem visoke cijene proizvodnje takvih prahova. S tog aspekta metalni filteri ipak imaju određena ograničenja [15].

Za opće namjene prikladni su sinterirani brončani filteri i takvi se u najvećem broju primjenjuju. U posebno teškim uvjetima rada poput visokih tlakova, visoke temperature i korozivnih fluida primjenjuju se filteri od sinteriranog nehrđajućeg čelika, titana ili čak volframa.

Bronca i bakar-nikal legure sinteriraju se lako na relativno niskim temperaturama i iz tog razloga se od ovih metala može izraditi čitav niz oblika filtera. Filteri se proizvode tako da ima nakon sinteriranja i vađenja iz kalupa nije potrebna nikakva dodatna ni završna obrada. Kod filtera koji se proizvode prešanjem pa sinteriranjem postoji mogućnost da će nakon sinteriranja biti potrebna neka vrsta dodatne obrade. Sinterirani filteri se mogu obrađivati dodatnom obradom kako bi se postigle željene tolerancije, ali se pritom obrada smije koristiti samo na dijelovima filtera koji ne sudjeluju aktivno u procesu filtracije [15].

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izrađivali su se sinterirani uzorci iz više vrsta praškastih materijala. Kao polazna sirovina korišten je brončani prah, pri čemu se razlikuju vrste praha prema veličini čestica. Provedeno je sinteriranja praha u tri različite atmosfere. Za sinteriranje korištene su: vakuumska peć, obična peć i peć sa zaštitnom atmosferom argona. Nakon sinteriranja dobiveni su uzorci na osnovu koji su doneseni određeni zaključci. Na samom kraju eksperimentalnog dijela provedeno je ispitivanje kojemu je cilj utvrditi vrijednosti savojne čvrstoće prethodno pripremljenih uzoraka.

Eksperimentalni dio rada u cijelosti je proveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 6.1. Prahovi

U izradi uzoraka korištena su tri praha. Korišteni prah je legura bakra i kositra odnosno bronca. Prah je proizveden u Velikoj Britaniji od strane proizvođača Making Metal Powders Ltd.. Na samom početku rada poznate su samo osnovne informacije o prahovima. Znamo da se radi o brončanim prahovima čije čestice imaju oblik sfere, te je poznata veličina čestica. Na slici 11 s lijeve strane prikazan je prah čije su veličine čestica u rasponu od 600  $\mu\text{m}$  do 1000  $\mu\text{m}$ . Kod ovog praha oblik čestica jasno je vidljiv golim okom. Na desnoj strani slike 11 prikazana je druga vrsta praha i u ovom slučaju radi se o brončanom prahu, ali je veličina čestica nešto manja. U ovom prahu čestice se kreću u rasponu od 150  $\mu\text{m}$  do 250  $\mu\text{m}$ .



**Slika 11. Prah s lijeve strane 600/1000 i s desne strane 150/250**

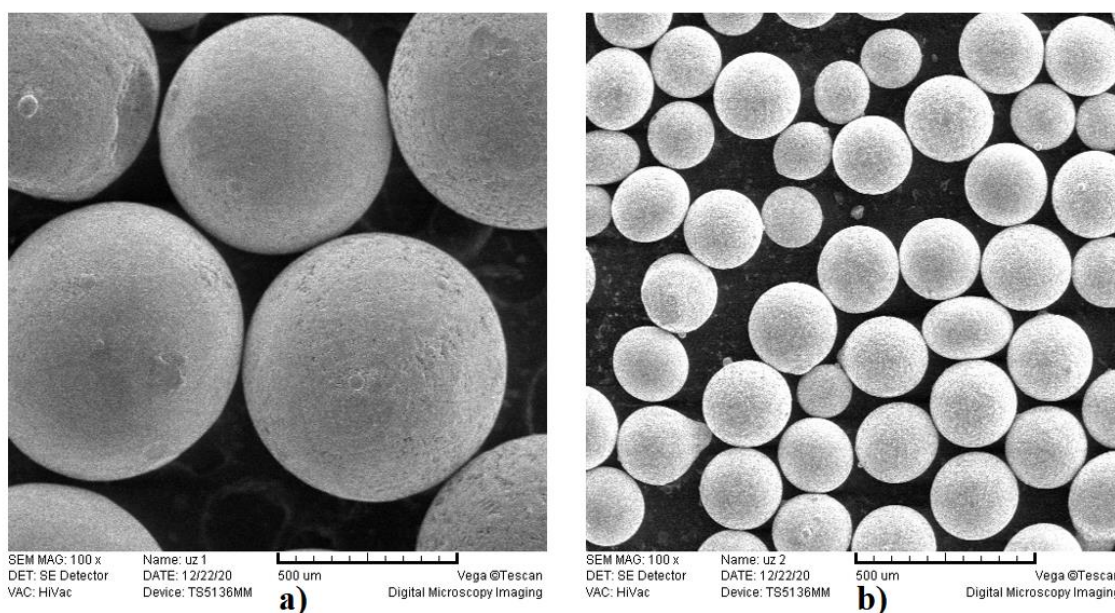
Treća vrsta praha koja je korištena u provođenju eksperimentalnog dijela ovog rada je vidljiv na slici 12. Ovaj prah se može okarakterizirati kao jako fini prah, pri čemu se veličina čestica

u ovom prahu kreće između 53  $\mu\text{m}$  i 90  $\mu\text{m}$ . Kod ovog praha došlo je do pojave grudica što se može vidjeti i na slici. Za razliku od praha s najsitnijim česticama, na drugim prahovima nije došlo do te pojave.



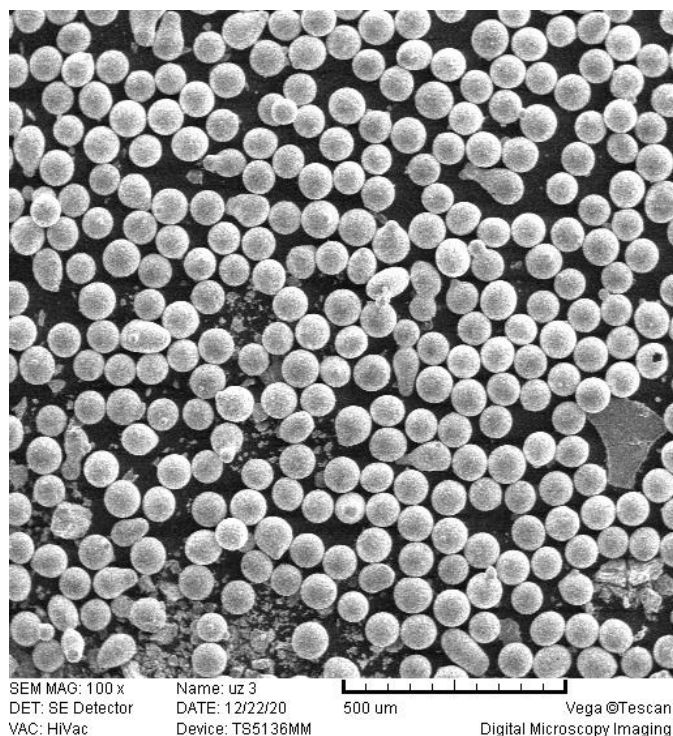
**Slika 12. Prah 53/90**

Kako bi se provjerile informacije da su prahovi sastavljeni od čestica sfernog oblika, te da bi se provjerile veličine čestica napravljena je analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Analiza je provedena u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korišten je skenirajući elektronski mikroskop TESCAN VEGA TS5136LS koji je opremljen SE detektorom. SE detektor omogućuje analizu topografije površine. Slika 13 prikazuje izgled čestica korištenih prahova dobiven analizom na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Lijevo na slici 13 prikazane su čestice praha 600/1000, dok su s desne strane vidljive čestice praha 150/250.



**Slika 13. Izgled čestica praha 600/1000 (a) i prah 150/250 (b)**

Na slici 14 vidljive su čestice praha koji ima deklarirano najmanje čestice. U ovom slučaju radi se o prahu s veličinom čestica od 53  $\mu\text{m}$  do 90  $\mu\text{m}$ .



**Slika 14. Prah 53/92 pod SEM-om**

Analizom na skenirajućem elektronskom mikroskopu potvrđeno je da su čestice praha sfernog oblika. Na prikazanim slika može se utvrditi i veličina određenih čestica. Time je potvrđena i točnost deklaracije u pogledu veličine čestica.

#### **6.1.1. Analiza kemijskog sastava**

Za utvrđivanje kemijskog sastava korištenih prahova upotrijebio se uređaj XRF-Olympus, proizvođača: Innov-X System Inc., model: DS 2000-C. Korišteni uređaj prikazan je slika 15.



**Slika 15. XRF-Olympus uređaj**

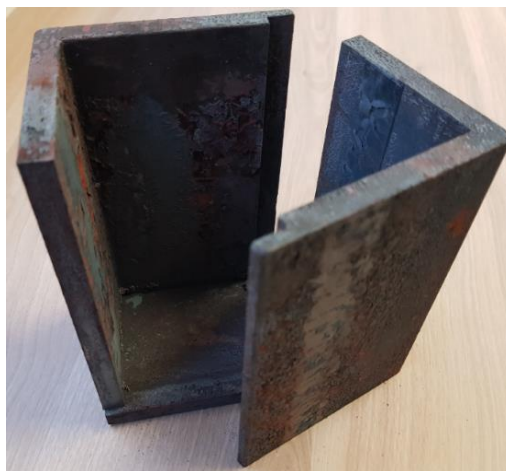
Analiza je provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala. Provedenom analizom utvrđeno je da su prahovi načinjeni od kositrene bronce za koju se generalno koristi naziv „samo“ bronca. Konkretni brojevi i udio pojedinog kemijskog elementa u sastavu praha prikazani su tablicom 3.

**Tablica 3. Kemijski sastav prahova**

| Vrsta praha     | Kemijski elementi | Udio, % | Odstupanje +/- |
|-----------------|-------------------|---------|----------------|
| <b>600/1000</b> | Cu                | 88,33   | 0,24           |
|                 | Sn                | 11,62   | 0,14           |
|                 | Si                | 0,015   | 0,001          |
|                 | P                 | 0,031   | 0,002          |
| <b>150/250</b>  | Cu                | 87,75   | 0,24           |
|                 | Sn                | 12,24   | 0,14           |
|                 | Si                | 0,0109  | 0,0009         |
| <b>53/90</b>    | Cu                | 87,21   | 0,23           |
|                 | Sn                | 12,77   | 0,14           |
|                 | Si                | 0,0113  | 0,0008         |

## 6.2. Kalup

Na slici 16 je prikazan kalup koji je korišten za izradu sinteriranih uzoraka.



**Slika 16. Korišteni kalup**

Prije bilo kakvih daljnjih koraka i rada s kalupom, zbog lošeg stanja površina, bilo je potrebno očistiti kalup. Čišćenje kalupa i skidanja površinskih nečistoća provedeno je ručno uz korištenje brusnih papira. Najprije se grubim brusnim papirom oznake P40 uklonila većina nečistoća. Detaljnije je očišćena unutrašnjost kalupa u koju je predviđeno sipanje praha. Taj dio čišćenja odrađen je finijim brusnim papirom oznake P100. Tako pripremljeni kalup pogodan je za daljnju upotrebu.

### 6.3. Sinteriranje bez zaštitne atmosfere

Nakon što se kalup pripremio pristupilo se procesu sinteriranja. Kao prvi način izrade uzoraka odabrano je sinteriranje bez zaštitne atmosfere. Sinteriranje je provedeno u Laboratoriju za toplinsku obradbu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Sinteriranje je izvršeno u komornoj peći bez zaštitne atmosfere s automatskom regulacijom temperature. Proizvođač korištene peći je „Končar d.o.o.“ i ista je prikazanoj na slici 17.



Slika 17. Komorna peć bez zaštitne atmosfere

Važna karakteristika peći su pripadajuće maksimalne korisne dimenzije. Ove dimenzije za korištenu peć su sljedeće:

- širina: 200 mm
- visina: 150 mm
- dužina: 350 mm.

Pored navedenih dimenzija važan parametar je maksimalna radna temperatura peći koja u ovom slučaju iznosi 1100 °C.

Odabrani su sljedeći parametri sinteriranja:

1. temperatura sinteriranja - 820 °C



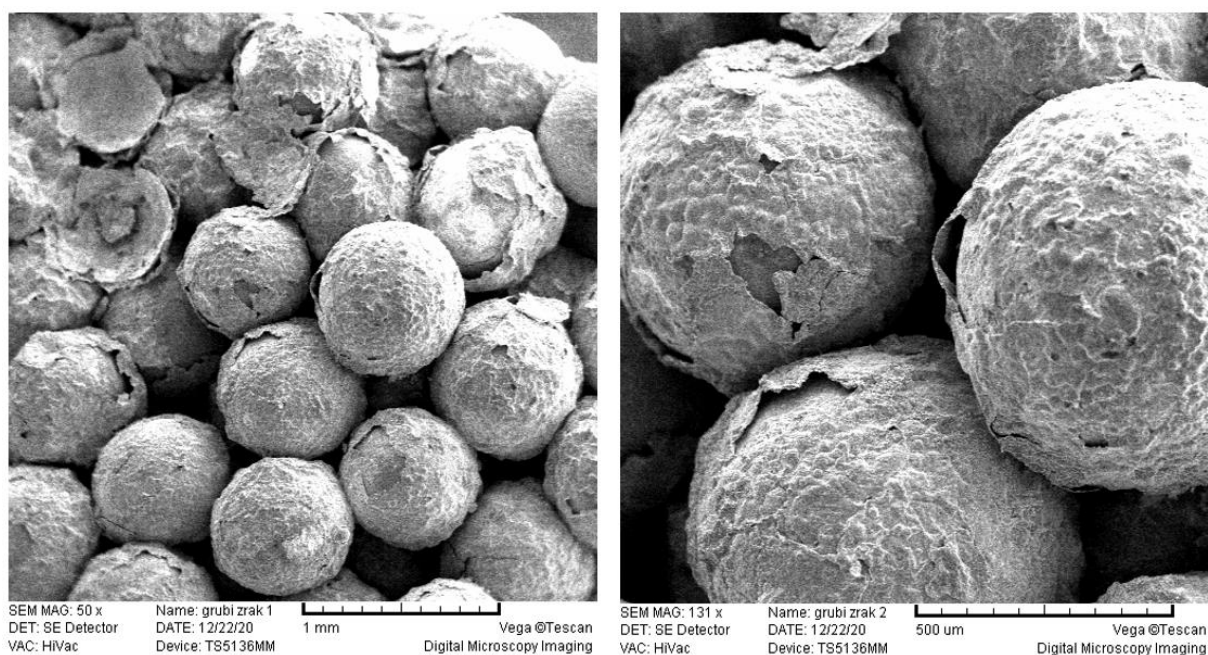
## 2. vrijeme sinteriranja - 45 minuta.

Sam proces proveden je na način da se najprije izvršilo ručno sipanje praha u kalup pri čemu je količina nasipanog praha točno određena. Zatim je tako napunjeni kalup stavljen u hladnu peć. Peć se postupno zagrijavala sve dok nije postignuta željena temperatura od 820°C. Od trenutka kada se postigla željena temperatura mjerilo se potrebno vrijeme. Kalup je na zadanoj temperaturi držan 45 minuta. Nakon tog vremena pristupilo se vađenju kalupa iz peći, te je provedeno postupno hlađenje na zraku. Hlađenje je trajalo u prosjeku dvadeset minuta. Kada se kalup ohladio, isti se otvorio kako bi se lakše pristupilo vađenju sinteriranog uzorka. Prilikom otvaranja kalupa pojavili su se problemi jer se prah nije sinterirao i konsolidirao što je prikazano na slici 18.



**Slika 18. Rezultat sinteriranja bez zaštitne atmosfere**

Na slici 18 je vidljivo kako su čestice koje su prije sinteriranja imale prepoznatljivu bakrenu boju promijenile istu. Glavnina čestica je oksidirala, dok je jako malo kuglica koje su se nalazile na dnu kalupa zadržalo bakrenu boju. Gornji sloj čestica u kalupu uspio je formirati određene veze između sferičnih čestica, a to se može utvrditi analizom nekoliko većih uzoraka izvađenih iz kalupa. Ipak, većina čestica je ostala slobodna što znači da nije došlo do željene reakcije srašćivanja. Slika 19 prikazuju uzorak nakon sinteriranja analiziran na SEM-u. Na ovoj slici se može vidjeti kako je došlo do stvaranja krhkog i tankog oksidnog sloja oko svake pojedine čestice (oksidacije).



**Slika 19. Uzorak sinteriran bez zaštite snimljen SEM-om**

#### **6.4. Pjeskarenje kalupa**

Po završetku sinteriranja bez zaštitne atmosfere na kalupu se ponovo pojavila razna nečistoća. U ovom stadiju provođenja eksperimentalnog dijela odlučeno je kako će se odmah preći na sinteriranje u zaštitnim atmosferama. Atmosfera koja se planira koristiti iduća je vakuum. Da bi se osigurao siguran rad vakuumske peći u nju je potrebno stavljati isključivo čiste dijelove. Kako bi se kalup ovaj put u potpunosti očistio i osigurao rad vakuumske peći na siguran način, odlučeno je da se kalup obradi pjeskarenjem. Pjeskarenje kalupa provedeno je u Laboratoriju za ljevarstvo. Na slici 20 prikazan je kalup nakon pjeskarenja. Usporedbom sa slikom 16 vidljivo je koliko je nečistoća uklonjeno s kalupa.



**Slika 20. Kalup nakon pjeskarenja**

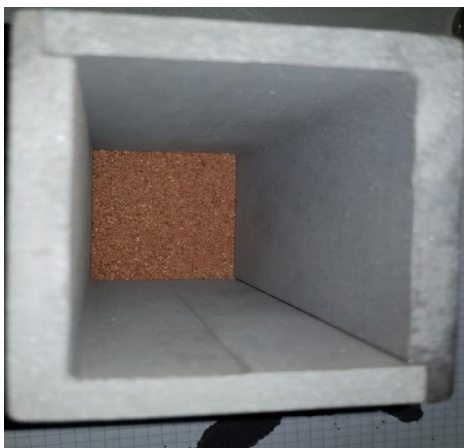
Ovako pripremljen kalup spreman je za upotrebu u vakuumskoj peći i pri tome smo sigurni da se peć neće oštetiti.

### **6.5. Sinteriranje u vakuumu**

Obogaćeni saznanjima i spoznajama koje nam je omogućilo prvo provedeno sinteriranje odlučeno je da se za izradu narednih uzoraka koristi vakuumska peć. U svrhu sinteriranja korištena je vakuumska peć proizvođača „Ipsen GmbH“. Maksimalna radna temperatura ove peći iznosi 1300 °C, a maksimalni vakuum koji može postići je  $10^{-6}$  bara. Korisne dimenzije unutrašnjosti peći su:

- širina: 200 mm
- visina: 150 mm
- dužina: 300 mm.

Prvi uzorak koji je sinteriran ovom metodom je načinjen od praha s najvećim česticama. Prikaz praha nasipanog u kalup i spremnog za sinteriranje vidljiv je na slici 21.



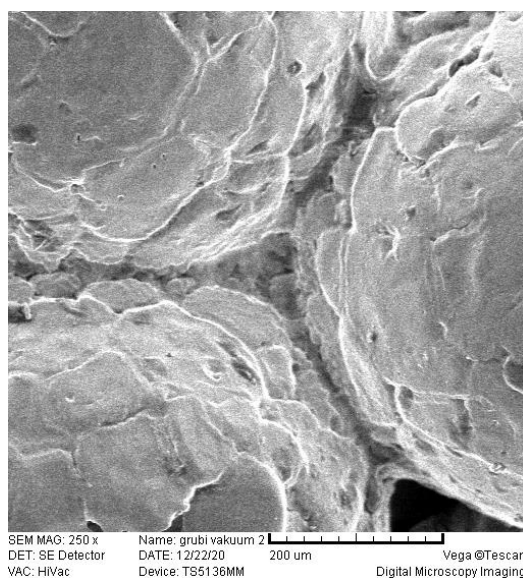
**Slika 21. Napunjeni kalup spreman za sinteriranje u vakuumu**

Temperatura sinteriranja je 820°C, a vrijeme držanja na toj temperaturi iznosi 30 minuta. Sinteriranje je izvršeno pod maksimalnim vakuumom koji peć dozvoljava. Po završetku definiranog vremena zaustavlja se zagrijavanje i pristupa se hlađenju kalupa. Hlađenje se odvija unutar peći pod vakuumom, pri čemu se za hlađenje koristi cirkulacija dušika. Takvo hlađenje traje u prosjeku trideset minuta. Po završetku hlađenja kalup se vadi iz peći, a potom se kalup rastavlja i slijedi vađenje sinteriranog uzorka iz kalupa. Sinterirani uzorak nakon obrade u vakuumu prikazan je slikom 22.



**Slika 22. Prah 600/1000 nakon sinteriranja u vakuumu**

U ovom slučaju vidljivo je da nema promjene boje. Dobiveni uzorak je čvrst i kompaktan, te se lagano vadi iz kalupa. Konstatciju da je sinteriranje uspješno potvrđuje i analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Slika 23 prikazuje spoj između čestica praha koji je nastao procesom sinteriranja.



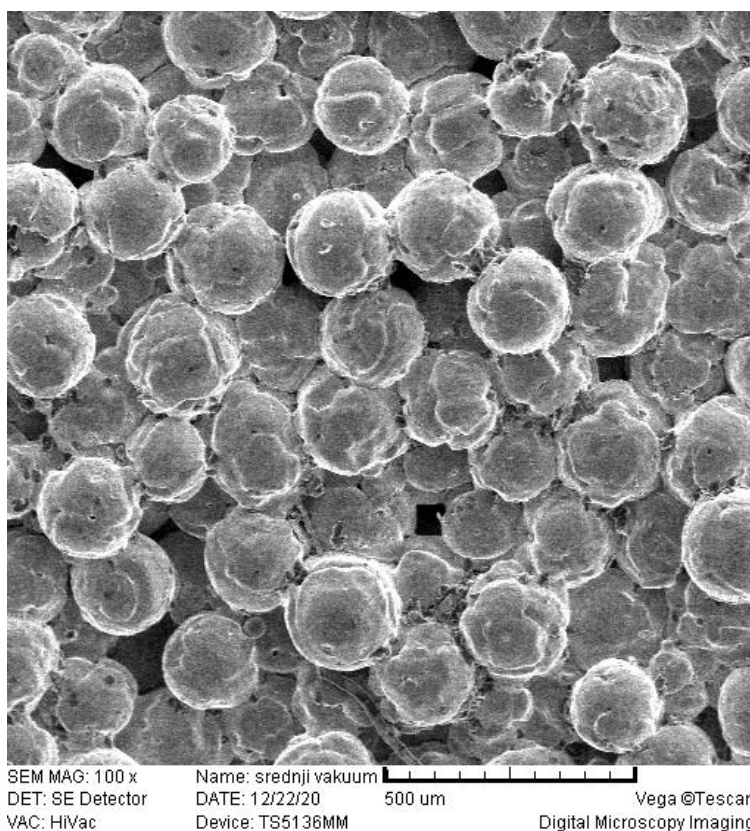
**Slika 23. Spojene čestice praha 600/1000**

Iz sinterirane pločice dobivene na ovaj način u nastavku će se pripremiti uzorci za naredna ispitivanja. Idući na redu za sinteriranje je prah veličine čestica 150/250 mikrona. Ponavlja se postupak kao i s prethodnim prahom. Identični su i parametri sinteriranja. Kao konačni proizvod dobiva se pločica prikazana na slici 24.



**Slika 24. Pločica praha 150/250 sinterirana u vakuumu**

Na slici 25 vidi se kako je došlo do formiranja veza između čestica praha. Ovako dobiveni uzorak činio se iznimno čvrstim.



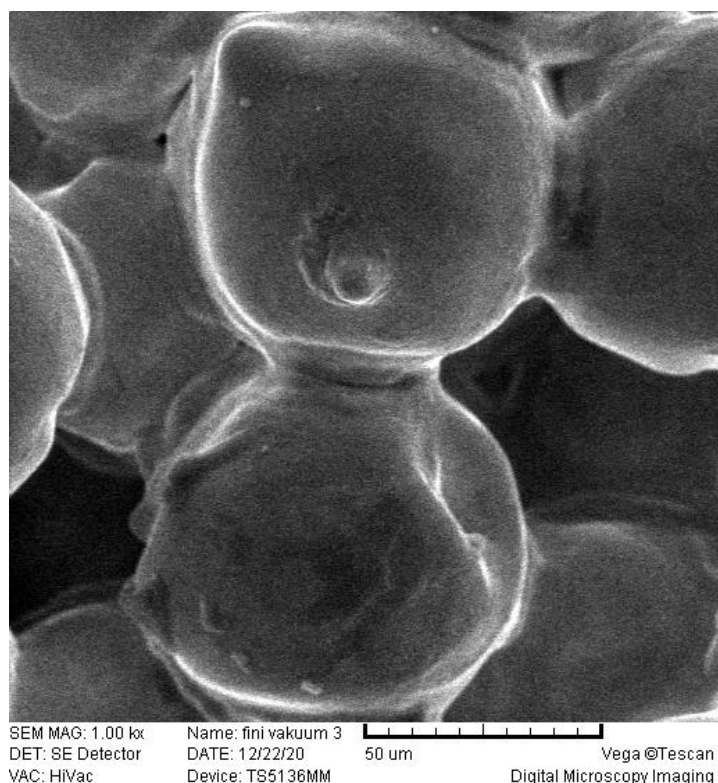
**Slika 25. Čestice praha 150/250 nakon sinteriranja u vakuumu**

Nakon sinteriranja drugog praha u vakuumu i u konačnici dobivenog uzorka, slijedi sinteriranje posljednjeg praha. Prah koji je ostao za zadnje sinteriranje u vakuumu je onaj s najmanjim česticama. Riječ je o prahu s česticama između 53  $\mu\text{m}$  i 90  $\mu\text{m}$ . Nakon što je postignuta željena ravnomjernost nasipanog praha u kalup pristupilo se sinteriranju u vakuumskoj peći. Prilikom ovog postupka parametri sinteriranja ponovno su bili identični onima iz prethodna dva postupka sinteriranja. Uzorak dobiven sinteriranjem treće vrsta praha je prikazan na slici 26.



**Slika 26. Uzorak praha 53/90 nakon sinteriranja u vakuumu**

U procesu sinteriranja došlo je do neparivanja praha. Kompletna polovica kalupa je apsolutno čista i nema ni jedne čestice praha. Sve te čestice praha su se uslijed neparivanja pomakle na jednu stranu kalupa i tamo se taložile. Do neparivanja dolazi kada su u prahu osim čistog metala prisutni određeni aditivi, maziva i veziva koja povišenjem temperature isparuju. Da je do neparivanja došlo govori nam i onečišćenje koje se javilo nakon ovog postupka u ulju vakuumске peći. Kao i u prethodnim slučajevima izvršena je analiza na SEM-u. Slika 27 prikazuje sraštene čestice praha 53/90 nakon sinteriranja.



Slika 27. Čestice praha 53/90 nakon sinteriranja u vakuumu

### 6.6. Sinteriranje u zaštiti argona

Provedeno je sinteriranje u peći koju je proizveo Laboratorij za toplinsku obradbu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u svrhu sinteriranja različitih vrsta materijala u zaštitnoj atmosferi argona. Riječ je o komornoj peći sa zaštitnom atmosferom i s automatskom regulacijom temperature. Maksimalna radna temperatura peći iznosi 1100 °C, maksimalne korisne dimenzije peći su:

- širina: 300 mm
- visina: 250 mm
- dužina: 500 mm.

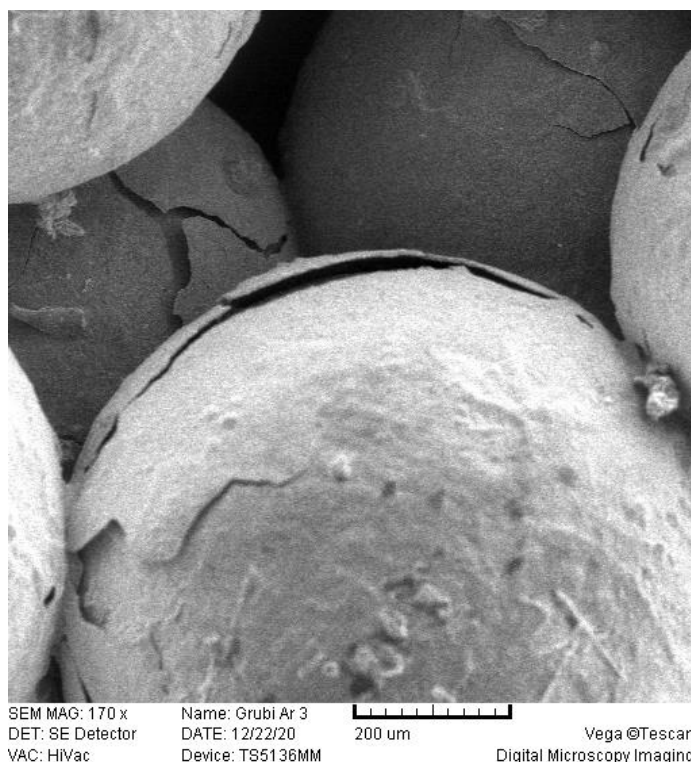
Za sinteriranje na ovaj način odabrana je samo jedna vrsta praha. Odabran je prah s najvećim česticama. Postupak je vrlo sličan onim prethodno provedenima. Na samom početku potrebno je kalup ispuniti željenom količinom praha. Sinteriranje je provedeno na 820°C uz držanje na toj temperaturi u trajanju od 30 minuta. Pri provedbi ovog sinteriranja korišten je zaštitni plin argon 5.0. Nakon što je prošlo potrebno vrijeme držanja, kalup je izvađen iz peći i ostavljen da se ohladi na zraku. Slika 28 prikazuje uzorak nakon hlađenja i otvaranja kalupa.



**Slika 28. Prah 600/1000 nakon sinteriranja u zaštiti argona**

Uzorak je kao i pri sinteriranju bez zaštite atmosfere oksidirao. Vidljivo je kako se oksidirani (crni) sloj formirao oko svake čestice. U ovom slučaju se dobio čvrsti uzorak, dok kod slučaja sinteriranja bez zaštite atmosfere to nije bio slučaj. Ovako dobiven uzorak pokazao je određenu čvrstoću, pa je odlučeno da će se iskoristiti za daljnja ispitivanja.

Ovaj uzorak je također analizirana na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Rezultati te analize prikazani su slikom 29.



**Slika 29. Čestice uzorka sinteriranog u zaštiti argona**

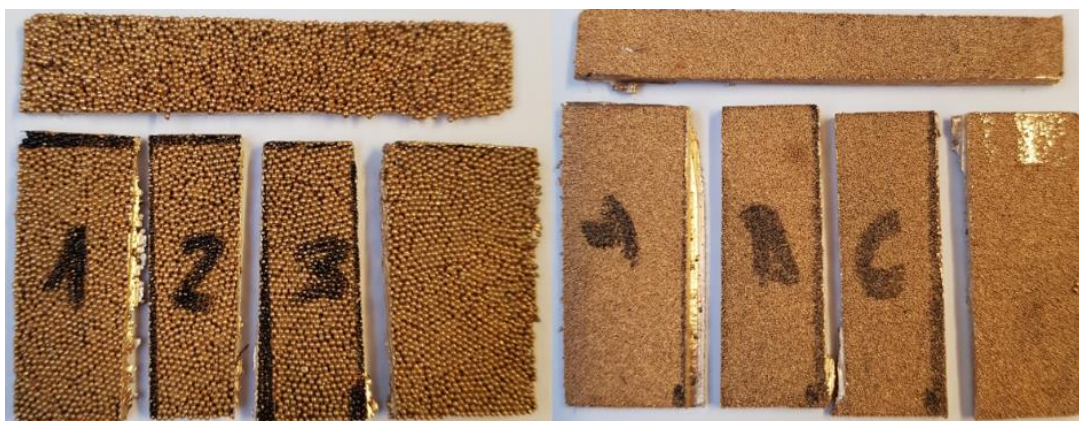


Iz slike se jasno vidi kako je došlo do formiranja određene ljuske oko čestica praha. Ova pojava je slična onoj koja se desila pri sinteriranju bez ikakve zaštite. Ipak na uzorku u zaštiti argona taj sloj izgleda finije, glađe i čini se tanjim.

### 6.7. Priprema uzoraka za daljnja ispitivanja

Kako bi se provelo ispitivanje savijanjem potrebno je iz dobivenih sinteriranih pločica načini uzorke pogodne za to ispitivanje. Iz tog razloga se na pločicama iscrtala shema po kojoj bi se trebali izrezivati manji uzorci koji će biti pogodni za savijanje.

Izrezivanje sinteriranjem u vakuumu dobivenih pločica izvršeno je na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje upotrebom intenzivnog hlađenja kako se ne bi narušila mikrostruktura uzoraka. Dobiveni uzorci nakon rezanja prikazani su na slici 30.



**Slika 30. Izrezani uzorci iz prahova sinteriranih u vakuumu**

Pločica dobiven postupkom sinteriranja u argonu također je izrezana na potrebne dimenzije. Tako izrezani uzorci, spremni za daljnja ispitivanja prikazani su na slici 31.



**Slika 31. Izrezani uzorci iz zaštitne atmosfere argona**

### 6.8. Mjerenje savojne čvrstoće

Iz pločica dobivenih sinteriranjem izvršilo se izrezivanje uzoraka definiranih dimenzija kako bi se moglo provesti ispitivanje savojne čvrstoće. Nakon što su uzorci izrezani bilo je potrebno izmjeriti njihove dimenzije. Izmjerene dimenzije visine i širine uzorka izrezanih iz pločice dobivene sinteriranjem praha 600/1000 u vakuumu prikazane su u tablici 4.

**Tablica 4. Dimenzije uzoraka praha 600/1000 iz vakuuma**

| <b>PRAH 600/1000</b>                 | <b>Uzorak 1</b> | <b>Uzorak 2</b> | <b>Uzorak 3</b> |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Širina, mm</b>                    | 11,14           | 10,5            | 11,3            |
|                                      | 12              | 11,6            | 12,2            |
|                                      | 13,23           | 11,3            | 13,8            |
| <b>Srednja vrijednost širina, mm</b> | <b>12,12</b>    | <b>11,3</b>     | <b>12,4</b>     |
| <b>Visina, mm</b>                    | 3,1             | 2,73            | 3,3             |
|                                      | 2,9             | 3,3             | 3,32            |
|                                      | 3,3             | 3,2             | 2,9             |
| <b>Srednja vrijednost visina, mm</b> | <b>3,1</b>      | <b>3,07</b>     | <b>3,2</b>      |

U svrhu dobivanja što vjernijih rezultata izvršeno je mjerenje dimenzija na tri različita mjesta, te je računat prosjek dobivenih vrijednosti. Mjerenje dimenzija svih uzoraka izvršeno je pomičnom mjerkom. Mjerile su se širina i visina uzoraka iz razloga što se na osnovu tih dimenzija vrši proračun savojne čvrstoće.

Identičan proces mjerenja dimenzija proveden je i na uzorcima dobivenim sinteriranjem praha 150/250 u vakuumu. Dimenzije ovih uzoraka prikazane su tablicom 5.

Tablica 5. Dimenzije uzoraka praha 150/250

| PRAH 150/250                  | Uzorak A    | Uzorak B     | Uzorak C    |
|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| Širina, mm                    | 13,8        | 10,8         | 11,3        |
|                               | 13,6        | 11           | 11,2        |
|                               | 13,7        | 11,3         | 10,8        |
| Srednja vrijednost širina, mm | <b>13,7</b> | <b>11,03</b> | <b>11,4</b> |
| Visina, mm                    | 2,5         | 2,2          | 2,1         |
|                               | 2,4         | 2,12         | 2,13        |
|                               | 2,2         | 1,9          | 1,9         |
| Srednja vrijednost visina, mm | <b>2,36</b> | <b>2,07</b>  | <b>2,04</b> |

Treća skupina uzoraka koja je pripravljena za mjerenje savojne čvrstoće je izrađena sinteriranjem praha 600/1000 u zaštitnoj atmosferi argona. Mjerenje dimenzija navedenih uzoraka provedeno je na isti način kao i prethodna mjerenja. Rezultati mjerenja dimenzija uzoraka sinteriranih u zaštiti argona prikazani su tablicom 6.

Tablica 6. Dimenzije uzoraka sinteriranih u zaštiti argona

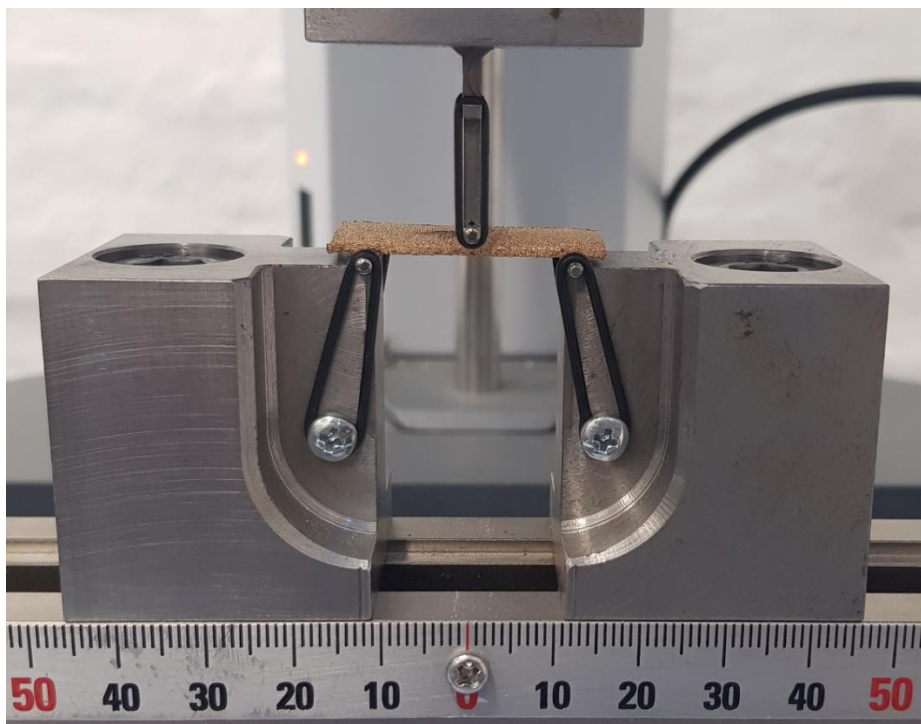
| PRAH 600/1000 Ar              | Uzorak 1    | Uzorak 2    | Uzorak 3    |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Širina, mm                    | 10          | 9,4         | 10,5        |
|                               | 10,2        | 8,9         | 10,1        |
|                               | 10,3        | 9,7         | 9,7         |
| Srednja vrijednost širina, mm | <b>10,1</b> | <b>9,3</b>  | <b>10,1</b> |
| Visina, mm                    | 4,5         | 4,1         | 3,9         |
|                               | 4,7         | 3,9         | 3,7         |
|                               | 5,1         | 3,8         | 3,5         |
| Srednja vrijednost visina, mm | <b>4,76</b> | <b>3,93</b> | <b>3,7</b>  |

Srednje vrijednosti izmjerenih dimenzija uzoraka unose se u računalo uređaja za ispitivanje savojne čvrstoće, te se na osnovu njih vrši proračun čvrstoće. Da bi se ispitala savojna čvrstoća pripremljenih uzoraka potrebno je provesti ispitivanje savijanja u tri točke. Navedeno ispitivanje provedeno je u Centru za aditivne tehnologije. Korišteni uređaj za ispitivanje savijanjem je SHIMADZU AG-X i prikazan je slikom 32.



**Slika 32. Uređaj za ispitivanje SHIMADZU AG-X**

Prije samog ispitivanja na pripremljenim uzorcima izvršena su dva probna ispitivanja. Probna ispitivanja izvršena su na višku dobivenom izrezivanjem. Svrha probe je bila utvrditi optimalne parametra ispitivanja. Probe su provedene brzinom prirasta sile od 10 N/s na oba probna uzorka. Probom je utvrđeno kako je prirast sile neadekvatan. Iz tog razloga brzina prirasta sile značajno je smanjena na 2 N/s. Prikaz ispitivanja savijanjem u tri točke vidi se iz slike 33.



Slika 33. Uzorak spreman za savijanje

#### 6.8.1. Rezultati dobiveni ispitivanjem savojne čvrstoće

Ispitivanje je provedeno pod sljedećim parametrima:

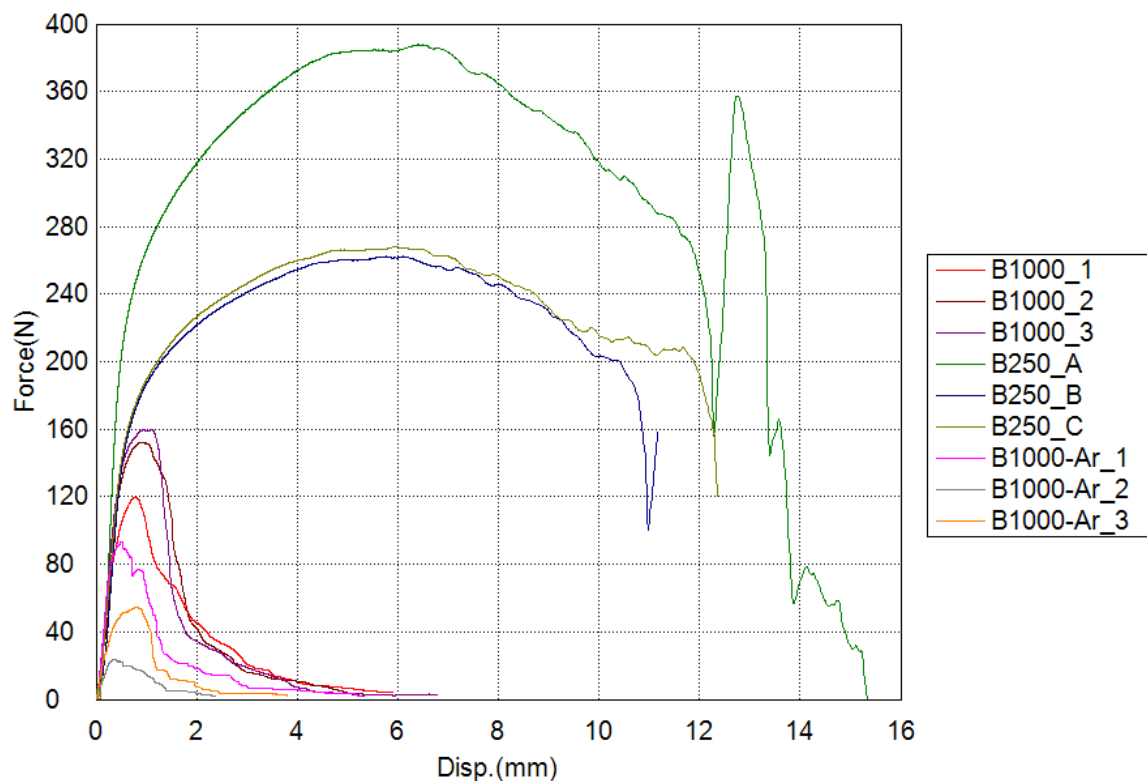
- Razmak između oslonaca: 25 mm
- Brzina prirasta sile: 2 N/s
- Sobna temperatura: 22 °C
- Broj uzoraka: 9
- Oblik uzoraka: pločice.

Vrijednosti dobivene ispitivanjem prikazane su tablicom 7.

Tablica 7. Vrijednosti dobivene ispitivanjem savijanjem

| Naziv uzorka                 | Maksimalna sila, N | Savojna čvrstoća,<br>N/mm <sup>2</sup> | Modul savitljivosti,<br>N/mm <sup>2</sup> |
|------------------------------|--------------------|--|---|
| <b>B1000_1</b>               | 119,893            | 38,6010                                | 3161,34                                   |
| <b>B1000_2</b>               | 152,346            | 54,4617                                | 3596,95                                   |
| <b>B1000_3</b>               | 159,637            | 47,1459                                | 3156,77                                   |
| <b>Srednja vrijednost</b>    | 143,959            | 46,7362                                | 3305,02                                   |
| <b>Standardna devijacija</b> | 21,1579            | 7,93828                                | 252,829                                   |
| <b>Raspon</b>                | 39,7440            | 15,8607                                | 440,180                                   |
|                              |                    |  |   |
| <b>B250_A</b>                | 387,689            | 190,533                                | 9917,00                                   |
| <b>B250_B</b>                | 262,326            | 208,140                                | 11974,1                                   |
| <b>B250_C</b>                | 268,021            | 211,853                                | 15858,8                                   |
| <b>Srednja vrijednost</b>    | 306,012            | 203,509                                | 12583,3                                   |
| <b>Standardna devijacija</b> | 70,7917            | 11,3896                                | 3017,38                                   |
| <b>Raspon</b>                | 125,563            | 21,3200                                | 5941,80                                   |
|                              |                    |  |   |
| <b>B1000-Ar_1</b>            | 93,1549            | 15,6574                                | 1287,72                                   |
| <b>B1000-Ar_2</b>            | 23,7831            | 6,20913                                | 840,774                                   |
| <b>B1000-Ar_3</b>            | 54,4580            | 14,7696                                | 1355,16                                   |
| <b>Srednja vrijednost</b>    | 57,1320            | 12,2120                                | 1161,22                                   |
| <b>Standardna devijacija</b> | 34,7631            | 5,21759                                | 279,554                                   |
| <b>Raspon</b>                | 69,3718            | 9,44827                                | 514,386                                   |

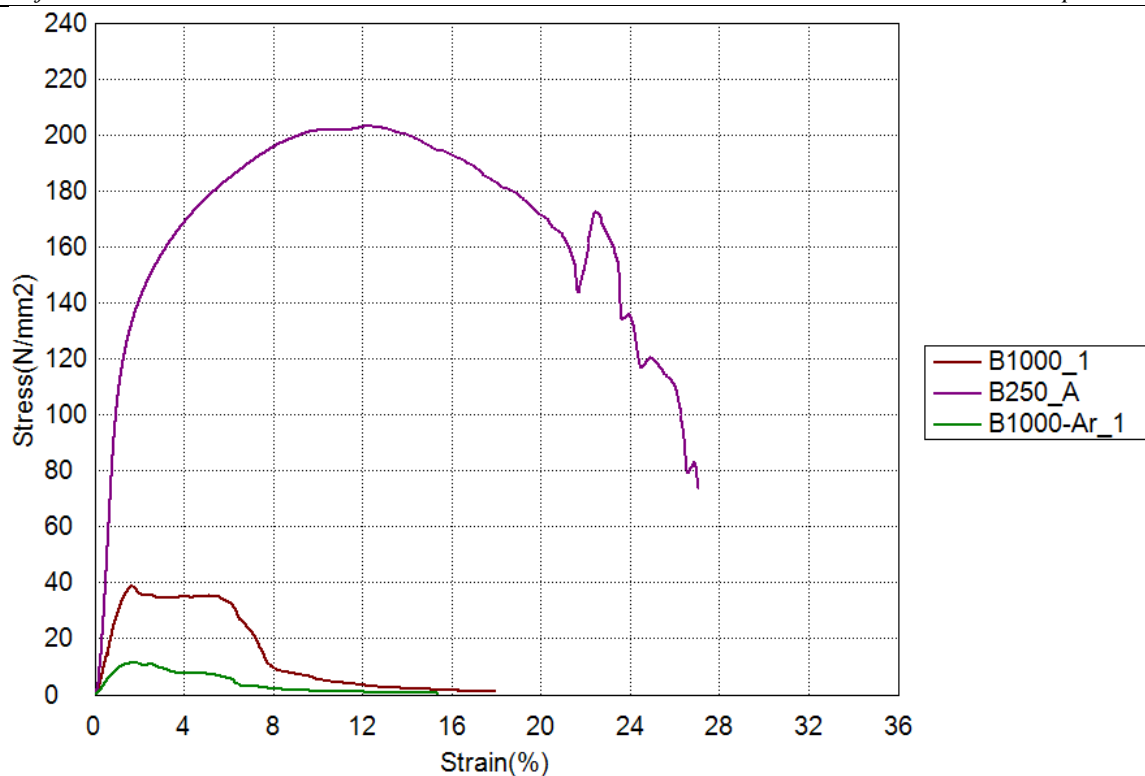
Dobiveni rezultati dodatno su obrađeni kako bi se dobili dijagramski zapisi istih u svrhu bolje vizualizacije i predočenja dobivenih rezultata. Dijagram savojna sila-progib prikazan je na slici 34.



Slika 34. Dijagram savojna sila - progib za sve uzorke

Na dijagramu se jasno vidi kako jedan ispitni uzorak značajno odstupa od ostalih. Taj uzorak je podnio najveću silu savijanja, a riječ je o uzorku načinjenom iz praha 150/250 koji je sinteriran u vakuumu. Pored navedenog, odstupaju još dva uzorka načinjena od istog praha i pod istim uvjetima sinteriranja. Upravo su se uzorci te skupine pokazali kao najbolji po pitanju ovog ispitivanja.

Na slici 35 koja prikazuje dijagram savojno naprezanje – istežanje može se vidjeti koja je skupina uzoraka podnijela najveće savojno naprezanje. Uzorci koji su pokazali da podnose iznimno malo savojno opterećenje na dijagramu sa slike 35 označeni su zelenom bojom. To su uzorci izrađeni od praha 600/1000 i sinterirani u zaštitnoj atmosferi argona. U odnosu na te uzorke, nešto bolja svojstva, pokazali su uzorci načinjeni od praha 600/1000 i sinterirani u vakuumu. Prosjek savojne čvrstoće tih uzoraka iznosi  $46,7 \text{ N/mm}^2$ .



**Slika 35. Dijagram savojno naprezanje - istežanje: krivulje srednje vrijednosti**

Prilikom ispitivanja na svim uzorcima iz praha 150/250 nije došlo do potpunog loma. Ti uzorci su maksimalno savinuti pri čemu je ostvaren progib oko 10 mm, a da pritom nije nastupio potpuni lom. Kod svih ostalih uzoraka došlo je do loma, pri čemu niti jedan uzorak nije pretrpio silu veću od 160 N. Na slici 36 prikazan je uzorak sinteriran u argonu nakon što je došlo do loma.



**Slika 36. Lom ispitnog uzorka**



## 7. ZAKLJUČAK

Ovom radu pristupilo se sa željom da se ispituje i utvrdi mogućnost sinteriranja praha bakrene legure i osnovna mehanička svojstva izrađenih uzoraka. U tu svrhu bilo je potrebno načini uzorke na kojima se mogu provesti ispitivanja. Tokom procesa izrade uzoraka uvidjelo se koliko pojedini parametri procesa proizvodnje sinteriranih metalnih dijelova utječu na konačni proizvod.

Plan ispitivanja je uključivao izradu sinteriranih uzoraka u atmosferi bez ikakve zaštite. Međutim, kod procesa sinteriranja bronce bez zaštitne atmosfere može se zaključiti kako nije nastupilo uspješno spajanje čestica praha u kompaktnu cjelinu. Do nemogućnosti spajanja čestica praha i formiranja čvrste veze došlo je zbog stvaranja sloja bakrovog oksida oko svake pojedine čestice praha. U atmosferi gdje je prisutan kisik bakar zagrijavanjem već na oko 200°C počinje oksidirati. Na dobivenom uzorku došlo je do formiranja sloja crnog bakrovog oksida koji se jasno vidi na snimkama učinjenim pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Tako formirani oksidni sloj predstavlja barijeru koja onemogućuje česticama praha da formiraju čvrstu metalnu vezu u procesu sinteriranja.

U odnosu na sinteriranje bronce bez atmosferske zaštite sinteriranje u vakuumu pokazalo se kao optimalan način izrade sinteriranih dijelova. Primjenom vakuumske peći uspješno su sinterirana dva od tri korištena praha. Korišteni brončani prah s najmanjim česticama pokazao je određene nedostatke prilikom sinteriranju u vakuumu. Iz tog razloga treba pomno obratiti pažnju na deklaraciju samih prahova i utvrditi njihov sastav. Ukoliko u sastavu praha postoje određeni aditivi, maziva i slično treba paziti pri odabiru atmosfere za sinteriranje. Pri sinteriranju nastupilo je isparavanje aditiva u prahu, te je došlo do onečišćenja ulja vakuumske peći.

Ponukani dobivenim rezultatima odlučeno je da se ispita i utjecaj zaštitne atmosfere argona pri sinteriranju praha bronce. Za ovaj proces može se zaključiti kako je došlo do određenog stupnja formiranja metalnih veza između čestica praha. Sam proces zagrijavanja i držanja na definiranoj temperaturi dobro je prošao i omogućio je stvaranje veza među česticama. Problem je u ovom slučaju nastao nakon što se kalup direktno s temperature sinteriranja izvadio iz peći sa zaštitnom atmosferom i na taj način omogućio oksidiranje zagrijanih čestica praha. Kako je prah bio zagrijan na temperaturu 820°C i takvom je omogućen kontakt s kisikom, ponovo je došlo do stvaranja crnog sloja bakrovog oksida. U ovom slučaju metalne

veze su bile uspostavljene, a sloj oksida se počeo formirati nakon njih što je dovelo do krajnjeg proizvoda koji je ipak bio u kompaktnom stanju. Ova pojava se mogla izbjeći na način da se kalup polako hladio u peći uz prisustvo zaštitne atmosfere sve do ispod 200°C i tek tada se vadi i hladi na sobnoj temperaturi. Upravo ovaj način predstavlja možebitna i buduća ispitivanja.

Ispitivanjem savojne čvrstoće utvrđeno je kako uzorci načinjeni iz prah s veličinom čestica između 150 μm i 250 μm i sinteriran u vakuumu najbolje podnose savojno opterećenje. Ovi uzorci podnijeli su sile savijanja koje iznose prosječno 260 N. Za razliku od njih, uzorci sinterirani u vakuumu i načinjeni od praha s česticama veličine od 600 μm do 1000 μm podnijeli su sile u vrijednosti prosječno 150 N. Najlošiji su se u ovom ispitivanju pokazali uzorci sinterirani u zaštitnoj atmosferi argona. Ti uzorci podnijeli su sile tek nešto više od 50 N.

U konačnici se na osnovu svih dobivenih informacija u toku izrade ovog rada može zaključiti da su parametri proizvodnje sinteriranih dijelova od iznimnog značaja za konačna svojstva dijelova koji se proizvode na ovaj način. Prvenstveno izniman utjecaj imaju oblik i veličina čestica praha. Pored toga važni su i uvjeti sinteriranja. Prije svega atmosfera sinteriranja, temperatura, vrijeme, te način i režim hlađenja.

## LITERATURA

- [1] Davis JR, editor: Copper and Copper Alloys. ASM International, 2001.
- [2] Collini L, editor: Copper Alloys-Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes. InTech, 2012.
- [3] Feron D, editor: Corrosion behaviour and protection of copper and aluminium alloys in seawater, Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [4] Filetin T, Kovačiček F, Indof J: Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [5] Francis R: The Corrosion of Copper and Its Alloys. NACE International, 2010.
- [6] Upadhyaya GS: Powder Metallurgy Technology. Cambridge International Science Publishing Ltd., 1998.
- [7] Slokar Lj: Metalurgija praha i sinter materijali, skripta, Metalurški fakultet, Sisak 2015.
- [8] ASM Handbook Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications, ASM International, 1998.
- [9] Aleksandrov Fabijanić T. Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.
- [10] Šnajder Musa M. Razvoj titan-magnezij kompozita za biomedicinsku primjenu [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [11] Everhart JL: Copper and copper alloy powder metallurgy: properties and applications. Princeton, N.J.: Metal Powder Industries Federation
- [12] Tsukerman SA: Powder Metallurgy. Pergamon Press Ltd., 1965.
- [13] <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/pressureless-sintering/>, Pristupljeno: 17.12.2020.
- [14] Rubow KL, Stange LL, Huang B: Advances in filtration technology using sintered metal filters. China International Filtration Exhibition and Conference, 2004.
- [15] Sutherland K: Filters and Filtration Handbook. Elsevier Ltd., 2008.
- [16] <https://www.eif.ae/dust-filtration/dust-filtration-bags/dust-depth-surface-filtration/>, Pristupljeno: 18.12.2020.
- [17] <https://www.broncesval.com/en/bronze/filters-and-sintered-porous-metallic-components-amespore/>, Pristupljeno: 22.12.2020.

---

[18] <https://www.gknpm.com/en/our-businesses/gkn-sinter-metals/porous-metal-filters/>,

Pristupljeno: 29.12.2020.