

Svojstva i primjena berilija i njegovih legura

Prljača, Edin

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:284018>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Edin Prljača

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Edin Prljača

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću, asistentu Tomislavu Rodingeru na pomoći i vremenu koje su mi posvetili prilikom izrade ovog rada.

Posebno se želim zahvaliti svojim roditeljima, obitelji, kolegama i prijateljima koji su vjerovali u mene i bili mi podrška tokom studija.

Edin Prljača



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Edin Prljača** JMBAG: **0035213260**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Svojstva i primjena berilija i njegovih legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Properties and application of beryllium and its alloys**

Opis zadatka:

Berilij i njegove legure su konstrukcijski materijal iz skupine lakih metala koji odlikuju karakteristična mehanička, toplinska, optička i druga svojstva zahvaljujući kojima pronalazi primjenu na specifičnim područjima. U radu je potrebno opisati povijesni razvoj berilija, postupak proizvodnje, dostupne legure berilija i njihova najvažnija fizikalna, nuklearna i optička svojstva, te navesti moguća područja i primjere primjene.

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

Zadatak zadan:

9. 5. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| POPIS KRATICA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. SVOJSTVA BERILIJA | 3 |
| 2.1 Općenito | 3 |
| 2.2 Kemijska svojstva berilija | 3 |
| 2.3 Toplinska i fizikalna svojstva berilija | 4 |
| 2.4 Mehanička svojstva berilija..... | 5 |
| 3. PROIZVODNJA BERILIJA | 6 |
| 3.1 Iskapanje i prerada berilija | 6 |
| 3.2 Proizvodnja berilijevog praha | 7 |
| 3.2.1 Mljevenje u mlinovima s kuglicama i mljevenje trenjem..... | 7 |
| 3.2.2 Udarno mljevenje | 8 |
| 3.2.3 Atomizacija | 8 |
| 3.3 Metode konsolidacije praha | 10 |
| 3.3.1 Vakuumsko vruće prešanje | 10 |
| 3.3.2 Tehnologije prešanja na približno konačan oblik | 11 |
| 4. RAZREDI BERILIJA I NJIHOVE OZNAKE | 12 |
| 4.1 Konstrukcijski razredi berilija..... | 13 |
| 4.2 Instrumentalni razredi berilija | 14 |
| 5. BERILIJEVE LEGURE I KOMPOZITI | 16 |

| | |
|--|----|
| 5.1 Legure bakra s berilijem..... | 16 |
| 5.2 Legure “Lockalloy“..... | 17 |
| 5.3 Legure nikla s berilijem..... | 18 |
| 5.4 Berilidi..... | 18 |
| 5.5 Berilijev oksid (berilija) | 19 |
| 6. PRIMJENA BERILIJA | 21 |
| 6.1 Berilij u nuklearnoj industriji | 21 |
| 6.2 Berilij u svemirskoj industriji..... | 25 |
| 6.2.1 James Webb svemirski teleskop..... | 25 |
| 6.3 Berilij u navigaciji..... | 26 |
| 6.4 Berilij u obrani i zrakoplovstvu..... | 27 |
| 6.4.1 Navigacijski sustavi..... | 27 |
| 6.4.2 Optički sustavi..... | 28 |
| 6.5 Potrošačke primjene berilija..... | 28 |
| 7. UTJECAJ BERILIJA NA ZDRAVLJE | 30 |
| 8. UTJECAJ BERILIJA NA BILJNI I ŽIVOTINJSKI SVIJET | 32 |
| ZAKLJUČAK | 33 |
| LITERATURA..... | 34 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1: Beril [11]..... | 6 |
| Slika 2: Prikaz procesa mljevenja materijala u mlinu s kuglicama [10] | 8 |
| Slika 3: Atomizacija plinom [10] | 9 |
| Slika 4: Vakuumsko vruće prešanje [4] | 10 |
| Slika 5: Promjene čvrstoće i istežljivosti berilija S-200F s porastom temperature [4] | 14 |
| Slika 6: Trbušna peraja vertikalnog stabilizatora lovačkog zrakoplova Lockheed YF-12 [15] | 17 |
| Slika 7: Lomna čvrstoća berilida u usporedbi s drugim materijalima pri temperaturi od 1400°C [6] | 18 |
| Slika 8: Opća usporedba svojstava berilida, vatrostalnih materijala i oksida u svemirskoj tehnici [6] | 19 |
| Slika 9: Berilijeva zrcala u svemirskom teleskopu [12]..... | 21 |
| Slika 10: Berilijev reflektor [13] | 22 |
| Slika 11: Zrcalo James Webb svemirskog teleskopa [14]..... | 26 |
| Slika 12: Inercijalni navigacijski uređaj balističke rakete [1] | 27 |
| Slika 13: Visokotonski zvučnik s membranom od berilija [1]..... | 29 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1: Osnovna svojstva berilija | 3 |
| Tablica 2: Kemijski sastav komercijalnih razreda berilija [5] | 12 |
| Tablica 3: Mehanička svojstva berilija S-65B [5]..... | 13 |
| Tablica 4: Mehanička svojstva instrumentalnih razreda berilija [5] | 15 |
| Tablica 5: Usporedba svojstava berilija sa svojstvima nekih materijala koji se koriste u nuklearnim reaktorima [7]..... | 23 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-------------------------|-------------------|--|
| <i>A</i> | % | istezljivost |
| <i>c</i> | J/kgK | specifični toplinski kapacitet |
| <i>E</i> | N/mm ² | Youngov modul elastičnosti |
| <i>E_v</i> | eV | energija vezivanja elektrona u jezgri |
| <i>HRC</i> | | ispitivanje tvrdoće metodom Rockwell C |
| <i>HV</i> | | ispitivanje tvrdoće metodom Vickers |
| <i>R_e</i> | N/mm ² | granica razvlačenja |
| <i>R_m</i> | N/mm ² | vlačna čvrstoća |
| <i>R_{mys}</i> | N/mm ² | mikro granica razvlačenja |
| <i>R_{p0,2}</i> | N/mm ² | konvencionalna granica razvlačenja |
| <i>α</i> | K ⁻¹ | koeficijent toplinskog rastezanja |
| <i>g_t</i> | ° C | talište materijala |
| <i>g_v</i> | ° C | vrelište materijala |
| <i>λ</i> | W/mK | toplinska vodljivost |
| <i>ν</i> | | Poissonov koeficijent |
| <i>ρ</i> | kg/m ³ | gustoća |

POPIS KRATICA

HCP – heksagonalna gusto složena kristalna rešetka

HIP – vruće izostatsko prešanje

CT – računalna tomografija

SAŽETAK

Tema ovog rada je opisivanje strukture i svojstava berilija i njegovih legura. U uvodu su dati opći podaci vezani uz berilij poput njegovog otkrića i osnovnih svojstava. Nakon uvoda slijedi prikaz njegovih kemijskih, toplinskih, fizikalnih te mehanička svojstva. Opisan je također i postupak dobivanja berilija i njegovih prahova iz minerala berila i bertrandita te postupci konsolidacije prahova u gotove proizvode. Ovisno o području primjene, berilij se može raspodijeliti u konstrukcijske, instrumentalne i optičke razrede. Kako bi se poboljšala svojstva, berilij se dodaje različitim metalima te su u radu opisana svojstva takvih legura. Zbog svojih svojstava i visoke cijene, berilij se najviše primjenjuje u nuklearnoj, svemirskoj i zrakoplovnoj industriji. U posljednjem dijelu rada opisan je utjecaj berilija na zdravlje ljudi koji su u svakodnevnom kontaktu s berilijem te na biljni i životinjski svijet.

Ključne riječi: berilij, laki metali, svemirska i zrakoplovna industrija, nuklearna industrija

SUMMARY

The topic of this paper is to describe the structure and properties of beryllium and its alloys. The introduction provides general information related to beryllium such as its discovery and basic properties. The introduction is followed by a presentation of its chemical, thermal, physical and mechanical properties. The process of obtaining beryllium and its powders from the minerals beryl and bertrandite and the processes of consolidation of powders into finished products are also described. Depending on the area of application, beryllium can be divided into structural, instrumental and optical classes. In order to improve the properties, beryllium is added to various metals and the properties of such alloys are described in the paper. Due to its properties and high price, beryllium is mostly used in the nuclear and aerospace industries. The last part of the paper describes the impact of beryllium on the health of people who are in daily contact with beryllium and on flora and fauna.

Key words: beryllium, light metals, aerospace industry, nuclear industry

1. UVOD

Francuski kemičar Louis-Nicolas Vauquelin otkrio je berilij u mineralu berilu 1798. godine. Od industrijalizacije i primjene berilija u 1940-ima, njegova se primjena postupno proširila od ranih nuklearnih tehnologija i rendgenskih polja do obrane i zrakoplovstva, fizike visokih energija i komercijalne upotrebe. Berilij je također privukao pažnju kao "strateški, kritični" inženjerski materijal.

Berilij je rijedak laki metal s izvanrednim nuklearnim i fizikalnim svojstvima. Ima nisku gustoću (ρ), 1850 kg/m^3 koja je otprilike jednaka magnezijevoj. Berilij ima modul elastičnosti (E) od 287 GPa što je više od četiri puta veća vrijednost modula elastičnosti aluminijskog, a 1,7 puta veća nego kod čelika. Također ima najveću specifičnu krutost (E/ρ), koja je zaslužna za njegovu dobru dimenzijsku stabilnost. Uz to, specifična čvrstoća (R_m/ρ) berilija približno je 1,5 puta veća od čelika, 1,7 puta veća od legure aluminijskog i 2,1 puta od legure magnezijevog. Berilij je laki metal s najvišim talištem ($\vartheta_t = 1287 \text{ }^\circ\text{C}$), koje je približno dvostruko više od aluminijskog i magnezijevog, i ima najveći specifični toplinski kapacitet (c), koji je 2,5 puta veći nego kod aluminijskog. Štoviše, specifični toplinski kapacitet berilija značajno se povećava s porastom temperature do točke taljenja. Berilij ima izvrsnu toplinsku vodljivost (λ), otprilike 4 puta veću od čelika i dobru kao aluminij. Koeficijent toplinskog rastezanja (α) berilija usporediv je s koeficijentom toplinskog rastezanja nehrđajućeg čelika i slitine nikla i kobalta, a oko 50% od aluminijskog. Visoki specifični toplinski kapacitet, dobra toplinska vodljivost i nizak koeficijent toplinskog rastezanja berilija mogu učinkovito smanjiti toplinski gradijent uzrokovan toplinom koju generiraju dijelovi i unutarne naprezanje uzrokovano neujednačenim toplinskim rastezanjem. Ova izvrsna toplinska svojstva odgovorna su i za dobru dimenzijsku stabilnost berilija.

Relativna atomska masa berilija je 9, a energija vezanja neutrona u jezgri (E_v) jednaka je 1/6–1/5 najstabilnije atomske energije. Pri bombardiranju energetskim česticama, poput neutrona, protona i gama zraka, neutroni se lako oslobađaju, što sugerira da se berilij može koristiti kao izvor neutrona. Berilij također ima izvrsna optička svojstva. Polirana površina berilija reflektira 99% infracrvenog svjetla, što ga čini idealnim materijalom za izradu optičkih zrcala. Što se tiče zrakoplovne i svemirske industrije, berilij ima izvrsna svojstva, poput niske

gustoće, dobre dimenzijske stabilnosti, velike čvrstoće i izvrsnih toplinskih svojstava te je poželjan materijal za izradu tijela svemirskih zrcala i nosećih dijelova. Berilij također ima visoku stopu prodiranja rendgenskih zraka koja je 17 puta veća nego kod aluminijske iste debljine. Berilij je prepoznat kao „metalno staklo“ i nezaobilazan je materijal za rendgenske prozore. Opsežna primjena i nezamjenjivost berilija u nuklearnoj industriji i svemirskim znanostima donijele su mu titule „metal nuklearnog doba“ i „svemirski metal“. [1]

2. SVOJSTVA BERILIJA

2.1 Općenito

Berilij ima nisku gustoću, umjereno visoko talište, visok modul elastičnosti te dobru električnu i toplinsku vodljivost. Nelegirani berilij koristi se u zrakoplovstvu i svemirskoj industriji koje zahtijevaju njegovu izvrsnu krutost i nisko toplinsko rastezanje, što osigurava fizičku stabilnost i mala izobličenja tijekom inercijskog ili toplinskog naprezanja. Berilij tvori tanki zaštitni oksid (BeO) koji pruža izvrsnu otpornost na koroziju u vlažnom okruženju na temperaturama do 300 °C. Međutim, prisutnost nečistoća smanjuje otpornost na koroziju pa prisutnost karbida ili klorida može izazvati reakciju s vlažnim zrakom sobne temperature [3]. Osnovna svojstva berilija prikazana su tablicom 1.

Tablica 1: Osnovna svojstva berilija

| Gustoća, ρ, kg/m³ | Talište, ϑ_t, °C | Vrelište, ϑ_v, °C | Tvrdoća, HV | Youngov modul elastičnosti, E, GPa | Specifični toplinski kapacitet, c, J/kgK |
|---|--|---|------------------------|--|--|
| 1850 | 1287 | 2469 | 1670 | 287 | 1925 |

2.2 Kemijska svojstva berilija

Berilij je član druge grupe periodnog sustava elemenata; međutim, ima izrazite razlike u odnosu na ostale elemente u skupini, a te razlike doprinose jedinstvenim svojstvima berilija. Berilij ima 12 poznatih izotopa, a samo je jedan, ⁹Be stabilan. Od radiogenih izotopa berilija najstabilniji su ¹⁰Be, koji ima vrijeme poluraspada od 1,39 milijuna godina, i ⁷Be, koji ima vrijeme poluraspada oko 53 dana; većina ostalih propada u milisekundama. Berilij je najlakši od zemnoalkalijskih elemenata, a njegov nizak atomski broj (4) rezultira visokim prvim i drugim potencijalom ionizacije (9,32, odnosno 18,21 elektronvolta). Kao posljedica toga, berilij može lako ukloniti (ili ionizirati) elektrone s drugih nenabijenih atoma, a zbog svoje male veličine (ionski radijus od oko 0,27 angstrema, Be²⁺ ima jaku tendenciju polarizacije

elektronskih oblaka liganada na koje se veže, tvoreći veze zajedničkih elektrona u spojevima. Berilij se općenito ponaša kao tvrda kiselina, preferirajući stvaranje kompleksa s tvrdim ligandima, poput karbonata, fluorida i hidroksida. Zbog izuzetno male veličine atoma, berilij se ne može lako razdvojiti od ostalih elemenata u kristalima te teži stvaranju različitih minerala. Studije specifikacija i topljivosti minerala berilija na temperaturama do 300 °C za Be²⁺ (njegovo jedino poznato oksidacijsko stanje u vodenoj otopini) sugeriraju da će se berilij najvjerojatnije transportirati u hidrotermalnoj tekućini s niskom temperaturom kao fluorid ili fluorid-karbonatni kompleks. Tijekom širokog raspona temperatura i pH vrijednosti, topljivost berilija kao jednostavnog iona i njegovih proizvoda hidrolize mnogo je manja od 1 ppm u otopini. [2]

2.3 Toplinska i fizikalna svojstva berilija

Berilij ima heksagonalnu gusto složenu (HCP) kristalnu rešetku s teoretskom gustoćom od 1850 kg/m³. Gustoća industrijski dostupnih razreda berilija obično je u rasponu 1820–1850 kg/m³ na sobnoj temperaturi. Osnovne vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti berilija relativno su neosjetljive na način izrade, niske razine nečistoća i u određenoj mjeri zračenje u neutronsom okruženju na temperaturama iznad sobne. Prema istraživanjima, postoji dobro slaganje u podacima o specifičnoj toplini za različite razrede neozračenog berilija s malim udjelom nečistoća (<1% BeO) u temperaturnom rasponu od sobne temperature do 1284 °C. [3]

Toplinska vodljivost ovisi o poroznosti, što uzrokuje velika smanjenja efektivne toplinske vodljivosti materijala. Općenito, korelaciju koja objašnjava smanjenje efektivne toplinske vodljivosti u ovisnosti o poroznosti je teško utvrditi zbog velike razlike u veličini pora, obliku i njihovoj raspodjeli.

Berilij kao metal s HCP rešetkom ima anizotropno toplinsko širenje. Za polikristalni berilij, koeficijent toplinskog širenja (i srednji i trenutni) ovisi o povijesti proizvodnje, uglavnom o mikrostrukturnoj teksturi. Za izotropno sinterirani berilij (kao blokovi, razredi poput S-65, itd.) razlike u toplinskom širenju u različitim smjerovima su male (ne više od nekoliko posto); ali za deformirane (ekstrudirane) razrede, razlike u toplinskom širenju mogu premašiti 15-20%. [3]

2.4 Mehanička svojstva berilija

Mehanička svojstva berilija jako ovise o mnogim proizvodnim parametrima i stoga se razlikuju u skladu s proizvodnim varijablama koje određuju mikrostrukturu (npr. veličina zrna, orijentacija i rezultirajuća tekstura, poroznost itd.) sadržaj i raspodjelu nečistoća (posebno BeO). Plastična deformacija u polikristalnom beriliju može dovesti do zaostalih mikronaprezanja koja se mogu reducirati samo mikropucanjem na niskim temperaturama ili postupcima difuzije koji uključuju povećanje dislokacija na temperaturama iznad 350 °C. Stoga berilij pokazuje veliku temperaturnu ovisnost duktilnosti. Na temperaturama višim od 600 °C, duktilnost ovisi o sadržaju nečistoća, uglavnom aluminija i magnezija, koji imaju tendenciju segregiranja na granicama zrna kao eutektičke faze s malim otapanjem, što narušava duktilnost. Općenito se Poissonov koeficijent (ν) kreće između 0,01 i 0,13 ($0,07 \pm 0,06$) i relativno je neovisan o temperaturi, razini nečistoća, veličini zrna, oštećenjima od zračenja i poroznosti. Također Youngov modul elastičnosti (E), koji je mjera čvrstoće međuatomske veze materijala, relativno je neosjetljiv na način izrade, nečistoće i učinke zračenja. [3]

3. PROIZVODNJA BERILIJA

3.1 Iskapanje i prerada berilija

Postoji više pronađenih minerala koji sadrže berilij, ali samo su beril i bertrandit iskorišteni u komercijalne svrhe. Beril se sulfatnim postupkom najprije tali na 1625 °C i gasi hladnom vodom, da bi mu se time izmijenila kristalna struktura i on postao topljiv u sumpornoj kiselini. Mineral bertrandit je topljiv u sumpornoj kiselini bez procesa koji je potreban kod berila. Produkt oba unosa rude je sirova otopina berilij sulfata (BeSO_4). Pročišćeni berilijev hidroksid ($\text{Be}(\text{OH})_2$) dobiva se postupkom ekstrakcije iz otopine nakon čega slijedi taloženje hidroksida. Za proizvodnju metala berilija, berilijev hidroksid je potrebno otopiti u amonijevom bifluoridu (NH_4HF_2), pročistiti i zatim kristalizirati iz vodene otopine kao amonijev fluoroberilat ($(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$). Ta se sol toplinski razgrađuje na bezvodni berilijev fluorid (BeF_2) i plin amonijev fluorid (NH_4F). Fluorid reagira s magnezijem dajući berilij i magnezijev fluorid (MgF_2). Primarni berilij je u obliku kamenčića veličine zrna graška. Šljunak berilija nastao redukcijom magnezija se vakuumski lijeva kako bi se uklonila zaostala troska i sav višak magnezija. Sadašnja komercijalna praksa je da se berilij rastopi u posudama od magnezijevog oksida, a zatim ulije u grafitne kalupe dajući oko 180 kg berilija. Vakuumski lijevani ingoti sirovina su za proizvodnju berilija u prahu. [5]



Slika 1: Beril [11]

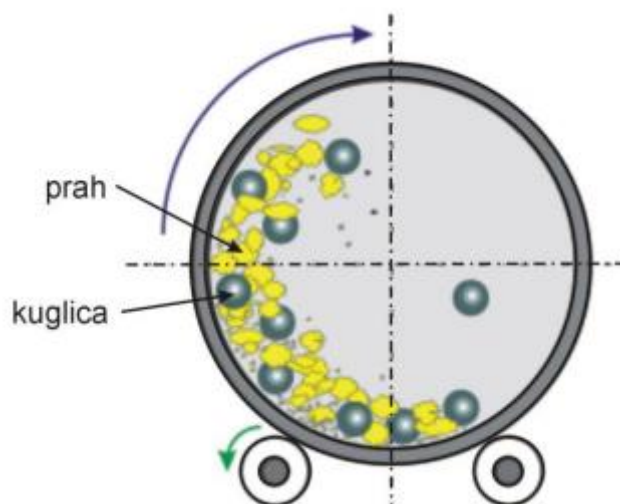
3.2 Proizvodnja berilijevog praha

Iako odljevci nisu korisni kao komercijalni proizvodi zbog inherentnih ograničenja lijevanog berilija, ingot je sasvim prihvatljiv s gledišta kemijskog sastava i pruža polazište za daljnje postupke metalurgije praha. Ingot se obrađuje u strugotinu pomoću strojeva za obradu odvajanjem čestica. Strugotina se melje u prah pomoću jedne od nekoliko mehaničkih metoda: mljevenje u mlinovima s kuglicama, mljevenje trenjem ili udarno brušenje. Također, prah se može dobiti i postupkom atomizacije. Ovim postupcima dobivaju se prašci različitih karakteristika, posebno s obzirom na oblik i veličinu čestica.

3.2.1 *Mljevenje u mlinovima s kuglicama i mljevenje trenjem*

Metoda mljevenja kuglicama koristi se kada se žele dobiti manje čestice i bolja homogenizacija mješavine. Prilikom rotacije bubnja kuglice se podižu na određenu visinu s koje slobodno padaju ili se kotrljaju pritom djelujući udarnim silama i silama trenja na čestice praha. Kuglični mlin je cilindrična komora koja rotira oko svoje osi i djelomično je ispunjena prahom i kuglicama za mljevenje. Kuglice mogu biti izrađene od različitih materijala i pri njihovom odabiru treba uzeti u obzir njihovu gustoću, promjer, tvrdoću i kemijsku kompatibilnost. Kuglice većeg promjera i gustoće postižu bolje rezultate jer djeluju većom silom, dok se kuglice manjeg promjera koriste za mljevenje ultrafinih i nano-prahova. Prilikom mljevenja može doći do kontaminacije praha česticama kuglica koje se troše u procesu. Zato je poželjno koristiti kuglice koje su izrađene od istog materijala kao i prah koji se obrađuje. Kritični čimbenik pri mljevenju je brzina rotacije bubnja. Broj okretaja bubnja treba biti podešen tako da se iskoristi maksimalno udarno djelovanje kuglica. Premala brzina dopušta kuglicama vraćanje na donju stranu mlina, a prevelika neće dopustiti kuglicama da padnu na materijal. [10]

Mljevenje trenjem odvija se u drugačijem mlinu gdje se kuglice zajedno s materijalom pokreću pomoću osovine s lopaticama za miješanje. Okretanjem osovine dolazi do kretanja kuglica i materijala, a mljevenje se odvija djelovanjem udarnih i smičnih sila [10]. Na slici 2 shematski je prikazan proces mljevenja materijala u mlinu s kuglicama.



Slika 2: Prikaz procesa mljevenja materijala u mlinu s kuglicama [10]

3.2.2 Udarno mljevenje

Postupak udarnog mljevenja, koji se oslanja na struju plina velike brzine kako bi ubrzao čestice berilija i odbacio ih prema meti, aktivira lom na dodatnim kristalnim ravninama osim bazne ravnine, što rezultira česticama pravokutnog oblika. Takve čestice pokazuju manju tendenciju preferencijalnog poravnanja tijekom punjenja kalupa prahom, smanjujući time tendenciju za preferiranom orijentacijom u konačnom konsolidiranom proizvodu. Smanjenje preferirane orijentacije dovodi do poboljšane ukupne žilavosti, svojstva posebno osjetljivog na orijentaciju, u svim smjerovima konsolidiranog proizvoda. Iz tog je razloga udarno mljevenje uglavnom zamijenilo mljevenje u mlinovima i mljevenje trenjem kao glavnu tehniku proizvodnje praha. [5]

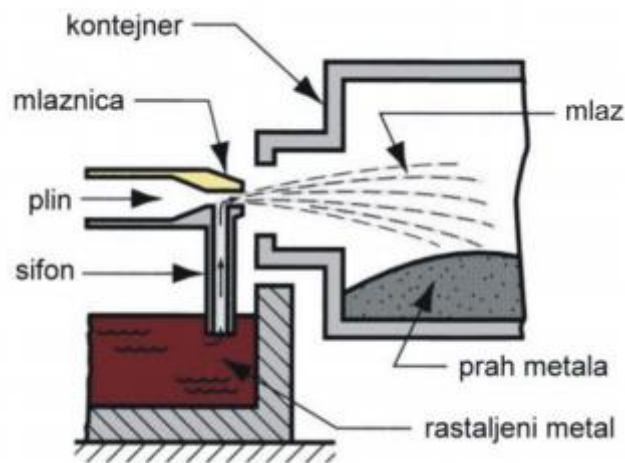
3.2.3 Atomizacija

Atomizacija je najvažnija metoda proizvodnje prahova metala. Ima široku primjenu jer omogućava dobivanje prahova metala visoke čistoće i njome se može modificirati oblik čestica praha. Atomizacija se sastoji od tri stadija, a to su taljenje, atomizacija (dezintegracija taline u kapljice) te skrućivanje i hlađenje. Kod taljenja je najvažnije da li proces zahtijeva upotrebu kalupa te koji se izvor topline koristi. Bitno je odrediti koji kalup i izvor se koristi jer se preko njih može onečistiti prah. Kod skrućivanja i hlađenja najbitnije je kontrolirati brzinu hlađenja.

Danas se prahovi metala i legura proizvode atomizacijom pomoću tri metode:

1. Dvo-fluidna atomizacija koja za raspršivanje koristi vodu i plin
2. Atomizacija u vakuumu
3. Centrifugalna atomizacija

Prilikom atomizacije plinom kao fluid za raspršivanje najčešće se koristi zrak, dušik, argon ili helij. Kod proizvodnje berilija za raspršivanje se primjenjuju isključivo inertni plinovi. U ovom procesu dobivanja prahova, plin udara velikom energijom u mlaz tekućeg metala dezintegrirajući ga u kapljice. Plin se širi oko struje tekućeg metala, uzrokujući smanjenje tlaka i na taj način razara mlaz. Nedostatak ovog procesa je niska energetska učinkovitost i visoka cijena zbog upotrebe inertnih plinova. [10]



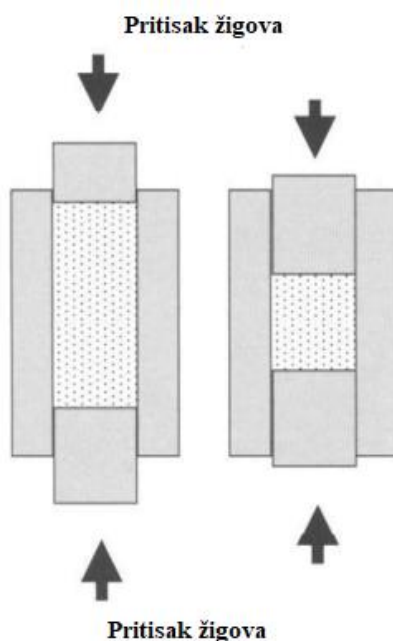
Slika 3: Atomizacija plinom [10]

3.3 Metode konsolidacije praha

Nakon dobivanja prahova, potrebno ih je konsolidirati. Ovaj korak u proizvodnji komponenata od berilija utječe na svojstva konsolidiranog materijala koja su jednako bitna kao i utjecaj veličine i sastava praha. Sve do 80-ih godina prošlog stoljeća najzastupljenija metoda konsolidacije bila je vakuumsko vruće prešanje praha u kružne cilindre. Taj postupak ostaje tehnika s najvećim opsegom proizvodnje, ali tehnologija prešanja na konačni oblik transformira industriju zbog ušteda povezanih s većom iskoristivosti materijala.

3.3.1 Vakuumsko vruće prešanje

Kod vakuumnog vrućeg prešanja prah se pomoću vibracija ubacuje u matricu za prešanje te se matrica stavlja u vakuumsku peć. Hidraulički žigovi umetnu se u šupljinu kalupa, uspostavi se vakuum i započne ciklus zagrijavanja i prešanja. Konsolidacija berilija u prahu provodi se u vakuumu zbog reaktivne prirode praha. Tipično se postižu gustoće veće od 99% teorijske gustoće. Uređaji za vakuumsko vruće prešanje imaju promjer od 200 do 1800 mm. U postupku konsolidacije prahova berilija koriste se tlakovi do 8 MPa i temperature do 1100 °C. Nakon toga se konsolidirani prahovi obrađuju u gotove dijelove. [5]



Slika 4: Vakuumsko vruće prešanje [4]

3.3.2 Tehnologije prešanja na približno konačan oblik

Napretkom tehnologije razvijeni su procesi prešanja na približno konačan oblik koji koriste prednosti različitih kombinacija vrućeg prešanja i hladnog izostatskog prešanja te sinteriranja. Korištenje raznih postupaka omogućuje proizvodnju dijelova koji udovoljavaju svim projektnim zahtjevima uz najniže proizvodne troškove. Postoji nekoliko varijacija procesa prešanja na približno konačni oblik koji se oslanjaju na vruće izostatsko prešanje kako bi se postiglo konačno zgušnjavanje. Najizravniji od njih je postupak izravnog vrućeg izostatskog prešanja, u kojem se prah stavlja u oblikovanu posudu od mekog čelika. Posuda se zatim otpinjuje u vakuumu na oko 600 do 700 °C kako bi se uklonili zrak i plinovi koji se adsorbiraju na površini praha. Zatim se posuda hermetički zatvara i izostatski preša. Nakon konsolidacije vrućim izostatskim prešanjem posuda se uklanja strojnom obradom ili ispiranjem kiselinom. Ako je posuda pravilno oblikovana, oblik dijela od berilija može se koristiti uz minimalnu strojnu ili sekundarnu obradu. Postupak s izravnim vrućim izostatskim prešanjem daje najveću kontrolu nad veličinom zrna, a time i nad svojstvima jer omogućuje konsolidaciju s najvećim temperaturnim područjem.

Druga varijanta postupka prešanja na konačni oblik kombinira hladni izostatski postupak s vrućim izostatskim prešanjem. U ovoj se metodi prah stavlja u elastičnu vrećicu i izostatski preša pomoću tekućine na sobnoj temperaturi da bi se dobio zeleni otpresak teorijske gustoće od oko 80%. Na ovoj razini gustoće nije potrebna posuda za daljnje zgušnjavanje vrućim izostatskim prešanjem jer je poroznost izolirana, a ne međusobno povezana. Zatim se otpresak može sinterirati u vakuumu da bi se postigla gustoća od 98% ili više. Trošak izrade jednokratne posude složenog oblika tako se eliminira, a vrećica koja se koristi umjesto posude ima relativno nisku cijenu i može se ponovno upotrijebiti. Kompromis je što relativno visoka temperatura sinteriranja koja se koristi u metodi s vrećicom rezultira rastom zrna. Međutim, to se donekle nadoknađuje uklanjanjem zaostale poroznosti. Također, postupkom hladnog izostatskog prešanja moguće je dobiti kompleksne oblike, što nije moguće kod jednoosnog prešanja. [5]

4. RAZREDI BERILIJA I NJIHOVE OZNAKE

Razlike među vrstama berilija uglavnom se vrše prema mehaničkim svojstvima, koja se razlikuju ovisno o veličini zrna i orijentaciji uzorka. Fizikalna svojstva uglavnom se ne razlikuju znatno među razredima. S obzirom na to, očito je da razredi berilija moraju identificirati tehnike konsolidacije, kao i karakteristike praha. Razred čistog berilija, za razliku od legura, nominalno je berilij s berilijevim oksidom kao jedinom glavnom komponentom. Iako se inkluzije oksida u mnogim sustavima smatraju nepoželjnim onečišćivačima, oksid u beriliju je poželjan kao sredstvo za pričvršćivanje na granici zrna. Što je prah sitniji, to je veći sadržaj oksida. Kada su potrebne vrlo sitne veličine zrna, sadržaj oksida u prahu djeluje na stabilizaciju veličine zrna tijekom konsolidacije. Sadržaj berilijevog oksida u komercijalnim razredima varira od dopuštenih najviše 0,5% u O-50 (optički razred) do potrebnih najmanje 4,25% u I-400 (instrumentalni razred). Kemijski sastav komercijalno dostupnih razreda berilija prikazan je u tablici 2. [5]

Tablica 2: Kemijski sastav komercijalnih razreda berilija [5]

| Razred berilija | Berilijeve komponente, % | | Maksimalni udio nečistoća, ppm | | | | | |
|------------------------|--------------------------|----------|--------------------------------|------|------|-----|-----|---------------|
| | Be, min | BeO, max | Al | C | Fe | Mg | Si | Ostalo, svaki |
| Konstrukcijski razredi | | | | | | | | |
| S-65B | 99,0 | 0,7 | 600 | 1000 | 800 | 600 | 600 | 400 |
| S-200F, S-200FH | 98,5 | 1,5 | 1000 | 1500 | 1300 | 800 | 600 | 400 |
| Instrumentalni razredi | | | | | | | | |
| I-70A | 99,0 | 0,7 | 700 | 700 | 1000 | 700 | 700 | 400 |
| O-50 | 99,0 | 0,5 | 700 | 700 | 1000 | 700 | 700 | 400 |
| I-220B | 98,0 | 2,2 | 1000 | 1500 | 1500 | 800 | 800 | 400 |
| I-400B | 94,0 | 4,25 min | 1600 | 2500 | 2500 | 800 | 800 | 400 |

4.1 Konstruktivski razredi berilija

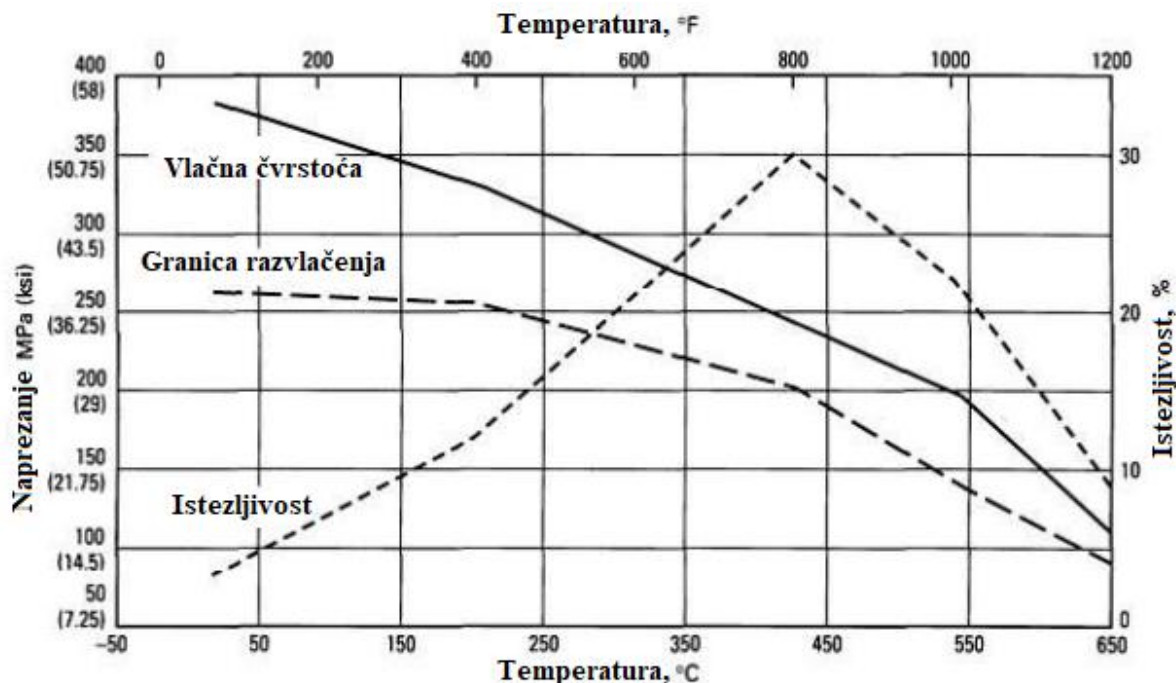
Konstruktivski razredi berilija označeni su prefiksom S u njihovim oznakama. Općenito se ti razredi proizvode kako bi se zadovoljila istezljivost i minimalni zahtjevi čvrstoće. S-200F, prah koji je udarno mljeven najčešće je korišten razred berilija. Ovaj se razred razvio iz S-200E koji je kao ulazni materijal koristio prah dobiven trenjem. Nedavno je na tržištu predstavljen S-200FH, gdje sufiks H označava konsolidaciju putem HIP postupka. Svojstva S-200F uključuju minimalnu istezljivost od 2% u svim smjerovima vakuumski vruće prešanog otpreska, povećanu za 1% u odnosu na prethodnika S-200E. Uz to, S-200F ima nešto višu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću nego S-200E, što odražava opća poboljšanja u tehnikama obrade praha i metodama konsolidacije. Razred S-65 također je prah dobiven postupkom udarnog mljevenja. Ovaj je razred formuliran da zadovolji zahtjeve tolerancije oštećenja za uporabu u Space Shuttle-u. U razredu S-65 žrtvuje se čvrstoća na račun povećanja duktilnosti. Minimalni zahtjev za duktilnošću od 3% postiže se korištenjem kombinacije udarno mljevenog praha i prilagođenih toplinskih postupaka. Toplinski postupci daju poželjnu morfologiju željezo-aluminij-berilij precipitata. Neka mehanička svojstva berilija S-65B prikazana su u tablici 3. [5]

Tablica 3: Mehanička svojstva berilija S-65B [5]

| Razred | Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa | Vlačna čvrstoća, R_m, MPa | Istezljivost, A, % |
|---------------|---|---|---------------------------|
| S-65B | 207 | 290 | 3,0 |

Niske razine željeza i aluminija prisutne su u komercijalnim razredima berilija. Iako se ovi elementi ne mogu na isplativ način eliminirati, mogu se uravnotežiti te se može primijeniti toplinska obrada kako bi se stvorili precipitati $AlFeBe_4$ na granicama zrna. To minimizira željezo u čvrstoj otopini ili u spoju $FeBe_{11}$. Na umjerenim temperaturama, berilij razvija znatnu duktilnost. Na primjer, na 400 °C, istezljivost S-200F premašuje 30%. Granica razvlačenja i vlačna čvrstoća opadaju s porastom temperature, ali čvrstoća i modul elastičnosti

održavaju se zadovoljavajućim na temperaturama do približno 250 do 300 °C. Promjene čvrstoće i istezljivosti berilija S-200F s porastom temperature prikazane su slikom 5. [5]



Slika 5: Promjene čvrstoće i istezljivosti berilija S-200F s porastom temperature [4]

4.2 Instrumentalni razredi berilija

Instrumentalni razredi berilija, koji su označeni prefiksom I, razvijeni su kako bi udovoljili specifičnim potrebama raznih preciznih instrumenata. Takvi se instrumenti obično koriste u sustavima inercijskog navođenja gdje je potrebna visoka geometrijska preciznost i otpornost na plastične deformacije u 1/1000000 razmjerima (ppm). Otpor prema deformacijama na ovoj razini mjeri se mikro granicom razvlačenja. Pored razreda razvijenih da zadovolje potrebe inercijalnih sustava navođenja, razred I-70 razvijen je posebno za optičke komponente u satelitskim sustavima za snimanje. Budući da velika zrcala koja se koriste u svemirskoj optici moraju zadržati preciznu geometriju kroz složene spektre opterećenja, nije napravljena razlika između razreda koji se koriste za optičke instrumente i onih koji se koriste za instrumente za inercijalno navođenje. Međutim, nedavno razvijen razred O-50 za svojstva infracrvene refleksije i malog raspršenja, pokrenuo je upotrebu prefiksa O za označavanje optičkog razreda.

Zahtjevi za svojstva komercijalno dostupnih instrumentalnih razreda berilija dani su u tablici 4. Svojstvo koje razlikuje instrumentalne od konstrukcijskih razreda je mikro granica razvlačenja (R_{mys}). U I-400, duktilnost je praktički zanemarena kako bi se postigle vrijednosti mikro granice razvlačenja od 60 do 70 MPa. Razred I-220 uspostavlja ravnotežu između duktilnosti i mikro granice razvlačenja, sa zahtjevom za istezljivosti od 2 % i mikro granicom razvlačenja od 35 do 40 MPa. Uz spoznaje o odnosu svojstava i obrade praha, sastava i toplinske obrade, trebala bi biti omogućena daljnja poboljšanja svojstava. [5]

Tablica 4: Mehanička svojstva instrumentalnih razreda berilija [5]

| Razred | Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa | Vlačna čvrstoća, R_m, MPa | Istezljivost, A, % | Mikro granica razvlačenja, R_{mys}, MPa |
|---------------|---|---|--|---|
| I-70A | 172 | 240 | 2,0 | - |
| O-50 | 172 | 240 | 2,0 | - |
| I-220B | 275 | 380 | 2,0 | 34,5 |

5. BERILIJEVE LEGURE I KOMPOZITI

Berilij tvori čvrste otopine s bakrom, niklom, kobaltom itd. koje su znatno čvršće od čistog berilija. Dodatak aluminijskog beriliju ne pokazuje topljivost u krutom stanju, ne stvara intermetalne spojeve, već se berilij-aluminijska legura pojavljuje kao smjesa dviju faza i može se smatrati kompozitom. Stvaranje intermetalnih spojeva u sustavu berilij-titanij igra važnu ulogu u nastojanju da se dobiju kompoziti berilija za određene primjene. Utvrđeno je da intermetalni spojevi nastali s vatrootalnim metalima imaju ultra visoku čvrstoću uz malu gustoću.

5.1 Legure bakra s berilijem

Dodatakom do 2% berilija u bakar povećava se njegova čvrstoća, tvrdoća, otpornost na umor i otpornost na koroziju te poboljšava reflektivnost i stabilnost. Uz to, legure bakra i berilija okarakterizirane su kao neiskreći materijali. Neka svojstva ovih legura su: [6]

- visoka električna i toplinska provodljivost,
- jako dobra otpornost na koroziju u usporedbi s čistim bakrom u normalnoj atmosferi i dobra u slanoj vodi,
- odlična livljivost,
- odlična otpornost na udar i umor,
- visoka vlačna čvrstoća (1030 MPa),
- visoka konvencionalna granica razvlačenja (930 MPa),
- visoka dinamička izdržljivost (225 MPa pri 100 milijuna ciklusa),
- tvrdoća po Rockwellu između 40 – 44 HRC.

5.2 Legure “Lockalloy“

Berilijeve “Lockalloy“ legure karakteriziraju niska gustoća, visok modul elastičnosti te velika čvrstoća i ostala svojstva između svojstava aluminijske i berilijeve. “Lockalloy“ legure sadrže 35-40% aluminijske i proizvode se postupkom metalurgije prahe. Koriste se u obliku limova i ekstrudiranih profila za konstrukcijske dijelove u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, a 1960-ih godina razvila ih je tvrtka Lockheed za primjenu u lovačkim zrakoplovima i raketnim sustavima. Neka od svojstava takvih legura su: [6]

- gustoća: 2070 kg/m³,
- modul elastičnosti: 167 GPa,
- vlačna čvrstoća: 290 MPa,
- granica razvlačenja: 220 MPa.

Na slici 6 prikazana je trbušna peraja vertikalnog stabilizatora lovačkog zrakoplova Lockheed YF-12 izrađena od legure “Lockalloy“.



Slika 6: Trbušna peraja vertikalnog stabilizatora lovačkog zrakoplova Lockheed YF-12

[15]

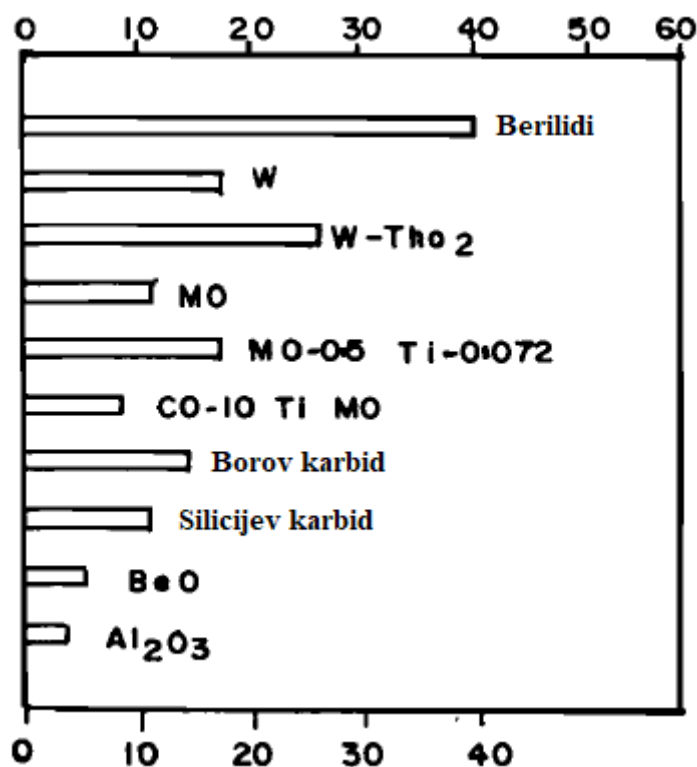
5.3 Legure nikla s berilijem

Dodatak do 2% berilija niklu poboljšava mehanička svojstva, posebno dinamičku čvrstoću pri povišenim temperaturama. Legura pronalazi primjenu u visokotemperaturnim oprugama, električnim kontaktima i konektorima, stezaljkama i držačima ležajeva. Neka svojstva legura nikla i berilija su: [6]

- vlačna čvrstoća: 520 - 715 MPa,
- konvencionalna granica razvlačenja: 220 - 350 MPa,
- tvrdoća po Rockwellu: 70 - 95 HRC,
- dinamička izdržljivost: 490 MPa pri 10 milijuna ciklusa.

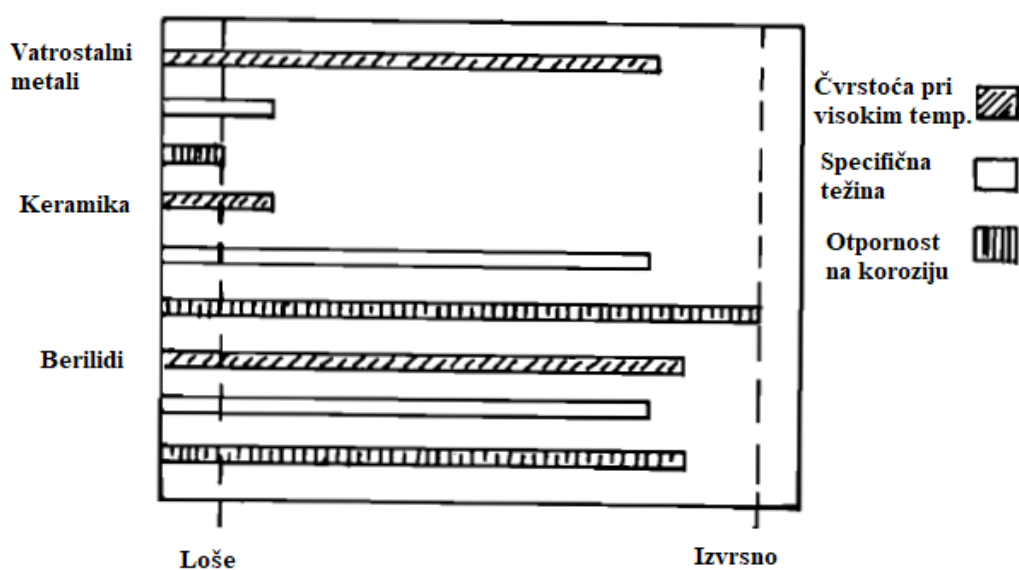
5.4 Berilidi

Berilidi su intermetalni spojevi nastali kombinacijom berilija s vatrostalnim metalom (niobij, tantal, cirkonij itd.). Lomna čvrstoća berilida uspoređena s drugim materijalima prikazana je na slici 7.



Slika 7: Lomna čvrstoća berilida u uspoređbi s drugim materijalima pri temperaturi od 1400°C [6]

Berilidi su vrlo čvrsti i vrlo otporni na oksidaciju pri visokim temperaturama (do 1500 °C), dok im je gustoća gotovo ekvivalentna aluminiju. Berilidi mogu izdržati toplinske i korozivne šokove. Ti se materijali mogu proizvesti u specifične oblike vakuumskim vrućim prešanjem, hladnim prešanjem i sinteriranjem, preciznim lijevanjem, izostatskim prešanjem i toplinskim naštrcavanjem. Berilidi nalaze primjenu u područjima kao što su prednji rubovi zakrilaca, oplata krila i trupa te potporni dijelovi u zrakoplovnim konstrukcijama [6]. Slika 8 prikazuje opću usporedbu svojstava berilida, vatrostalnih metala i oksida za potrebe svemirske tehnike.



Slika 8: Opća usporedba svojstava berilida, vatrostalnih materijala i oksida u svemirskoj tehnici [6]

5.5 Berilijev oksid (berilija)

Sinterirani berilijev oksid (BeO) široko se koristi u mnogim primjenama kao visokotemperaturni vatrostalni i kemijski postojan keramički materijal, koji ima visoku otpornost na toplinske šokove. Berilija je mehanički jaka, lagana, električno nevodljiva i visoko prozirna za mikrovalno zračenje. Ova svojstva čine je idealnim materijalom za radarske kupole i oplata radio-cijevi. Neka od važnih tehničkih svojstava berilije uključuju sljedeće:

- gustoća: 3008 kg/m³,

- toplinska vodljivost: 330 W/mK,
- tlačna čvrstoća: 1470 MPa,
- vlačna čvrstoća: 147 MPa,
- Youngov modul elastičnosti: 284 GPa,
- modul smicanja: 110 Gpa,
- visoka otpornost na toplinske šokove.

Značajne primjene berilije uključuju posude za vakuumsko taljenje, termo-parne omotače, kočione diskove zrakoplova i svjećice. [6]

6. PRIMJENA BERILIJA

Kao poseban funkcionalni i konstrukcijski materijal, berilij se široko primjenjuje u mnogim ključnim područjima zbog izvrsnih nuklearnih, optičkih i fizikalnih svojstava poput niske gustoće, visoke specifične krutosti, visoke specifične čvrstoće i izvrsnih toplinskih svojstava. Berilij ima važnu ulogu u razvoju nuklearne tehnologije, vojnoj industriji i zrakoplovstvu, zbog čega postaje strateški jako bitan inženjerski materijal. Primjer primjene berilijevih zrcala u svemirskom teleskopu prikazan je na slici 9.

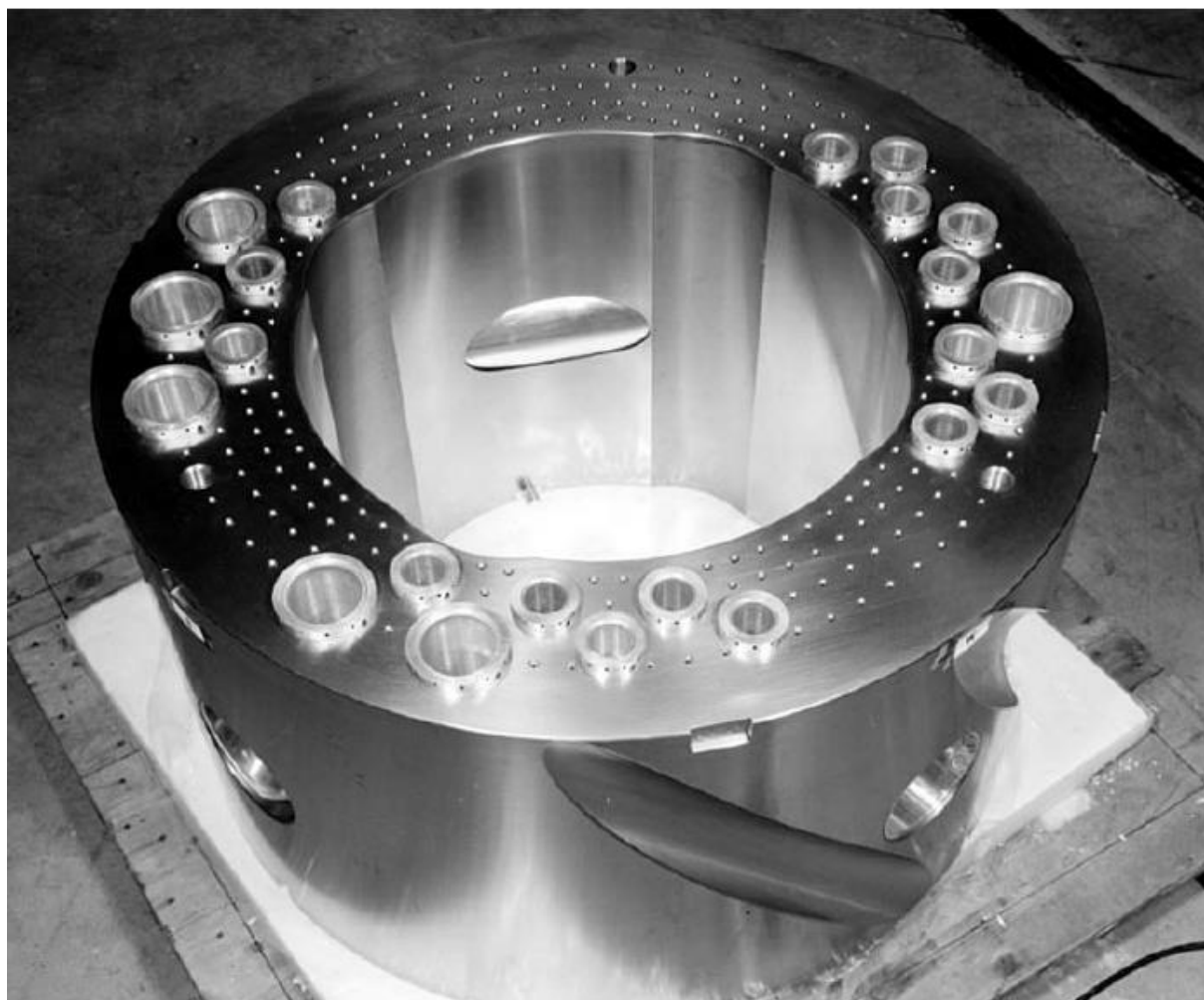


Slika 9: Berilijeva zrcala u svemirskom teleskopu [12]

6.1 Berilij u nuklearnoj industriji

Berilij je lagani metal s jedinstvenim svojstvima koja ga čine vrlo poželjnim za određene nuklearne primjene. Budući da je jedan od najlakših poznatih konstrukcijskih metala, berilij se koristi u širokom spektru nuklearnih i nenuklearnih primjena. Njegova mala masa čini ga

očitim kandidatom za primjenu u zrakoplovnim i svemirskim komponentama, posebno ako su potrebne i određene nuklearne karakteristike. Međutim, relativno mala gustoća berilija nije ono zbog čega je zanimljiv za primjenu u nuklearnim reaktorima. Kombinacija svojstava koja pokazuje berilij rezultira time da je vrlo atraktivan materijal za upotrebu kao neutronske reflektor. Fizički mali nuklearni reaktori, poput testnih / istraživačkih reaktora i onih koji se koriste u svemirskim primjenama, obično imaju neutronske reflektore za učinkovitiju upotrebu neutrona koji nastaju tijekom rada reaktora. Osim što je izvrstan materijal za neutronske reflektore, berilij je i atraktivan materijal kao neutronske moderator, tj. učinkovito smanjuje energiju neutrona. U mnogim izvedbama nuklearnih reaktora poželjno je ne samo zadržati neutrone u jezgri reaktora, već i smanjiti energiju neutrona kako bi oni učinkovitije održavali proces fizije. Berilij je odabran kao materijal za neutronske reflektore u brojnim nuklearnim reaktorima, slika 10. [7]



Slika 10: Berilijev reflektor [13]

Tablica 5 sadrži niz osnovnih svojstava materijala kako bi se vidjela usporedba berilija s nekim materijalima koji se koriste u nuklearnim reaktorima. Od materijala prikazanih u tablici 5, berilij i grafit koriste se na najsličniji način, kao neutronske moderatori i reflektori. Iako grafit ima manji makroskopski presjek apsorpcije toplinskog neutrona od berilija, nije toliko jak (u obliku bloka) kao berilij. Vruće prešani blok berilija prikladniji je za strukturne svrhe od grafitnog bloka, koji je relativno mekan i propustan.

Tablica 5: Usporedba svojstava berilija sa svojstvima nekih materijala koji se koriste u nuklearnim reaktorima [7]

| Svojstva | Berilij | Al legura (6061-O legura) | Grafit (nuklearni razred) | Nehrdajući čelik (X6CrNiNb 18-10) | Legura cirkonija |
|--|---------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------|
| Gustoća, ρ (kg/m ³) – na sobnoj temperaturi | 1850 | 2700 | 1650 – 1750 | 8027 | 6550 |
| Talište, ϑ_t (°C) (temperatura sublimacije za grafit) | 1287 | 580 – 650 | ~3650 | 1425 | 1820 |
| Specifični toplinski kapacitet, c (J/kg·K) – na sobnoj temperaturi | 1925 | 896 | 711 | 502 | 297 |
| Toplinska vodljivost, λ (W/m·K) – na sobnoj temperaturi | 216 | 180 | 156 | 15,6 | 11,6 |
| Koeficijent toplinskog rastezanja, α ($\times 10^{-6}$ K ⁻¹) – na sobnoj temperaturi | 11,4 | 23,6 | 1,8 – 3,6 | 16,5 | 5,2 |

| Svojstva | Berilij | Al legura (6061-O legura) | Grafit (nuklearni razred) | Nehrdajući čelik (X6CrNiNb 18-10) | Legura cirkonija |
|--|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------|
| Modul elastičnosti, E (GPa) - na sobnoj temperaturi | 287 | 70 | 7 – 10 | 200 | 96 |
| Granica razvlačenja, R_e (MPa) – na sobnoj temperaturi | 186 – 262 (vruće prešani blok) | 55 | 57,9 (tlačna) | 207 | 296 |
| Vlačna čvrstoća, R_m (MPa) – na sobnoj temperaturi | 228 - 352 (vruće prešani blok) | 125 | 13,8 | 517 | 490 |
| Atomska masa | 9,01 (Be) | 26,98 (Al) | 12,01 (C) | 55,85 (Fe) | 91,22 (Zr) |

Atomska masa berilija znatno je manja od ostalih materijala. Manja atomska masa (i atomski broj) berilija jedinstveno je svojstvo u odnosu na atomske mase ostalih konstrukcijskih reaktorskih materijala jer uzrokuje veće odbijanje neutrona. Berilij ima jedinstvene karakteristike koje pridonose njegovoj korisnosti u raznim nuklearnim primjenama. Berilij se može uspješno koristiti dulje vrijeme u visoko radijacijskim okruženjima nuklearnih reaktora primjenom analogije toplinskog širenja za predviđanje bubrenja i popratnih naprezanja. Produkti nuklearne reakcije u ozračenom beriliju prepoznaju se i mogu se prilagoditi predviđanjima performansi nuklearnog reaktora. Berilij se pokazao izvrsnim materijalom za "prozore" zbog optimalnog prijenosa rendgenskih i gama zraka niske energije, te se može koristiti u kombinaciji s određenim radioaktivnim materijalima za proizvodnju izvora neutrona. Također je atraktivan kandidat kao materijal za „umnožavanje neutrona“ za buduća postrojenja fuzijskih reaktora. [7]

6.2 Berilij u svemirskoj industriji

Kada su 1974. godine završene prve studije vezane za težinu orbitera, ustanovljeno je da je orbiter imao značajnu prekomjernu težinu. Pokrenuta je projektna studija za zamjenu aluminijskih okvira prozora, toplinski otpornih čeličnih držača prozora i greda vjetrobranskog stakla vakuumski vruće prešanim okvirom od berilija. Konstrukcijski berilij S-65 odabran je za orbiter na temelju čvrstoće, krutosti i duktilnosti. Uz uštedu na težini od 58 kg, ostvareno je i smanjenje troškova u odnosu na trajnost proizvoda. Vanjska pupčana vrata, kroz koja gorivo teče od vanjskog spremnika do glavnog motora svemirske letjelice tijekom lansiranja, također su redizajnirana za primjenu berilija. Ta su vrata otvorena tijekom lansiranja i moraju podnijeti velika aerodinamička i zvučna opterećenja. Visok modul elastičnosti berilija omogućio je obradu vrata u okviru potrebnih uskih tolerancija i izdržavanje velikih savojnih i vibracijskih naprezanja koje se javljaju prilikom lansiranja. [8]

6.2.1 James Webb svemirski teleskop

U prosincu 2021. godine lansiran je James Webb svemirski teleskop te će biti nasljednik teleskopa Hubble koji nakon tridesetogodišnjeg rada polako prestaje s radom. James Webb svemirski teleskop može promatrati galaksije koje su udaljene preko 13 milijardi svjetlosnih godina. Da bi mogao promatrati tako udaljene objekte, teleskop mora imati veliko zrcalo tako da može prikupiti što više svjetla s objekata koji se promatraju. Zrcalo ovog teleskopa ima promjer od 6,5 metara i da je izrađeno metodama poput onog na teleskopu Hubble, zbog težine se ne bi moglo lansirati u svemir, stoga su inženjeri morali napraviti zrcalo koje će biti puno lakše, a u isto vrijeme i visoko izdržljivo. Odlučeno je da će se dijelovi zrcala izraditi od berilija. Berilij je vrlo izdržljiv materijal u odnosu na masu i ima dobru postojanost na različitim temperaturama. Također, dobar je vodič struje i topline te nije magnetičan. Vrsta berilija od kojeg je izrađeno zrcalo pripada skupini O-30. Prah berilija isprešan je u kalupima od nehrđajućeg čelika u ravne ploče. Nakon što su čelični kalupi uklonjeni, dobiveni dijelovi od berilija prerezani su na pola kako bi se dobile dvije zrcalne ploče promjera oko 1,3 metra. Kako bi se poboljšala refleksivnost infracrvenog svjetla, zrcalni segmenti prevučeni su zlatom postupkom taloženja u vakuumu. Cijelo zrcalo teleskopa napravljeno je od 18 takvih heksagonalnih segmenata. [14] Zrcalo James Webb svemirskog teleskopa prikazano je na slici 11.



Slika 11: Zrcalo James Webb svemirskog teleskopa [14]

6.3 Berilij u navigaciji

Berilij je dugo vremena bio standardni materijal za žiroskope i druge precizne navigacijske sustave. Specifični modul elastičnosti berilija minimizira elastični otklon dijelova žiroskopa koji nastaje rotacijom velike brzine. U slučaju navigacije svemirske letjelice, potrebna je visoka toplinska vodljivost, kao i dimenzijska i toplinska stabilnost kako bi se održala kritična poravnanja potrebna za točnu astronautičku navigaciju. Saće od ljepilom spojenog berilija izrađene su da formiraju bazu. Visoki modul elastičnosti omogućio je da se baza izradi ravno i paralelno u uskim tolerancijama. Raspoloživi prostor, kao i težina, onemogućavaju upotrebu bilo kojeg materijala osim berilija u ovoj kritičnoj primjeni. Navigator je postavljen na podnožje s preciznošću od $0,176 \mu\text{m}$ na tri koplanarne površine. Ova preciznost nije moguća kod materijala s niskim modulom, poput aluminija, pri čemu elastični otklon tijekom obrade rezultira značajnim gubicima preciznosti. [8]

6.4 Berilij u obrani i zrakoplovstvu

6.4.1 Navigacijski sustavi

U obrambenom i zrakoplovnom području berilij se uglavnom primjenjuje kao materijal u inercijalnim navigacijskim sustavima, konstrukcijskim komponentama zrakoplova i optičkim sustavima. Inercijalni navigacijski sustavi projektila, podmornica, zrakoplova i raketa smatraju se najsofisticiranijim uređajima, a inercijalni uređaj je glavna komponenta tih sustava. S obzirom na visoku dimenzijsku stabilnost i malu gustoću, berilij je najprikladniji konstrukcijski materijal za ovakve sustave. Među svim poznatim metalima, inercijalni uređaj izrađen od berilija ima najveću točnost navigacije, što može uvelike poboljšati vođenje, točnost navigacije, stabilnost i pouzdanost projektila i podmornica. Primjena berilija u strateškim sustavima raketnog navođenja uvelike je poboljšala performanse inercijalnih uređaja, a berilij je postao ključni materijal za postizanje visoke preciznosti, visoke stabilnosti i visoke pouzdanosti raketnih oružanih sustava. U inercijalnim navigacijskim sustavima borbenih zrakoplova, nosača raketa i civilnog zrakoplovstva, berilijev precizni navigacijski instrumenti također se široko koriste. Na slici 12 prikazan je inercijalni navigacijski uređaj interkontinentalne balističke rakete koji sadrži oko 9 kg berilija. [1]



Slika 12: Inercijalni navigacijski uređaj balističke rakete [1]

6.4.2 Optički sustavi

Primjena berilija u optici produžetak je primjene inercijalnih navigacijskih instrumenata i temelji se na dobroj berilijevoj reflektivnosti infracrvenih zraka. Izvršna toplinska svojstva berilija smanjuju toplinske deformacije uzrokovane toplinskim prijelazima, olakšavajući tako brzo hlađenje optičkog sustava pri niskim temperaturama i rad berilijevog zrcala u relativno velikom temperaturnom rasponu. U usporedbi s drugim materijalima, berilijeva zrcala velike krutosti i dobre dimenzijske stabilnosti omogućuju optičkim sustavima hvatanje jasnijih i preciznijih slika. Početne optičke primjene berilija u obrambenom polju uključivale su sustave noćnog vida i infracrvene kamere, a potom su proširene na infracrvene optičke sustave za rano upozoravanje, izviđanje i komunikacijske satelite, optičke sustave za bespilotne letjelice, sustave za gađanje tenkova i lovačke optičke sustave. U tim je primjenama berilij obično jedini materijal koji udovoljava tražene zahtjeve. [1]

6.5 Potrošačke primjene berilija

S obzirom na njegova izvanredna svojstva, gotovo nikakvu apsorpciju rendgenskih zraka i omogućavanje prodora rendgenskih zraka, kao i dobru krutost, berilij je postao poželjan materijal za medicinske rendgenske prozore i cijevi. Trenutno je u medicinskoj radiografskoj opremi visoke rezolucije berilij jedini materijal za prozore rendgenskih zraka i nijedan materijal ne može ga zamijeniti na odgovarajući način. Koristi se u opremi za računalnu tomografiju (CT) i ultrazvučne dijagnostičke monitore. U industrijskoj analitičkoj opremi berilij se koristi kao materijal za prozore koji se koriste u elektronskoj mikroskopiji, industrijskim detektorima kvarova i analizi fluorescencije rendgenskih zraka.

Zvuk u beriliju putuje brzinom od 12500 m/s, što je približno 2,5 puta brže nego u čeliku, 38 puta brže nego u zraku te 86 puta brže nego u vodi. Berilijeva folija debljine 5 μm dobivena metodom vakuumske prevlačenja primijenjena je za proizvodnju napredne dijafragme zvučnika, koja ne samo da je pokazala veliku brzinu širenja zvuka, već je i proširila gornju granicu visoke frekvencije s izvornih 23 kHz na 40 kHz. Frekvencijski odziv je također bio gladi, a sveobuhvatna procjena kvalitete zvuka bila je bolja nego kod dijamanta i ugljičnih vlakana. Može se predvidjeti da će berilijeva vibracijska membrana u budućnosti imati i šire tržište. Kao što je prikazano na slici 13, visokotonski zvučnici s membranom od berilija

koriste se u vodećim proizvodima audio tehnike. Očekuje se da će berilijeva dijafragma biti traženi proizvod na tržištu. [1]



Slika 13: Visokotonski zvučnik s membranom od berilija [1]

7. UTJECAJ BERILIJA NA ZDRAVLJE

Toksikološki relevantna izloženost beriliju gotovo je isključivo ograničena na radno mjesto. Prije uvođenja poboljšane kontrole emisije i higijenskih mjera u tvornicama berilija, zabilježeno je nekoliko slučajeva kronične bolesti berilija. Do 1966. godine u SAD-u je zabilježeno ukupno 60 slučajeva, neki od njih bili su povezani s kontaktom s radnom odjećom ("djelomično radno" izlaganje) ili s izlaganjem zraku u neposrednoj blizini tvornica berilija. Posljednjih godina nije zabilježen nijedan takav slučaj. [9]

Nedavno je zabilježeno nekoliko slučajeva alergijskog kontaktnog stomatitisa, vjerojatno uzrokovanog zubnim protezama koje sadrže berilij. Tridesetih i četrdesetih godina 20. stoljeća dogodilo se nekoliko stotina slučajeva akutne bolesti berilija, posebno kod radnika u pogonima za vađenje berilija u Njemačkoj, Italiji, SAD-u i bivšem SSSR-u. Udisanje topivih berilijevih soli, posebno fluorida i sulfata, u koncentracijama većim od $100 \mu\text{g Be}/\text{m}^3$, uzrokovalo je akutne simptome kod gotovo svih izloženih radnika, dok na razini od $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nije zabilježen nijedan slučaj. Nakon usvajanja maksimalne koncentracije izloženosti od $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ranih 1950-ih, slučajevi akutne bolesti berilija drastično su smanjeni. Znakovi i simptomi akutne bolesti berilija kreću se od blage upale nosne sluznice i ždrijela do traheo-bronhitisa i teškog kemijskog pneumonitisa. U težim slučajevima bolesnici su umrli od akutnog pneumonitisa, ali u većini slučajeva, nakon prestanka izlaganja, potpuni se oporavak dogodio unutar 1 – 4 tjedna. U nekoliko slučajeva kronična bolest berilija razvila se godinama nakon oporavka od akutnog oblika. [9]

Izravni kontakt s topljivim spojevima berilija uzrokuje kontaktni dermatitis i moguće konjunktivitis. Senzibilizirane osobe reagiraju mnogo brže i na manje količine berilija. Topivi ili netopivi spojevi berilija, uneseni u kožu ili ispod nje, proizvode kronične ulceracije, a granulomi se često pojavljuju nakon nekoliko godina.

Kronična bolest berilija razlikuje se od akutnog oblika latentnim razdobljem u rasponu od nekoliko tjedana do više od 20 godina, dugog je trajanja i progresivne težine. Pojam "kronična bolest berilija" poželjniji je od izraza "berilioza", jer se ova bolest razlikuje od tipične

pneumokonioze. Granulomatozna upala pluća, povezana s dispnejom pri naporu, kašljanjem, bolovima u prsima, gubitkom kilograma, umorom i općom slabošću, najtipičnija je značajka. Može se pojaviti i povećanje desne strane srca s popratnim zatajenjem srca, hepatomegalija, splenomegalija, cijanoza i klabiranje prstiju. Također je utvrđeno da su promjene u serumskim proteinima i funkciji jetre, bubrežnim kamencima i osteosklerozi povezane s kroničnom bolešću berilija. Razvoj kronične bolesti berilija nije jednoličan; u nekim se slučajevima nailazi na spontanu remisiju tjednima ili godinama, praćenu pogoršanjima. U većini slučajeva uočava se progresivna plućna bolest s povećanim rizikom smrti od zatajenja srca ili dišnog sustava. Stope smrtnosti među radnicima berilija variraju od 0,3 do 7,5%. Kod bolesnika s kroničnom bolešću berilija, smrtnost je čak 37%. [9]

Makroskopski, pluća mogu pokazivati difuzne promjene, s raširenim raspršenim malim čvorovima i intersticijskom fibrozom. Mikroskopski postoje granulomi slični sarkoidima s različitim količinama intersticijske upale, koji se obično ne razlikuju od onih u drugim granulomatozama, poput sarkoidoze ili tuberkuloze.

Izvori izloženosti za pacijente s berilijevom bolešću također uključuju proizvodnju legura berilija, strojnu obradu, proizvodnju i istraživanje keramike i proizvodnju energije. Postojeći standardi profesionalne izloženosti možda neće isključiti razvoj kronične bolesti berilija kod senzibiliziranih osoba. U nekoliko epidemioloških studija, kancerogenost berilija ispitana je među radnicima zaposlenima u dva američka pogona za proizvodnju berilija i među kliničkim slučajevima u registru plućnih stanja povezanih s berilijem izvedenim iz ovih postrojenja i drugih zanimanja. U svim studijama zabilježen je značajno povišen rizik od raka pluća. [9]

8. UTJECAJ BERILIJA NA BILJNI I ŽIVOTINJSKI SVIJET

Berilij je toksičan za biljke i životinje, međutim, ekološka su pitanja povezana uglavnom s rudarstvom i proizvodnjom berilija. U nezagađenim područjima koncentracija berilija u biljkama obično je niska (manje od 1 ppm), a tla imaju tendenciju da sadrže berilij u oblicima koji biljkama nisu dostupni. U nekim je slučajevima berilij prisutan u obliku topive soli u tlima (na primjer berilijev klorid [BeCl₂] i berilijev sulfat [BeSO₄]) koji su biološki dostupni i potencijalno mogu uzrokovati toksične učinke, uključujući smanjeni rast i razgradnju nekih proteina i enzima i može inhibirati unos kalcija, magnezija i fosfora. Toksičnost berilija za biljke uočena je za koncentracije u tlu raspona od 10 do 50 ppm. Uz to, dokazano je da tla s koncentracijom berilija između 20 i 40 ppm utječu na preživljavanje i reprodukciju beskralježnjaka u tlu. Također, pokazalo se da je berilij, i udisan i progutan, u laboratorijskim ispitivanjima akutno toksičan za sisavce, ali informacije o toksičnosti za divlje životinje nisu pronađene. Berilij se u riječnom ili jezerskom sedimentu ne koncentrira značajno i samim time se ne nakuplja u hranidbenom lancu. U laboratorijskim ispitivanjima, berilij (primijenjen kao topive soli) je akutno toksičan za razne slatkovodne ribe i vodene buhe, ali toksičnost je varirala u velikoj mjeri ovisno o ispitivanoj vrsti i uvjetima ispitivanja. [2]

ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu opisuje se berilij kao rijedak laki metal s izvrsnim sveobuhvatnim svojstvima koji igra važnu i nezamjenjivu ulogu u nuklearnoj energiji, fizici visokih energija, obrani i zrakoplovstvu te komercijalnim poljima. Uz to, berilij ima ključnu ulogu u razvoju zrakoplovne i svemirske industrije. Zamjene za berilij i njegove legure uključuju titanij i pirolitički grafit, dok se berilijev oksid može zamijeniti aluminijevim nitridom. Ove zamjene često rezultiraju značajnim smanjenjem performansi krajnjeg proizvoda, što je dovelo do trajne upotrebe berilija. Berilij je jako koristan metal s mnogo dobrih svojstava, ali je i toksičan. Zbog svoje toksičnosti trebale bi se provoditi stroge mjere zaštite kako bi se smanjila izloženost radnika u proizvodnji berilija. Poboljšanjem razumijevanja i novim znanstvenim spoznajama o beriliju, u doglednoj budućnosti ovaj će metal imati sve širu primjenu te osloboditi svoj veliki potencijal i odigrati jedinstvenu ulogu.

LITERATURA

- [1] L. Zheng, X. Wang, L. Yue, Y. Xie, B. Wu, J. Zhong, »Progress in the Application of Rare Light Material Beryllium,« *Materials Science Forum*, vol. 977, 261-271, 2020.
- [2] N. Foley, B. Jaskula, N. Piatak, R. Schulte, »Beryllium,« *Chapter E of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, E1-E32, 2017.
- [3] F. Scaffidi-Argentina, G. Longhurst, V. Shestakov, H. Kawamura, »Beryllium R&D for fusion applications,« *Fusion Engineering and Design*, vol. 51-52, 23-41, 2000.
- [4] F. Campbell, »Magnesium and Beryllium,« *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*, 109-118, 2006.
- [5] A. Stonehouse, J. Marder, »Beryllium,« *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Handbook, Volume 2*, 1990.
- [6] B. Naik, N. Sivasubramanian, »Applications of Beryllium and Its Alloys,« *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 13, 243-251, 1994.
- [7] T. Tomberlin, »Beryllium – a unique material in nuclear applications,« *36th International SAMPLE Technical Conference*, 2004.
- [8] J. Marder, »Beryllium - Technology and Applications,« *Journal of Metals*, 45-47, 1984.
- [9] W.H.O., »Environmental health criteria 106 – Beryllium,« *World Health Organisation*, 1990.
- [10] L. Slokar, »Metalurgija praha i sinter materijali-skripta« *Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet*, 2015.
- [11] »<https://www.istockphoto.com/photo/green-beryl-mineral-isolated-on-white-background-gm1013176396-272851492>,« [Mrežno]. dostupno(1.6.2021.)
- [12] »<https://materion.com/products/beryllium-products/beryllium-metal>,« [Mrežno]. dostupno(1.6.2021.)
- [13] »https://www.researchgate.net/figure/Permanent-beryllium-reflector_fig1_255220224,« [Mrežno]. dostupno(30.5.2021.)

- [14] <https://www.jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html>. [Mrežno].
dostupno(14.9.2021.)
- [15] P. W. Merlin, »Design and Development of the Blackbird: Challenges and Lessons Learned«, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009