

U sastavu IMCO formiran je poseban potkomitet za baždarenje, koji je prikupio prijedloge za novi jedinstveni sistem baždarenja i koncem 1961 organizirao u Londonu prošireni međunarodni sastanak na kome su utvrđene osnovne smjernice novog sistema baždarenja. Donošenje i provedba novog sistema baždarenja predstavljat će dugotrajniji proces. Sadašnji su se sistemi baždarenja razvijali i prilagođavali uslovima pomorske privrede i razvoju brodogradnje kroz čitavo stoljeće; veća izmjena baždarenih veličina već izgrađenih brodova poremetila bi mnoge kalkulacije i statistike, a i mnoge konvencije i nacionalni propisi uzimaju određenu tonažu broda kao granicu primjene pojedinih propisa, pa bi i tu izmjena veličine dovela do teškoća u primjeni takvih propisa.

LIT.: *A. van Driel*, Tonnage Measurement, Den Haag 1925. — *W. Thieß*, Vermessung der Seeschiffe, Hamburg 1925. — Measurement of vessels. Regulations interpreting laws relating to the admittance of vessels together with the said laws of the United States, the Suez-Canal Regulations and the Panama-Canal Rules, Washington 1925. — Swedish Tonnage Measurement Rules, Stockholm 1931. — Instructions as to the tonnage measurement of ships. Issued by the Board of Trade, London 1937. — Voorschriften voor de meting van zeeschepen, Meetbrievenwet 1948 en uitvoeringsvoorschriften (Verdrag van Oslo 1947), 's Gravenhage 1948. — *O. Albiach*, Cours d'architecture navale, Tome IX, Paris 1952. — *E. Eisenhardt*, Die Vermessung der Seeschiffe, Hamburg 1962. A. L.

BERILIJ (berilijum, beryllium, Be), kemijski element r. br. 4, at. tež. 9,013, prvi u grupi IIa periodnog sistema elementata (zemnoalkalijskih metala: Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra). U Zemljinoj kori nalazi se u koncentraciji neočekivano niskoj za element tako male atomske težine (0,005%, otprilike kao Cs, Sc, As). Metalni berilij danas ima znatnu tehničku važnost kao sastojina čvrstih, tvrdih i kemijski otpornih legura, za prozore na rendgenskim cijevima i kao reflektor i moderator elektrona u nuklearnoj tehnici; berilijev oksid ima ista za nuklearnu tehniku važna svojstva, osim toga je visoko vatrostalan, dobar je vodič topline i izolator za visokofrekventnu struju, a kemijski je otporan; berilijeve soli se u manjim količinama upotrebljavaju za različite svrhe, među ostalim u proizvodnji svjetleće mase za luminescentnu rasvjetu.

Dragi kamen smaragd, čisti oblik berilijeva alumosilikata $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, spominje se već u djelima Starog vijeka i ranih stoljeća naše ere. Kasnije se spominje kao dragi kamen i drugi oblik istog alumosilikata, *beril*, čiji su se prozirni i slabo obojeni kristali u Srednjem vijeku upotrebljavali kao stakla za neku vrstu naočala (njemački naziv za naočale, 'Brille', potječe od imena berila). Sastav ovih dvaju minerala nije bio poznat do konca XVIII st. i nije se znalo da su u biti istog sastava. Tek francuski mineralog J. R. Haty, uporedivši im fizikalna svojstva i kristalne oblike, pomislio je da se radi o istom spoju, a L. M. Vauquelin, koga je Haty potakao da provede kemijsku analizu, potvrdio je 1789 tu misao i ustanovio da ti minerali sadržavaju dotad nepoznat element koji je zbog slatkastog okusa njegovih soli nazvan *glucinium* (gr. γλυκύς glykys *sladak*). F. Wöhler uspio je 1828 prvi dobiti berilij u elementarnom stanju (reducirajući berilijev klorid metalnim kalijem) i dao mu je to ime. (Naziv je 'beryllium' prevladao i usvojen je od Međunarodne unije za kemiju, ali se u francuskoj literaturi upotrebljava i ime glucinium, a u izvjesnoj mjeri u engleskoj ime glucinum.) U isto vrijeme kao Wöhler i nezavisno od njega dobili su metalni berilij također O. Ohmann i Bussy na sličan način kao on. G. 1898 P. Lebeau pripremio je elektrolizom berilij čistiće 99,5-99,8%; postupak industrijske proizvodnje berilija elektrolizom patentirali su A. Stock i H. Goldschmidt u Njemačkoj 1925. G. 1926 otkrio je američki metalurg M. G. Corson da se legure bakra s niklom i malo berilija mogu termički oplemeniti; time je otvorio polje široke upotrebe berilija u metalurgiji.

Nalazišta. Linije berilija nađene su u sunčanom spektru. U prirodi se berilij nalazi u obliku mnogih minerala, i to alumosilikata, silikata, borata i oksida. Jedini mineral koji je tehnički važan kao sirovina za dobivanje berilija i njegovih spojeva je alumosilikat *beril*, $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ili $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$. Jedan dio Al_2O_3 može biti zamijenjen sa Fe_2O_3 ili Cr_2O_3 , a BeO sa FeO , CaO , Li_2O , Na_2O i Cs_2O . Prema prisutnosti ovih primjesa varira i boja minerala od bezbojne, bijele, svijetložute, ružičaste do svih nijansa zelene. Kristalizira heksagonalno u kristalima koji znaju biti vrlo krupni (nađeni su kristali dugi jedan metar i više) i sadržava 10-12% BeO , odnosno 4% Be. Nalazi se najviše u pegmatitnim žilama granitnih stijena, koje se nalaze u mnogim zemljama. Glavna nalazišta iz kojih se snabdijeva svjetska proizvodnja berilija jesu: Brazil (dao je 1953 25,4% ukupne proizvodnje), Južna Rodezija (18,9%), Argentina (16,2%), USA (8%), Jugozapadna Afrika (6,9%), Južnoafrički Savez (5,7%), Madagaskar (5,5%), Portugal (4,4%), Mozambik (2,9%) i dr. (5,1%). Gledajući još neiskorištena ležišta nalaze se u Kanadi, Kongu i Indiji. Ukupne svjetske rezerve berilijevih ruda sa više od 0,1% Be cijene se na ~ 4 Mt, sa više od 1% Be na svega 200 kt. Proizvodnja 1956 bila je 13 600 t, od kojih je 80% potrošeno u USA.

Budući da nisu još nađene ekonomične metode koncentracije berilijevih ruda, danas se mogu rentabilno iskoristiti samo na-

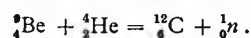
lazišta u kojima se beril dobiva kao nusproizvod uz druge minerale, kao tinjac, glinenac, spodumen, i gdje se iz iskopane rude ručno izdvajaju kristali berila veći od ~ 2,5 cm.

Element berilij. Elektronska konfiguracija atoma berilija je $1s^2 2s^2$. Berilij je jedini element s parnim rednim brojem od koga se u prirodi pojavljuje samo jedan stabilni izotop. U niskim slojevima atmosfere, u oborinama i morskim sedimentima nalaze se radioaktivni izotopi ^7Be i ^{10}Be ; potonji s periodom poluraspada od $2,5 \cdot 10^6$ godina važan je za određivanje geološke starosti stijena.

Kako u elementarnom stanju tako i u spojevima berilij pokazuje upadljive analogije s aluminijem. Poput aluminija ima jaku tendenciju da stvara kompleksne spojeve. Koordinacijski broj u kompleksnim spojevima mu je 4, ligandi su smješteni na vrhovima tetraedra kao u spojevima ugljika, pa su i brojni berilijevi spojevi optički aktivni. Kao aluminij, berilij tvori i anione i katione. U vodenim otopinama se berilijeve soli i berilati, poput aluminijevih soli i aluminata, hidroliziraju uz postanak hidrokso-kompleksa i konačno ispadanje taloga.

METAL BERILIJ

Fizikalna i kemijska svojstva. B. je metal čelično sive boje; d 1,85, t. t. 1284°C , t. k. 2970°C , spec. toplina ($20 \dots 100^\circ$) $0,42 \dots 0,52$ cal/g $^\circ\text{K}$, toplina taljenja $250 \dots 275$ cal/g, toplinska vodljivost $0,355$ cal/cm sek $^\circ\text{K}$ (42% vodljivosti bakra), električna vodljivost $40 \dots 44\%$ vodljivosti bakra, tvrdoća HB $60 \dots 12$ kp/cm 2 . Zahvaljujući svojoj maloj atomskoj težini, b. lako propušta rendgenske zrake, 17 puta lakše od aluminija. Vrlo je zanimljiv metal sa nuklearnog gledišta. Bombardiran α -česticama daje neutrone prema jednadžbi:



Ovom reakcijom nastaje oko 30 neutrona na 10^6 α -čestica. Berilij je služio kao davalac neutrona E. Fermiju u njegovim studijama koje su dovele do izgradnje prvog nuklearnog reaktora 1942; danas ne služi više kao davalac neutrona, ali zato — kao i njegov oksid — služi u nuklearnim reaktorima kao regulator njihove brzine, tzv. moderator, i kao materijal za reflektiranje neutrona.

Poput aluminija, b. se na uzduhu pokriva prozirnim tankim slojem oksida koji ga štiti od kemijskih djelovanja, a uzrok je i njegove površinske tvrdoće. Iznad 600°C postaje vrlo reaktivan prema kisiku te se stoga sve operacije obrade koje se vrše na povišenoj temperaturi, kao što su taljenje, lijevanje, valjanje i gnječenje, moraju provoditi u vakuumu. Berilijeva prašina na običnoj temperaturi otporna je prema oksidaciji, zapaljena izgara uz pojavu sjajnog plamena. Dušik djeluje na metalni berilij na 900°C stvarajući nitrid Be_3N_2 . Ugljik reagira s berilijem iznad temperature taljenja, stvarajući berilijev karbid Be_2C . Sa sumpornom i solnom kiselinom reagira lako, a prema koncentriranoj dušičnoj kiselini je rezistentan. Sa kipucom vodom i alkalijama reagira uz razvijanje vodika. Berilij reducira soli alkalnih metala, aluminija i teških metala, dok na soli zemno-alkalnih metala i magnezija ne djeluje. Otporan je prema rastaljenim alkalijским metalima, što se iskorištava u gradnji izmjenjivača topline za nuklearne reaktore.

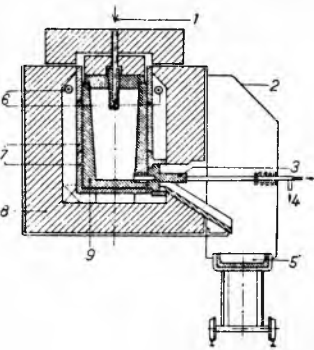
Proizvodnja metalnog berilija. Danas su od industrijske važnosti dva postupka: redukcija fluorida magnezijem (Veazy 1920) i elektroliza rastaljenog bezvodnog klorida (Stock i Goldschmidt 1925).

Redukcija magnezijem. Berilijev fluorid reducira se prema jednadžbi:



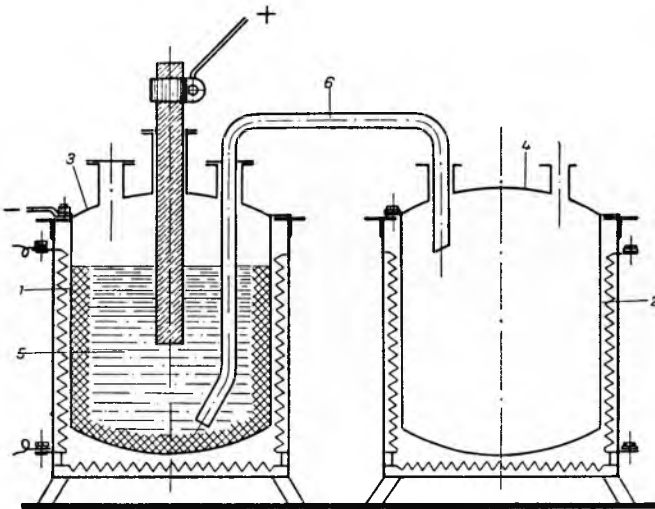
Reakcija se provodi u pečima s grafitnim loncem, kako je prikazano na sl. 1. Prema Kjellgrenu proces redukcije vodi se tako da se radi sa viškom BeF_2 , koji ujedno služi kao taljivo. Kako tim postupkom dolazi do gubitaka skupocjenog berilijeva fluorida, neki autori dodaju kao taljivo CaF_2 umjesto suviška BeF_2 . Reakcija počinje na tački taljenja magnezija (620°C), a reakciona toplina služi za daljnje ugrijavanje sistema. Berilij se izlučuje u finim česticama dispergiranim u troski. Radi boljeg odjeljivanja metala od troske sistem se grije na temperaturu taljenja berilija (1284°C). Na toj temperaturi troska postaje tekuća i rastaljeni metal pliva

na njoj. On se odlije u grafitni lonac, ili se peć ohladi na 1050...1100°C, pri čemu se metal skupi u kuglice koje se nalaze odmah ispod površine rastaljene troske i lako se odijele. Kad je metal u tom obliku, u njemu uključena troska lako se uklanja otapanjem u vodi. Primjese i eventualni ostaci troske uklanjaju se pretaljanjem u vakuumu u visokofrekventnim indukcionim pećima, u loncima od berilijeva oksida. Sirovi metal sadrži 96...97 % Be, a rafinacijom u vakuumu može se postići čistoća od 99,5% Be.



Sl. 1. Peć za redukciju berilija u poluindustrijskom mjerilu. 1 termo-članak, 2 ventilacioni uređaj, 3 otpusni ventili 4 hlađenje vodom, 5 kalup za trosku, 6 plinski plamenici, 7 oplata peći, 8 kućište od vatrotalne opeke, 9 grafitni lonac

se smjesa BeCl_2 i NaCl na 300...400°C. Posuda služi kao katoda, a odozgo se spušta u talinu grafitna anoda. Na zidovima posude izlučuje se berilij u listićima. Nakon 24 sata se s pomoću vakuumu prebaci rastaljena smjesa u drugu identičnu posudu, sastav se korigira na početni odnos BeCl_2 : NaCl i elektroliza se nastavi. U 24 sata elektrolize dobiva se $\sim 1,2\text{--}1,5$ kg berilija uz napon



Sl. 2. Uređaj za elektrolizu berilija. 1 i 2 posude u električnim pećima, 3 i 4 ploče, 5 elektrolit, 6 cijev za prebacivanje elektrolita s pomoću vakuumu

od 4...6 V i jakost struje od 400...500 A. Metalne ljuske skinu se sa zidova i vodom se odstrane ostaci elektrolita. Ako je ishodni berilijev klorid vrlo čist, tj. prečišćen sublimacijom, elektrolitskim se postupkom može dobiti metal čistoće 99,6...99,7 % Be.

Upotreba berilija. B. se upotrebljava u nuklearnoj tehnici kako je naprijed spomenuto, osim toga i za oklope elemenata nuklearnog goriva. Velika propusnost za rendgenske zrake i visoko talište berilija omogućili su primjenu rendgenskih zraka većeg intenziteta; od njega se prave izlazni prozorčići na rendgenskim cijevima. Ekstremna lakoća berilija, uz veliku tvrdoću i čvrstoću i visoki modul elastičnosti, čine ga privlačivim materijalom za aerotehniku i za balističke projekte; zbog njegove velike specifične topline i toplinske vodljivosti pogodan je materijal za dijelove s kojih treba odvesti velike količine topline, kao što su napadne ivice nadzvučnih letala, vrhovi projektila i sl., kočnice za velike energije; nedostatak je krtost čistog berilija, koja otežava obradu, osim metodama metalkeramičke. U najvećoj mjeri se

b. upotrebljava kao sastojina legura, uglavnom bakra, nikla, kobalta, željeza i aluminija.

Bakrene legure s berilijem (i kobaltom) dijele se uglavnom na legure velike čvrstoće, s većim sadržajem berilija (1,6...2,15 % Be, 0,25...0,35% Co za plastičnu obradu, 2,00...2,85 % Be, 0,35...0,065 % Co za lijevanje) i legure velike vodljivosti, sa manjim sadržajem berilija (0,25...0,60 % Be, 1,40...1,26 % Co legure za plastičnu obradu, 0,55...0,70 % Be, 2,35...2,60 % Co za lijevanje). Sve te legure vrlo su plastične i lako se obrađuju pošto se zagriju na 785...800°C (legure bogatije berilijem) odn. 940...960°C (legure siromašnije berilijem) i onda naglo ohlade vodom, a tvrde su i čvrste ako se zakale izlučivanjem (grijanjem legura, prethodno s visoke temperature naglo ohlađenih, na 400...480, odn. 290...340°C). Zakaljene legure imaju čvrstoće od 11 500...12 500 odn. 7000...8500 kp/cm². Ako se hladno valjaju prije kaljenja, čvrstoća im naraste još za 20%. Dobro vode toplinu i elektricitet, dimenzijski su stalne, otporne su prema koroziji, habanju i cikličkom opterećenju. Mogu se obrađivati i spajati svim uobičajenim postupcima obrade i spajanja metala.

Predlegure bakra i berilija sa 4...4,25 % Be dobivaju se izravno redukcijom berilijeva oksida ugljikom u nazočnosti bakra u električnoj peći.

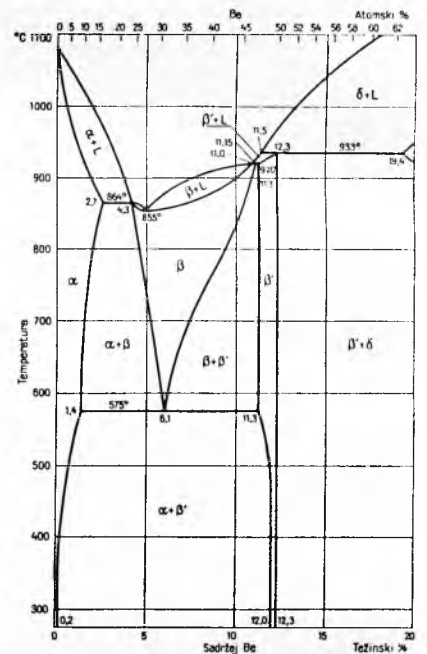
Legure bakra s berilijem upotrebljavaju se za kritične pokretne dijelove strojeva (npr. avionskih motora), za ležajeve, ključne elemente preciznih instrumenata (mehaničkih računala, fotografskih zatvarača i sl.), za opruge, elektrode za zavarivanje, kontakte, kalupe za brizgani lijev i lijevanje plastičnih masa, za brodske propelere i za alat i uređaje koji ne smiju da daju iskre kad se njima ili po njima udara (npr. čekići i francuski klučevi za rafinerije).

Nikal s berilijem (2 % Be) termički obrađen može dobiti čvrstoću do > 18 000 kp/cm² sa 5...8% izduženja i tvrdoću HB \sim 500 kp/cm². Od takvih legura prave se precizni odljevi za avionske pumpe za gorivo, injekcione igle, kirurški instrumenti i dijamantne bušilice. Od **željeznih legura sa berilijem** i niklom (i uz to nekad kobaltom, kromom i molibdenom) prave se opruge za satove, kirurški instrumenti i zubne proteze. **Aluminij** kojemu je dodato 0,1...0,5 % Be lakše se lijeva i po ohlađenju ima finije zrno. Dodatak svega 0,005 % Be **magneziju** smanjuje mu zapaljivost i sprečava oksidaciju na temperaturi taljenja.

Neobičnu vrstu legura vrlo čvrstih na visokim temperaturama predstavlja berilij u kojemu su dispergirani postojani oksidi, karbidi, nitridi i intermetalni spojevi. Dodatak 2 % BeO beriliju podvostručuje mu npr. čvrstoću na 600°C. Za primjenu na visokim temperaturama (1300...1600°C) intermetalni spojevi berilija i nekih prelaznih elemenata (npr. Zr, Nb, Ta) predstavljaju materijale visoke gustoće ($\sim 2,70\text{--}4,2$), dobre otpornosti prema oksidaciji, a velike toplinske vodljivosti, specifične topline i mehaničke čvrstoće.

SPOJEVI BERILIJ

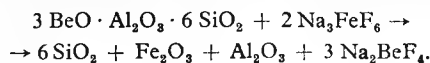
Berilijev oksid dobiva se najviše žarenjem berilijeva hidroksida i nekih drugih berilijevih spojeva. Tako se vrlo čisti BeO za nuklearne svrhe dobiva žarenjem klorida čistog frakcionom destilacijom, ili acetata čistog frakcionom sublimacijom, ili sulfata



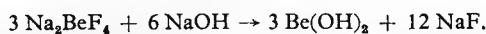
Sl. 3. Dijagram stanja bakar-berilij

čišćenog prekrizacijom. Berilijev oksid se odlikuje visokim talištem (2570°), tvrdoćom, malom gustoćom (d 3,02), visokim električnim otporom, velikom toplinskom vodljivošću, stabilnošću na visokim temperaturama i povoljnim nuklearnim svojstvima. Upotrebljava se kao visoko vatrootalni materijal i za visokovalitetni električni porculan (npr. za svjećice avionskih motora i izolatore za UKV-radar). Za taljenje vrlo čistih ili agresivnih metala upotrebljavaju se lonci od berilijeva oksida, ili se grafitni lonci iznutra premažu tim oksidom. Razmjerno velike količine upotrebljavaju se za fluorescentne lampe.

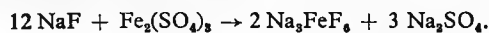
Berilijev hidroksid je međuprodukt pri dobivanju berilijeva oksida ili berilijevih soli iz berila. Danas se uglavnom upotrebljavaju dva postupka za raščinjavanje berila: fluoridni i sulfatni. *Fluoridni postupak* (Copaux-Kawecki) osniva se na ovoj reakciji:



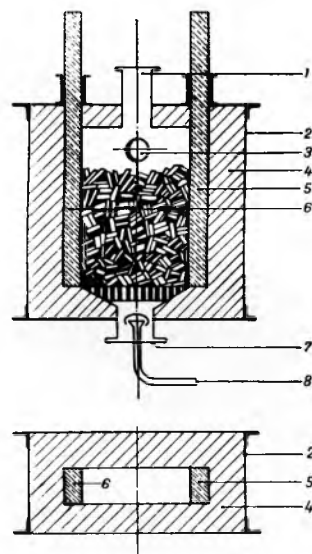
Fino samljeveni beril pomiješa se sa natrijevim fluoroforatom (željeznim kriolitom), briketira i sinteružuje na 700...800°C. Po ohlađenju sintera, u vodi topljivi Na_2BeF_4 odvoji se od netopljivih oksida izluživanjem i dekantacijom. Iz otopine se taloži berilijev hidroksid natrijskom lužinom i odvoji filtracijom:



Filtratu se dodaje feri-sulfat da se regenerira željezni kriolit za rastvaranje novih količina berila:

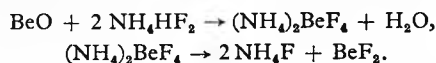


U *sulfatnom postupku* (Sawyer-Kjellgren) beril se najprije rastali na 1625°C i ulijeva u hladnu vodu, da bi mu se time izmijenila kristalna struktura i on postao topljiv u sumpornoj kiselini. Mljeveni proizvod tog procesa grije se sa sumpornom kiselinom na 200...300°C u autoklavima. Autoklavna masa izlužuje se vodom i od dobivene otopine berilijeva i aluminijeva sulfata odvaja se netopljivi SiO_2 filtracijom. Filtratu se dodaje amonijaka, uslijed čega se stvara amonijev alaun koji iskristalizira, uklanjajući tako iz otopine aluminij. Nakon dodatka reagencija koje zadržavaju u otopini željezo i nikal u obliku kompleksnih spojeva, berilij se dodatkom natrijske lužine u otopini prevede u natrijev berilat, koji se hidrolizira i daje netopljiv hidroksid.



Sl. 4. Peć za dobivanje berilijeva klorida. 1 otvor za punjenje, 2 kućište, 3 otvor za izlaz dimnih plinova i BeCl_2 , 4 zide, 5 i 6 ugljene elektrode, 7 otvor za pražnjenje, 8 dovod klora

Berilijevi halogenidi. *Berilijev fluorid* dobiva se grijanjem berilijeva oksida s plinovitim fluorovodikom ili otapanjem berilijeva oksida u otopini NH_4HF_2 i kristalizacijom nastalog amonijeva fluoroberilata, koji žarenjem daje BeF_2 :

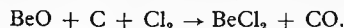


Pri uparavanju otopine berilijeva hidroksida u fluorovodičnoj kiselini dobivaju se bazični fluoridi. Berilijev fluorid služi u proizvodnji berilija Kjellgrenovim postupkom i kao dodatak prašcima za lemljenje i zavarivanje lakih metala. Topljiv je u vodi; u tome se razlikuje od aluminijeva fluorida.



Sl. 5. Obrada berilija na tokarilici

Berilijev klorid, azbestu slične isprepletene iglice ili zrnasta masa, t. t. 404°C, t. k. 500°, dobiva se uvođenjem klora u briketiranu smjesu berilijeva oksida i ugljika, užarenu na 1000°C:



Električki grijana peć (Degussa) za taj postupak prikazana je na sl. 3. Pare BeCl_2 izlaze s ugljičnim monoksidom, kondenziraju se u smeđezuti rahli prašak koji se čisti sublimacijom. Bezvodni BeCl_2 lako se hidrolizira već s vlagom u uzduhu te ga treba čuvati u hermetički zatvorenim posudama. Služi kao elektrolit pri dobivanju metalnog berilija. Analogno dobiveni *berilijev bromid* služi u organskoj kemijskoj sintezi.

Berilijev nitrat, $\text{Be}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, dobiva se otapanjem berilijeva hidroksida u dušičnoj kiselini, sastojina je smjese za impregniranje Auerovih mrežica, kojima BeO daje potrebnu tvrdoću.

Berilijev sulfat, $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ispada u lijepim kristalima iz otopine berilijeva oksida u sumpornoj kiselini, te stoga može služiti za dobivanje čistog oksida. U keramici berilijeva oksida služi kao vezivo.

Bazični berilijev acetat, zapravo heksa-acetato-kompleks, $\text{Be}_6\text{O}(\text{CH}_3\text{COO})_6$, topljiv je u ledenoj octenoj kiselini i iz nje kristalizira vrlo čist, topljiv je u kloroformu i drugim organskim otapalima, tali se na 283°C a na 330°C destilira bez raspada. Zbog tih osobina služi za dobivanje berilijeva oksida najveće čistoće.

Berilijev karbid i berilijev borokarbid, dobiveni iz $\text{BeO} + \text{C}$ odn. $\text{BeO} + \text{C} + \text{B}$ u električnom luku, vrlo su tvrdi te su bili predloženi kao abrazivi (sredstva za brušenje).

Berilijev-cinkov silikat služi kao svjetleća masa luminescentnih svjetiljaka.

TOKSIKOLOGIJA BERILIJA

Posljednjih godina posvećeno je mnogo pažnje toksičnosti berilija pa je ustanovljeno da topljivi berilijevi spojevi uzrokuju na koži dermatitis, a udisanje para i praha metala, oksida i drugih berilijevih spojeva uzrokuje akutnu pneumoniju ili kroničnu beriliozu. To opasno oboljenje, koje je opaženo najprije u industriji fluorescentnih lampi a dosad se opire svim pokušajima liječenja, često završava fatalno. I dermatitis i berilioza sprečavaju se vrlo strogim mjerama higijensko-tehničke zaštite. Koncentracija berilija u uzduhu ne smije u osamsatnoj radnoj smjeni preći u vremenskom prosjeku $2 \gamma/\text{m}^3$, a nikad, pa ni kroz najkraće vrijeme, ne smije preći $25 \gamma/\text{m}^3$. Atmosfera izvan tvorničkog prostora smije sadržavati najviše $0,01 \gamma/\text{m}^3$. U tu svrhu tvorničke prostorije moraju biti savršeno ventilirane, a uzduh se prije izlaska u atmosferu čisti specijalnim filtrima, ciklonima ili elektrostatskim precipitatorima. Alatni strojevi za obradu berilija treba da budu hermetički odvojeni od radnika (sl. 5). Uposlano osoblje mora

održavati strogu ličnu higijenu, često se prati i obavezno tuširati nakon završenog rada. Pri dolasku na radno mjesto i odlasku s njega radnici se u potpunosti preoblače i preobuvaju. Neki su ljudi naročito osjetljivi prema beriliju; oni ne mogu raditi u tvornicama koje prerađuju berilij i njegove spojeve.

LIT.: C. A. Hampel (ed.), Rare metals handbook, New York 1954. — D. W. White i J. E. Burke (eds), The metal beryllium, Cleveland 1955. — Extraction and refining of the rarer metals, London 1957. T. G.-F. i R. Py.

BETA-SPEKTROMETRI, aparati za merenje raspodele brzina elektrona koje ispušta neki izvor. Njihovo funkcionisanje se zasniva na dejstvu statičkog magnetnog polja na naelektrisane čestice u pokretu. Na elektron (sa naelektrisanjem e) koji se kreće brzinom v u nekom magnetnom polju jačine H deluje sila F određena jednačinom

$$\vec{F} = e \cdot \vec{v} \times \vec{H}. \quad (1)$$

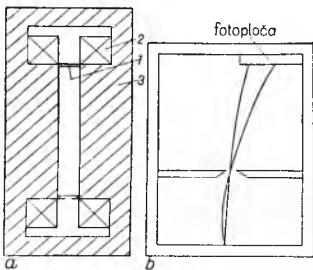
Najjednostavniji je slučaj kada je magnetno polje uniformno, a elektroni polaze u pravcu okomitom na pravac polja. Na elektron tada deluje sila $e v H$, kojoj se suprotstavlja centrifugalna sila $m v^2/r$, tako da je jednačina kretanja:

$$\frac{m v^2}{r} = e v H. \quad (2)$$

Putanja elektrona biće kružnica čiji se radijus dobiva iz gornje jednačine:

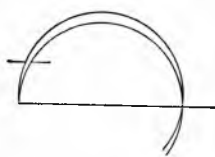
$$r = \frac{p}{e H}; \quad p = m v, \text{ impuls elektrona.} \quad (3)$$

U gornjoj jednačini e je konstanta, a ako se i H održava konstantnim, radijus kružnice srazmeran je impulsu elektrona: magnetno polje razdvaja elektrone po impulsima. Ta činjenica se iskorišćuje u spektrometrima da bi se tako razdvojenim elektronima izmerio impuls i odredilo koliko čestica ima sa kojim impulsom.



Sl. 1. Beta-spektrometar sa skretanjem. a presek elektromagneta: 1 jaram, 2 kalemovi, 3 zidovi komore; b presek komore

pravcima. Iznad izvora nalazi se uska dijafragma, koja propušta samo veoma uzak snop elektrona. Na gornjem zidu komore pričvršćena je fotografska ploča, na koju padaju elektroni. Gde na ploču padne više elektrona, biće zacrnjenje jače. Magnetno polje je okomito na sl. 1b, beta-čestice će opisivati kružne lukove različitih radijusa. Impuls će se moći odrediti prema jedn. (2) ako se nade radijus, jer je jačina polja poznata. Za svako mesto na ploči može se dakle odrediti impuls elektrona koji tu padaju, a iz zacrnjenja na tom mestu se dobiva intenzitet; time su poznati podaci potrebni za određivanje spektra. Ovakav tip spektrometra upotrebljavan je do



Sl. 2. Princip fokalizacije sa 180°

tridesetih godina ovoga veka, a zatim je napušten. Njegov osnovni nedostatak je slaba efikasnost. Otvor na dijafragmi je uzak te se iskorišćuje veoma mali deo zračenja koje polazi od izvora. Ako bi se uzeo veći otvor, padali bi na isto mesto na ploči elektroni različitih energija i razdvajanje spektra bilo bi slabije.

Efikasnost se može poboljšati ako se iskoristi efekat fokalizacije elektrona u magnetnom polju, analogan delovanju optičkih sočiva koji divergentne zrake sakupljaju u fokus.

Fokalizacija se dobiva i u slučaju koji je razmatran gore ako se pusti da elektroni opišu pola kruga (sl. 2). Dva elektrona koja

su pošla u raznim pravcima, prešavši polovinu kruga, ponovo su se sastala u istoj tački. Na taj način intenzitet se povećava a razdvajanje ne pogoršava. Ovakav tip beta-spektrometra naziva se *ravnim*.

Sledeći tip je *magnetno sočivo*, koje još više podseća na optiku. Ako elektroni ne polaze pod pravim uglom prema magnetnom polju, njihova putanja nije krug već zavojnica (sl. 3). U spektrometrima se iskorišćuje samo jedan zavoje. Radioaktivni izvor se stavi u osu sočiva. Elektroni koji podu od izvora pod nekim uglom u odnosu na osu sakupe se posle jednog zavoja ponovo na osi gde je smešten brojač. Za datu jačinu polja u brojač stižu samo elektroni određene energije. Oni koji imaju manju energiju stižu na osu pre brojača i promaše ga, a oni koji imaju veću energiju udaraju u zidove. Menjajući jačinu polja dovode se elektroni različitih energija do brojača i na taj način određuje spektar.

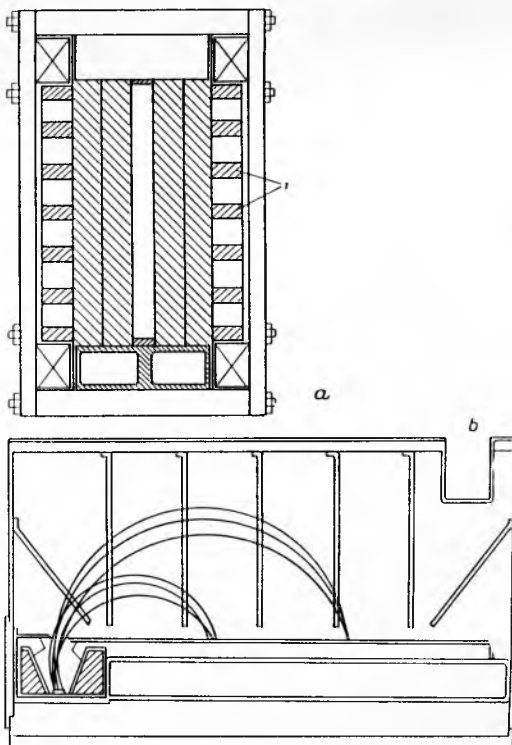
Kvalitet magnetnog spektrometra karakterisan je njegovom *transmisijom* i *moći razdvajanja*. Transmisija spektrometra pokazuje koji deo zračenja stigne iz izvora u brojač. Beta-čestice polaze iz izvora na sve strane. Dijafragma ispred izvora propušta samo manji deo da prođe kroz spektrometar do brojača, dok veći deo udara u zidove i ostaje neiskorišćen. Transmisija se izražava u procentima; do sada najveća postignuta vrednost je 18%, ali obično je oko 1% ili manje. Moć razdvajanja karakteriše sposobnost aparata da razdvoji dve grupe elektrona bliskih brzina, a definiše se kao

$$R = \frac{\Delta p}{p}.$$

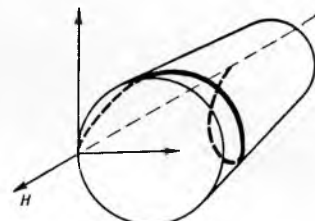
Moć razdvajanja se meri u procentima i može da iznosi od nekoliko procenata pa do $\sim 0,02\%$.

Transmisija i moć razdvajanja nekog aparata u međusobnoj su zavisnosti, i to tako da se jedna može poboljšati na račun druge. Razni aparati imaju dobru transmisiju ili dobru moć razdvajanja.

Iz jednačine (3) se vidi da je impuls proporcionalan umnošku polja i radijusa, pa se u nuklearnoj spektroskopiji impuls meri u jedinicama $[Hr]$, jer su mnogo pogodnije od jedinica $[mv]$.



Sl. 4. Beta-spektrometar sa permanentnim magnetom. a presek magneta: 1 permanentni magnet; b presek komore



Sl. 3. Putanja elektrona koji ne polazi pod pravim uglom prema magnetnom polju je zavojnica