

3. KRISTALI IN KRISTALITI

Večina trdnih snovi je v kristalnem stanju. V splošnem lahko rečemo, da so kristali periodična prostorska razporeditev atomov, molekul in ionov. V poljubni smeri kristala so enaki gradniki na enakih razmakih; vsak gradnik v kristalu ima identično okolico, identično razporeditev sosednjih gradnikov.

Po urejenosti gradnikov v snovi se razlikujejo od amorfni snovi, kjer o urejenosti ne moremo govoriti. Za razliko od kristalov so v amorfni snoveh gradniki razporejeni brez reda. Zgradba amorfni snovi je v precejšnji meri podobna zgradbi tekočin, le da gradniki niso prosto gibljivi.

Kristali izkazujejo globalno urejenost in sicer v dimenzijah, ki so mnogo večje od medatomskih razdalj. Pri naši obravnavi se bomo omejili le na nekatere tipične primere.

V kristalu so atomi, ioni ali molekule geometrijsko urejeni po povsem določeni zakonitosti.

Zunanje ploskve kristalov določene snovi oklepajo vselej enake kote, na velikost ploskev pa vplivajo pogoji, pod katerimi kristal nastaja. Pravilna zunanja oblika kristalov je posledica pravilne notranje zgradbe. Ravne zunanje ploskve kristala nastanejo kot posledica počasnejše rasti kristala v smereh, ki so pravokotne na te ploskve. Kristali natrijevega klorida, ki kristalizirajo iz nasičene vodne raztopine, imajo obliko kocke. V smeri telesnih diagonal kocke je rast kristala najhitrejša, v smeri, pravokotni na zunanje ploskve pa najpočasnejša.

Kristalografija se ukvarja zlasti s proučevanjem notranje zgradbe kristalov, to je z določevanjem kristalnih struktur, razvijanjem metod strukturne analize pa tudi s proučevanjem raznih fizikalnih lastnosti kristalov.

Pri proučevanju zgradbe in zunanje oblike kristalov ima ključni pomen simetrija. V naravoslovnih vedah često definiramo simetrijo kot prostorsko ali časovno ponavljanje enakih vzorcev. V geometrijskem smislu je nek objekt simetričen, če ga s premikanjem pokrijemo »s samim seboj«, ne da bi spreminjali njegove dimenzije (razdalje, kote).

Nek nesimetričen objekt ali vzorec se lahko ponavlja v prostoru glede na štiri osnovne simetrijske elemente ali pa glede na kombinacije osnovnih simetrijskih elementov. Simetrijski

element opredeljuje način ponavljanja objekta v prostoru, to je simetrijsko operacijo. Osnovne štiri simetrijske operacije so:

- a) translacija – vzporedno premikanje v določeni smeri, v ravnini ali trodimenzionalno.
- b) refleksija – zrcaljenje skozi ravnino,
- c) rotacija – vrtenje za določen kot okrog osi,
- d) inverzija – preslikava skozi točko,

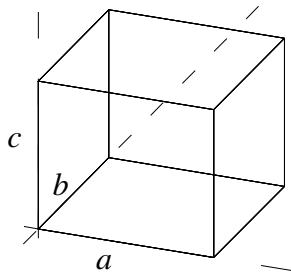
Pri refleksiji se objekt ali vzorec ponovi v prostoru z zrcaljenjem skozi zrcalno ravnino. Pri rotaciji se objekt ali vzorec ponavlja z obračanjem okrog osi za kot $360/n$. Če je n , ki je celo število, enako 2, govorimo o dvoštevni osi, če $n = 3$ o troštevni osi itd. Kristalografska oznaka za te elemente je kar n , spektroskopska pa c_n . Pri inverziji se objekt ali vzorec preslika skozi točko, ta simetrijski element imenujemo center inverzije ali simetrijski center. Koordinate točke vzorca glede na center inverzije x, y, z , se pri tem pretvorijo v koordinate $-x, -y, -z$. Kristalografska oznaka za center inverzije je $\bar{1}$.

S simetrijskimi elementi opišemo ponavljanje asimetričnih vzorcev v prostoru. Proces, pri katerem dobimo s ponavljanjem (premikanjem) vzorca situacijo, ki je identična začetni, imenujemo simetrijska operacija.

V večini svojih lastnosti se kristali obnašajo anizotropno (odvisne so od smeri opazovanja). Zaradi tega je potrebno definirati metodo za določevanje ravnin in smeri v kristalih. Najprej moramo določiti osnovno prostorsko razporeditev atomov, oziroma osnovno celico. Takšna osnovna celica se v idealnem kristalu periodično ponavlja do fizičnih meja snovi. Pri tem se izkaže, da so osnovni delci v kristalni strukturi urejeni po načelu geometrijske simetrije.

Z različnimi kombinacijami simetrijskih operacij dobimo **32 kristalnih razredov**. Namesto opisovanja 32 razredov v enem koordinatnem sistemu rajši izberemo 7 različnih koordinatnih sistemov, ki so prikazani na sliki 3.1.

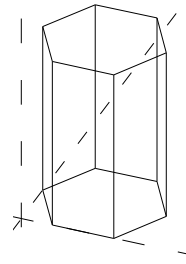
- kubični ali regularni:



$$a = b = c \text{ in } \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

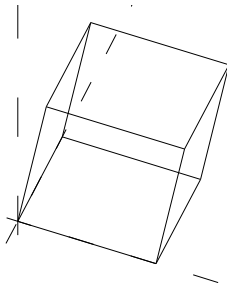
$$\angle ab = \alpha, \angle ac = \beta, \angle bc = \gamma$$

- heksagonalni:



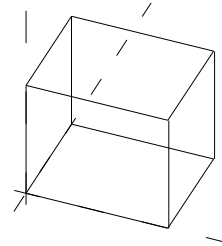
$$a = b \neq c \text{ in } \beta = \gamma = 90^\circ; \alpha = 120^\circ$$

- monoklinski:



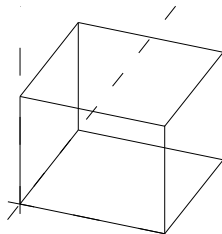
$$a \neq b \neq c \text{ in } \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma \neq 90^\circ$$

- ortorombski:



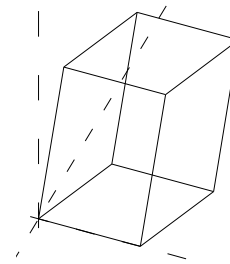
$$a \neq b \neq c \text{ in } \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- tetragonalni:



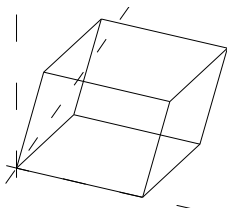
$$a = b \neq c \text{ in } \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- trigonalni ali romboedrični:



$$a = b = c \text{ in } \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

- triklinski:



$$a \neq b \neq c \text{ in } \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

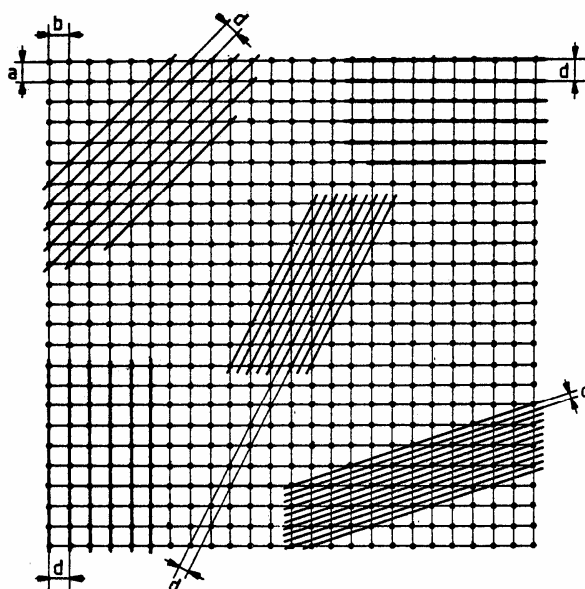
Slika 3.1 Koordinatni sistemi za opisovanje kristalov

3.1 Kristalografske ravnine in smeri

Če zvežemo središča gradnikov (atomov, ionov in njihovih skupin) z namišljenimi črtami, dobimo grafično sliko, ki ji pravimo kristalna mreža. Najmanjšo prostorsko enoto te mreže imenujemo elementarna ali osnovna celica.

3.1.1 Kristalografske ravnine

V kristalno strukturo postavimo ravnine, ki so med seboj in od elementov kristalne strukture enakomerno oddaljene. Imenujemo jih tudi mrežne ravnine. Kot je razvidno iz slike 3.2 (kaže dvodimenzionalni primer), obstaja pri neki kristalni strukturi več možnih postavitev ravnin tako, da so med seboj enakomerno oddaljene in v njih ležijo gradniki kristalne celice (atomi, ioni ali molekule).



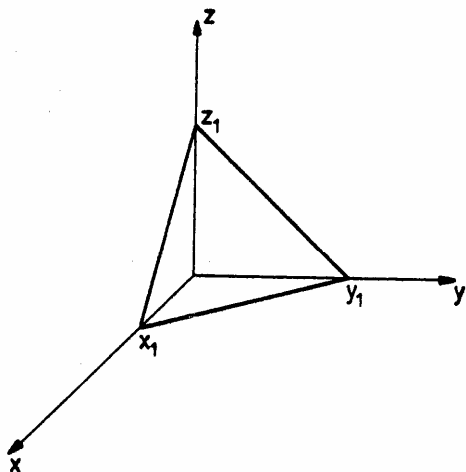
Slika 3.2 Mrežne ravnine

Za opis mrežnih ravnin najprej izberemo koordinatni sistem, ki sovпада s kristalno strukturo. Običajno izberemo koordinatno izhodišče v eni od točk kristalne strukture.

Iz celotne množice mrežnih ravnin, ki bi jih radi označili, izberemo tisto, ki je najbližja koordinatnemu izhodišču. Na sliki 3.3 je prikazana ravnina in koordinatni sistem, pri čemer ni nujno, da so koordinatne osi med seboj pravokotne.

x_1 , y_1 in z_1 so presečišča ravnine z osmi. Določiti moramo še dolžine odsekov osi od koordinatnega izhodišča do presečišč. Dobljene vrednosti uporabimo pri določanju elementarnih celic. S pomočjo števne faktorja s_1 priredimo tri števila:

$$h = \frac{s_1}{x_1}; \quad k = \frac{s_1}{y_1}; \quad l = \frac{s_1}{z_1} \quad (3.1)$$



Slika 3.3 Položaj mrežne ravnine v koordinatnem sistemu

Števec s_1 izberemo tako, da so h , k in l najmanjša možna cela števila. s_1 je torej najmanjši skupni mnogokratnik odsekov x_1 , y_1 in z_1 . Na ta način dobimo Millerjeve indekse, ki označujejo lego mrežnih ravnin. Vrednosti indeksov zapišemo v okroglem oklepaju:

$$(h, k, l)$$

Primer: Če imamo posamezne odseke na oseh $x_1 = 2$, $y_1 = 4$, $z_1 = 3$, potem je $s_1 = 12$ in Millerjevi indeksi so (6, 3, 4).

Večkrat dobimo tudi negativne vrednosti odsekov in s tem tudi negativne vrednosti indeksov. Te označujemo s prečno črto:

$$(\bar{h} \ k \ l)$$

V mnogih primerih (če permutiramo koordinatne osi) imajo ekvivalentne kristalne ravnine enake lastnosti. Te ravnine označujemo z indeksi v zavutih oklepajih:

$$\{h, k, l\}$$

Na sliki 3.4 so prikazane pomembnejše kristalografske ravnine v kubični kristalni mreži. Za kristalne snovi je značilno, da se pri plastični deformaciji kristali pomikajo vzdolž takšnih ravnin.

3.1.2 Kristalografske smeri

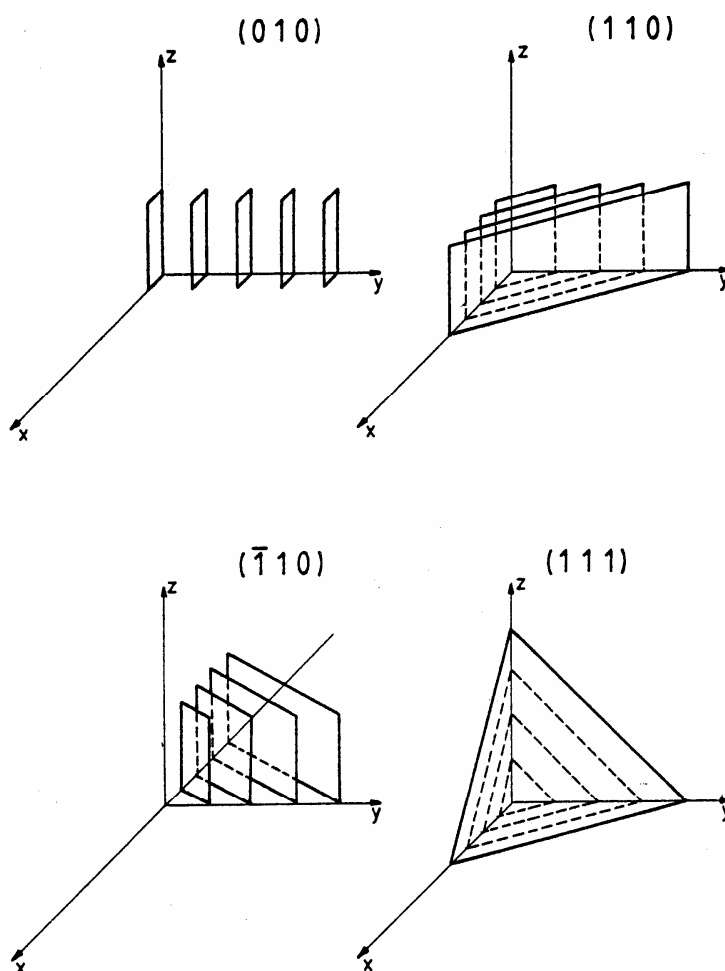
Poleg ravnin pa so za analizo kristalnih struktur pomembne tudi smeri v kristalu (*kristalografske smeri*). Z njimi lahko opišemo anizotropne lastnosti npr. magnetne lastnosti železa, za katere je značilno, da niso v vseh smereh enake.

Kristalografske smeri določamo na podoben način kot ravnine. Vektor izhaja iz koordinatnega izhodišča. S pomočjo projekcij vektorja na oseh x_2 , y_2 in z_2 , ki so izražene z enotami za merjenje dolžin robov elementarne celice, dobimo:

$$u = \frac{x_2}{s_2}, v = \frac{y_2}{s_2}, w = \frac{z_2}{s_2}, \quad (3.2)$$

kjer je s_2 največji skupni delitelj števil x_2 , y_2 in z_2 . Sedaj lahko zapišemo Millerjeve indekse za smer vektorja, ki jih postavimo v oglati oklepaj:

$$[u, v, w]$$



Slika 3.4 Pomembnejše kristalografske ravnine v kubični kristalni mreži

Če dobimo negativne vrednosti projekcij in na ta način tudi negativne vrednosti smernih indeksov, potem jih označimo s prečno črto:

$$[\bar{u}, v, w]$$

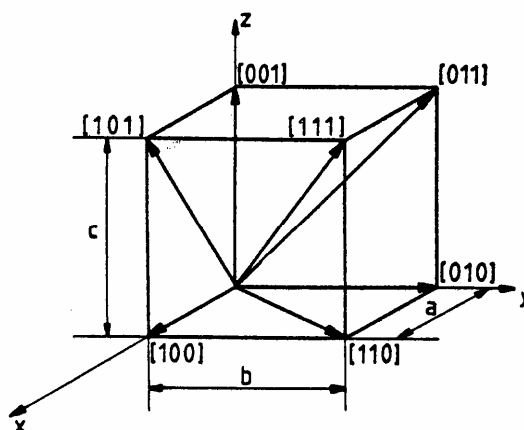
V kubičnem sistemu je smerni vektor $[u, v, w]$ pravokoten na kristalografsko ravnino (u, v, w) .

Če s permutiranjem koordinatnih osi dobimo enake smerne vektorje, potem jih zapišemo v naslednji obliki (velja za prostorske diagonale v kubičnem sistemu):

$$[111], [1\bar{1}1], [11\bar{1}], [\bar{1}1\bar{1}] \dots$$

$$\text{oz. } \langle 111 \rangle$$

Na sliki 3.5 so prikazane pomembnejše kristalografske smeri v kubični kristalni celici. Pri transformatorski pločevini je to npr. smer $[100]$, ki sovpada s smerjo valjanja.



Slika 3.5 Pomembnejše kristalografske smeri v kubični kristalni celici

3.1.3 Razdalja med ravninami

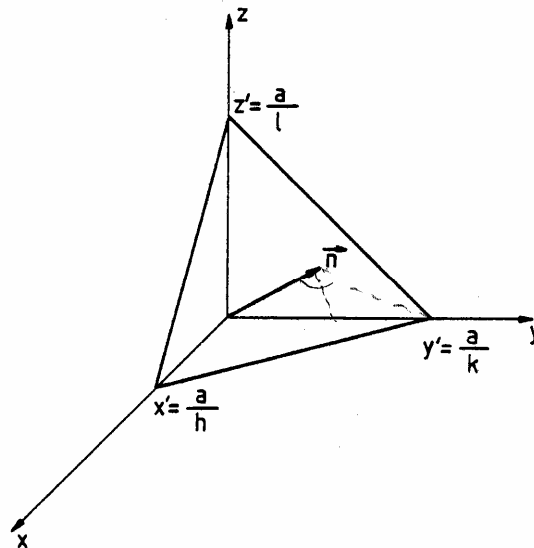
Iz dvodimenzionalnega primera na sliki 3.2 smo videli, da je razdalja med ravninami odvisna od orientacije (smeri) ravnin. Gosto razporejene mrežne točke rezultirajo k večjim razdaljam med ravninami in obratno.

Razdalja med dvema ravninama je najkrajša tj. pravokotna razdalja z enakimi Millerjevimi indeksi.

Če se omejimo na kubično strukturo, potem lahko dokaj preprosto izračunamo razdalje med ravninami. Koordinatno izhodišče postavimo v eno od oglišč kocke. Po definiciji označimo z Millerjevimi indeksi tisto ravnino, ki je izhodišču najbližja. Normala na to ravnino določa

razdaljo med ravninami. Na sliki 3.6 vidimo primer lege vektorja \vec{n} z označenimi projekcijami na oseh. Za to ravnino lahko podamo smerni vektor v normirani obliki:

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cdot \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \quad (3.3)$$



Slika 3.6 Lega smernega vektorja

Kot vidimo na sliki 3.6, je razdalja od izhodišča do najbližje mrežne ravnine enaka projekciji odsekov osi x' , y' ali z' na smer normale. Če izberemo npr. odsek y' :

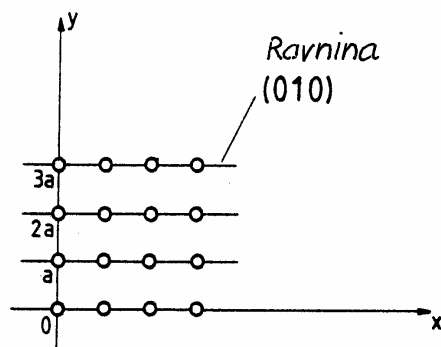
$$y' = \begin{pmatrix} 0 \\ a/k \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

potem dobimo razdaljo do ravnine z notranjim produktom:

$$d = \vec{y}' \cdot \vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ a/k \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.5)$$

Primeri:

Na sliki 3.7 vidimo primer izračuna razdalje d za ravnino $(0 \ 1 \ 0)$.



Slika 3.7 Razdalja med ravninami (0,1,0)

Razdalja med ravninami je torej enaka:

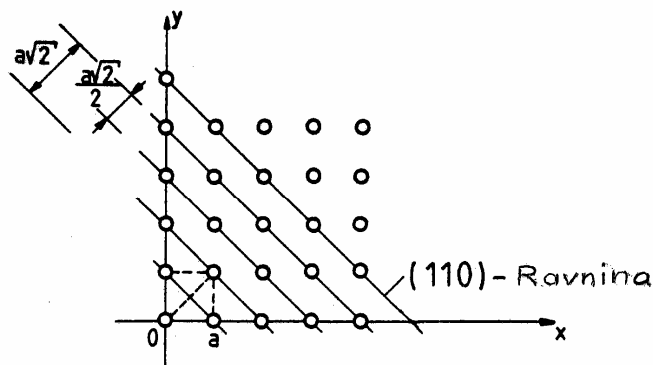
$$d = \frac{a}{\sqrt{0^2 + 1^2 + 0^2}} = a \quad (3.6)$$

To je bil zelo enostaven primer. Rezultat lahko odčitamo kar neposredno s slike 3.7.

Za ravnino (110), ki je prikazana na sliki 3.8, dobimo sledeč rezultat:

$$d = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} a \quad (3.7)$$

Razdalja med dvema mrežnima ravninama je torej enaka polovici diagonale osnovne ploskve.

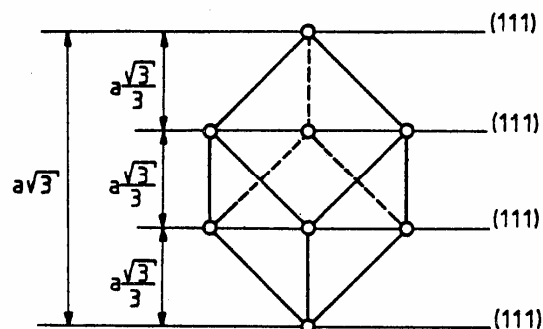


Slika 3.8 Razdalja med ravninami (1,1,0)

Tretji primer na sliki 3.9 kaže potek ravnin (1 1 1), kjer je razdalja med njimi enaka:

$$d = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{\sqrt{3}}{3} a. \quad (3.8)$$

Osnovno celico zavrtimo tako, da je konica kocke na dnu. Vidimo, da je razdalja med ravninami enaka tretjini telesne diagonale kocke.



Slika 3.9 Razdalja med ravninami (1,1,1)

V primerih, ko koti med osmi koordinatnih sistemov niso enaki 90° , je potrebno izračunati kote med kristalografskimi smermi. Millerjevi indeksi za dve smeri so $[h_1, k_1, l_1]$ in $[h_2, k_2, l_2]$. Skalarni produkt vektorjev nam da:

$$\cos \varphi = \frac{h_1 \cdot k_1 + h_2 \cdot k_2 + h_3 \cdot k_3}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} \quad (3.9)$$

3.2 Nekateri izbrane geometrije kristalov

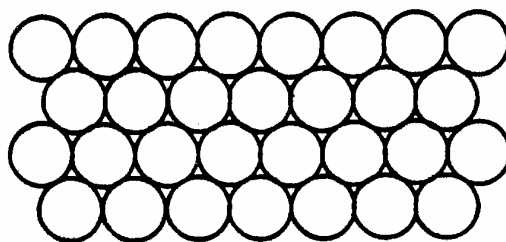
V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj geometrij kristalov, ki jih najpogosteje zasledimo pri elektrotehničnih materialih. Pri tem se bomo omejili na idealne strukture brez napak.

Pri zblizanju dveh atomov, molekul ali ionov nastopajo močne odbojne sile. Razmere bi lahko primerjali s trkom dveh krogel. Že pri najmanjši deformaciji pride do delovanja močnih nasprotnih "elastičnih" sil. Ko bomo govorili o geometrijski porazdelitvi gradnikov v kristalu, bomo upoštevali poenostavljeno predstavitev, da so gradniki podobni trdim krogam, med katerimi prihaja do trkov.

3.2.1 Najgostejša heksagonalna struktura gradnikov

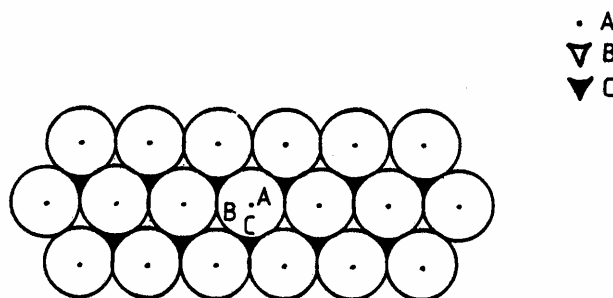
Če si predstavljamo gradnike v obliki idealnih krogel, jih lahko najgosteje razporedimo v isti ravnini tako, da je vsak obkrožen s šestimi sosednjimi gradniki. Na sliki 3.10 je ponazorjen

izsek iz takšne razporeditve. Naslednjo ravnino gradnikov je možno najgosteje prilagoditi prvi ravnini tako, da le ti zavzamejo proste kotanje v prvi ravnini.



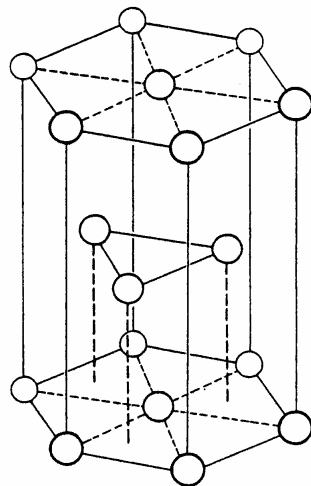
Slika 3.10 Razporeditev gradnikov

Ta mesta so označena na sliki 3.11 s črko B. Za razporeditev gradnikov v naslednjem sloju obstajata le dve možnosti in sicer namestitve gradnikov na mesta označena z A oziroma s C. Pri najgostejši heksagonalni razporeditvi se posamezni sloji **vedno** ponavljajo v zaporedju ABAB... (Vrstni red ABCABC pa tvori drugačno kristalno geometrijo).



Slika 3.11 Najgostejša možna razporeditev gradnikov v treh ravninah

Slika 3.12 kaže princip heksagonalne kristalne zgradbe. Pri tej in pri ostalih predstavitev bodo gradniki v primerjavi z dejansko geometrijo mreže močno pomanjšani. Na ta način lahko opazujemo tudi gradnike v ozadju kristalne strukture. Dejansko si moramo predstavljati, da se krogle v skladu s sliko 3.10 med seboj dotikajo in da je vsak atom v isti ravnini obkrožen s šestimi sosednjimi atomi. Poleg tega leži v kotanji med tremi gradniki iz zgornje plasti, ki se ga dotikajo. Skupaj ima torej en atom v heksagonalni strukturi 12 sosednjih atomov. Če so krogle enako velike, potem je to tudi največje možno število, zato govorimo o najgostejšem skupku krogel oz. gradnikov.



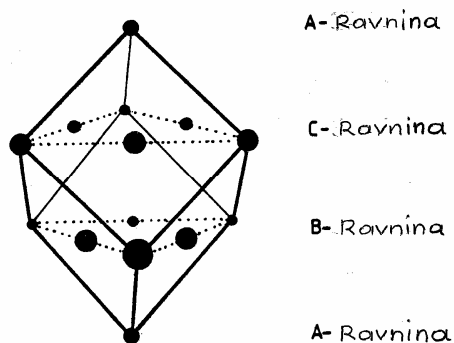
Slika 3.12 Heksagonalna kristalna celica

V to strukturo kristalizirajo atomi z enakimi premeri s krogelno simetričnimi medatomske silami. Snovi s kovalentno vezjo ne kristalizirajo v to obliko, ampak že izkazujejo neke vrste usmerjenost. Tudi snovi, ki so povezane z ionsko vezjo ne kristalizirajo v to strukturo, ker so sestavljene iz atomov različnih velikosti.

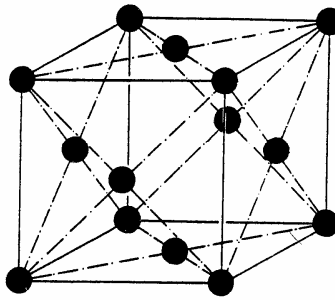
V najgostejšo oz. heksagonalno strukturo kristalizirajo snovi kjer delujejo kovinske ali Van der Waalove vezi (Be, Cd, Co- α , Cr- β , He, Mg, Ti, Ni- β , Sn- γ , Zn, itd.).

3.2.2 Kubično-ploskovno centrirana kristalna celica

V prejšnjem poglavju smo si ogledali najgostejšo prostorsko razporeditev atomov, kjer se plasti izmenjujejo v zaporedju ABAB. Poleg te pa so v naravi zelo pogoste strukture z daljšo periodo tipa ABCABC... Na sliki 3.13 vidimo prostorsko porazdelitev takšne strukture. Narisani so le tisti gradniki posameznega sloja, ki obenem tvorijo tudi osnovno celico kristala. Poleg gradnikov v ogliščih kocke, so le ti razporejeni tudi v središčih ploskev.



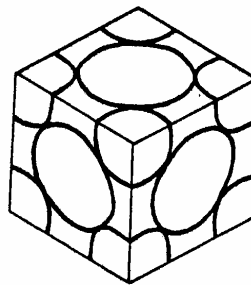
Slika 3.13 Kubično-ploskovno centrirana kristalna celica



Slika 3.14 Kubično-ploskovno centrirana kristalna celica

Slika 3.14 kaže običajno predstavitev kubično-ploskovno centrirane celice. V tej celici je vsak gradnik obdan z 12. sosodnjimi gradniki. V ravnini ima vsak gradnik 6 sosodnjih gradnikov, v zgornji in spodnji pa še po tri, torej skupno 12.

Slika 3.15 kaže kubično-ploskovno centrirano elementarno celico v prostoru, kjer se gradniki med seboj dotikajo. Iz slike je razvidno, da so v eni elementarni celici 4 gradniki. Eno osnovno celico tvori 6 polovic in 8 osmink, torej skupno 4 celi gradniki.



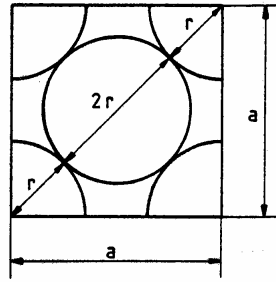
Slika 3.15 Zasedenost kubično-ploskovno centrirane kristalne celice

Tudi ta kristalna mreža je ena najgostejših, saj ima vsak gradnik 12 sosodnjih gradnikov. Da bi lahko določili merilo za gostoto osnovne kristalne celice, definiramo naslednjo zvezo:

$$P = \frac{\text{Volumen gradnikov}}{\text{Volumen osnovne celice}} \quad (3.10)$$

Volumen kubično-ploskovno centrirane kristalne celice lahko izračunamo s pomočjo polmera gradnika. Slika 3.16 kaže sprednjo ploskev osnovne celice. Če izrazimo stranico celice s polmerom gradnika, dobimo:

$$a = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot r. \quad (3.11)$$



Slika 3.16 Ploskev osnovne kristalne celice

Atomska gostota celice je torej:

$$P = \frac{4 \text{ Atomi} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}}{a^3} = \frac{4 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}}{8 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot r^3} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} = 0,74 = 74 \% \quad (3.12)$$

Ta vrednost pa ne velja le za to strukturo, ampak tudi za heksagonalno strukturo kristalov z zaporedjem plasti ABAB....

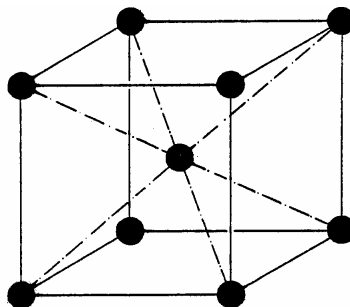
V to obliko kristalizira več kovin:

- Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe- γ , In, Ni, Pa, Pb, Pt Sn- α ,

Med žlahtnimi plini, kjer med njimi delujejo v glavnem Van der Waalsove sile, kristalizirajo v tej obliki tudi Ne, Ar, Kr, Xe in Rn.

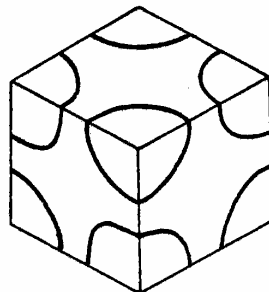
3.2.3 Kubično-prostorsko centrirana kristalna celica

Pri tej strukturi so zasedena oglišča in središče kocke (slika 3.17).



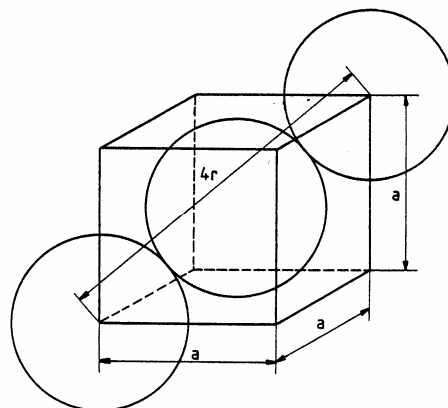
Slika 3.17 Kubično-prostorsko centrirana kristalna celica

Gradniki se dotikajo vzdolž diagonale, pri čemer so ostali gradniki med seboj nekoliko razmaknjeni. To je razvidno iz prostorske predstavitve osnovne celice na sliki 3.18. V osnovni celici sta torej dva gradnika, in sicer gradnik v središču kocke ter osem osmink gradnikov v ogliščih kocke.



Slika 3.18 Zasedenost kubično-prostorsko centrirane kristalne celice

Iz slike 3.17 je razvidno, da vsak gradnik v tej porazdelitvi meji z 8 sosednjimi gradniki, zato lahko pričakujemo tudi nižjo gostoto gradnikov v osnovni celici.



Slika 3.19

Ker je prostorska diagonala enaka dolžini 4 polmerov gradnika (slika 18), lahko zapišemo zvezo med stranico kocke in polmerom gradnika:

$$a = \frac{4 \cdot r}{\sqrt{3}} \quad (3.13)$$

Gostota kubično-prostorsko centrirane mreže je torej enaka:

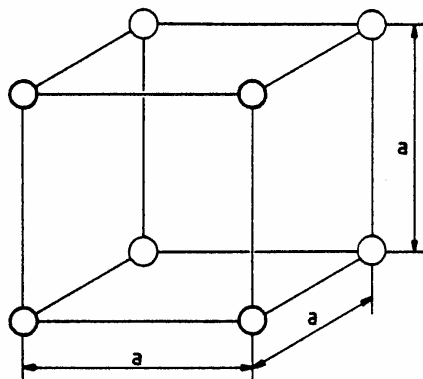
$$P = \frac{2 \text{ Atoma} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}}{a^3} = \frac{2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}}{\frac{64 \cdot r^3}{3 \cdot \sqrt{3}}} = 0,68 = 68 \% \quad (3.14)$$

Vidimo, da je gostota atomov v tej strukturi manjša od tiste pri kubično-ploskovno centrirani strukturi ali pri heksagonalni, kjer je 74 %.

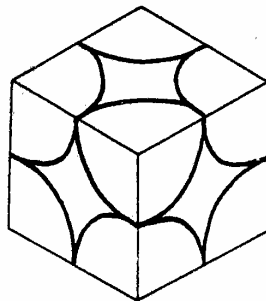
Na ta način kristalizirajo: Cs, K, W itd.

3.2.4 Enostavna kubična kristalna celica

Strukturo osnovne celice vidimo na sliki 3.20. Gradniki so razporejeni le v ogliščih kocke in se dotikajo eden drugega.



Slika 3.20 Enostavna kubična kristalna celica



Slika 3.21 Razporeditev gradnikov v osnovni celici

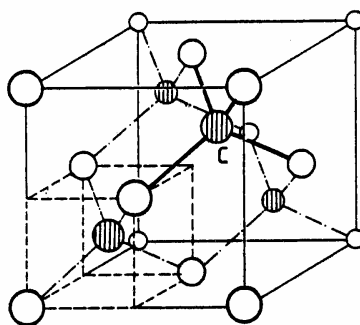
Na sliki 3.21 vidimo, da ima vsak gradnik šest sosednjih atomov, če seveda upoštevamo tudi sosednje osnovne celice. Vsaka celica vsebuje le po en gradnik, ki je sestavljen iz 8 osmink gradnika. Gostota osnovne celice je torej:

$$P = \frac{1 \text{ Atom} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}}{a^3} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{(2 \cdot r)^3} = 0,52 = 52 \% \quad (3.15)$$

Ta struktura ima le manjši praktični pomen. Le Polonij (Po) kristalizira v osnovno romboedrično obliko, poleg tega pa v eni modifikaciji tudi v enostavno kubično strukturo.

3.2.5 Zgradba diamanta

Ta struktura je značilna za kovalentne vezi. Pri tej obliki je vsak ogljikov atom povezan še s 4 sosednjimi atomi ogljika. Rezultirajoča kristalna struktura je prikazana na sliki 3.22. V mreži je lepo vidna osnovna tetraederska struktura štirih atomov. Vsak atom ima štiri sosede, pri čemer je osnovna celica relativno prazna.



Slika 3.22 Zgradba kristalne celice diamanta

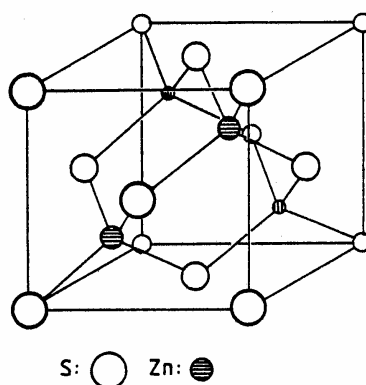
To strukturo si lahko predstavimo z dvema kubično-ploskovno centriranima sistemoma, kjer imata oba sistema smer prostorske diagonale in sta za četrtno diagonale premaknjena.

Ta struktura ima še posebno v elektrotehniko velik pomen. Poleg ogljika kristalizirajo v to obliko še Si, Ge, snovi torej, ki imajo posebno vlogo v polprevodniški tehniki.

3.2.6 Kristalna zgradba ZnS

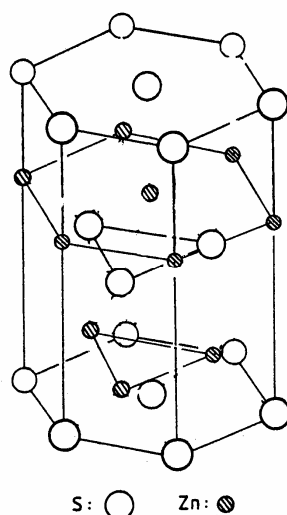
Kristal ZnS spada med najpomembnejše kristalne strukture z ionsko vezjo. Poleg te so še npr. NaCl, CsCl. V osnovi je podobna diamantni strukturi in jo lahko opišemo z dvema kubično-ploskovno orientiranima celicama ki sta med seboj premaknjeni. V tem primeru sta obe mreži zapolnjeni z različnimi atomi. Tako dobimo ploskovno centrirano strukturo, ki je zasedena z žveplovimi atomi in drugo, prav tako ploskovno centrirano s cinkovimi atomi.

Na sliki 3.23 vidimo strukturo, kjer je upoštevana tudi razlika v velikosti obeh atomov. Pri tej strukturi igra pomembno vlogo ravno razlika v velikosti atomov, ki odloča o razporeditvi atomov v obeh omenjenih celicah.



Slika 3.23 Zgradba kristalne celice ZnS

Druga možna oblika kristalizacije ZnS je prikazana na sliki 3.24. Večji žveplovi atomi tvorijo heksagonalno ravnino, v kotanjah med njimi pa so razporejeni cinkovi atomi. Pomembna lastnost ZnS je, da lahko v odvisnosti od temperature kristalizira v dve obliki - govorimo o polimorfnosti.

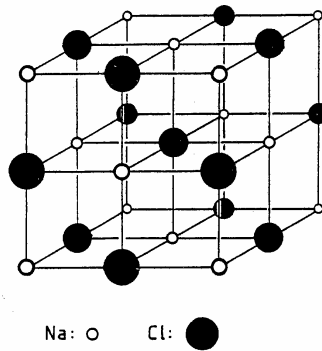


Slika 3.24 Druga oblika kristalizacije ZnS

3.2.7 Zgradba NaCl

Tudi ta kristalna oblika, ki je prikazana na sliki 3.25, temelji na ionski vezi. Vsak ion ima šest sosednjih ionov oz. ionskih parov. Natrijevi ioni tvorijo ploskovno centrirano kristalno celico. Če si zamislimo prostorsko razporeditev ionov, potem je razvidna tudi ploskovno-centrirana razporeditev Cl ionov, ki je napram prvi premaknjena za polovico osnovne stranice. Ker so Cl ioni precej večji od Na ionov, je ploskovno-centrirana mreža Cl bolj gosta, Na ioni pa so v

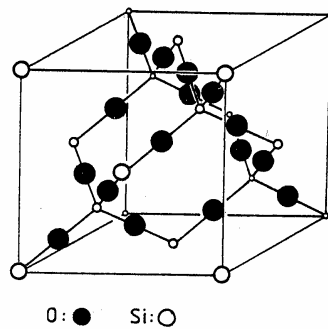
oktaedrsko razporejeni v vmesnih kotanjah (s šestimi sosednjimi atomi). V tej obliki kristalizirajo za elektrotehniko pomembni keramični materiali.



Slika 3.25 Kristalna zgradba NaCl

3.2.8 Tetraedrska osnovna kristalna celica SiO₂

V osnovni kristalni celici je 8 silicijevih in 16 kisikovih atomov.



Slika 3.26 Kristalna zgradba SiO₂

4. KOVINSKI MATERIALI

Veliko snovi v trdnem, tekočem in v določenih pogojih tudi v plinastem stanju prevaja električni tok. Glede na to, v kolikšni meri se ta lastnost kaže in glede na način prevajanja, razlikujemo prevodnike, polprevodnike in izolatorje.

Meje med temi tremi skupinami niso natančno določene. V praksi štejemo med prevodnike tiste snovi, ki imajo specifično električno upornost do $10 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ oziroma specifično prevodnost večjo od $0,1 \text{ S m}/\text{mm}^2$. Med polprevodnike štejemo tiste materiale, ki imajo specifično upornost med 10 in $10^{12} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, medtem ko tiste z višjo specifično upornostjo uvrščamo med izolatorje.

Po vrsti nosilcev električnega toka ločimo snovi, kjer prevajanje omogočajo valenčni elektroni, tj. elektroni na zunanji atomski obli in snovi, kjer so nosilci toka ioni. V slednjem primeru prihaja do gibanja ionov, kar povzroča tudi prerazporeditev mase sredstva, ki prevaja (nanašanje kovin).

Poglejmo si še nekoliko поблиže dogajanje v atomih, ki odloča o prevodnosti. Pri tem se bomo omejili na poenostavljene razlage kvantne mehanike. Elektroni zavzemajo določen energijski nivo, ki je odvisen od njegove oddaljenosti od jedra. Ti energijski nivoji so diskretni, prehodi elektronov z enega nivoja na drugega pa so povezani s pridobivanjem oziroma oddajanjem energije. Če se atom seli iz zunanje oble na notranjo, pri tem odda energijo v obliki sevanja. V nasprotnem primeru je potrebno elektronu energijo dodati. Na posamezni obli je lahko le določeno število elektronov. Običajno se nahajajo na oblah z nižjo energijo tj. bližje jedru. V kristalnih strukturah pa te poti elektronov zaradi medsebojnih sil niso več tako natančno določene, kot pri posameznih atomih. Pri tem imajo glavno vlogo elektroni v zunanji obli. Ti ti. valenčni elektroni so po eni strani vezani na jedro atoma, po drugi strani pa se povezujejo z ostalimi atomi ali pa se celo izločijo iz lastne atomske strukture. Z dovajanjem energije se lahko z zunanje oble dvignejo še na višji energijski nivo. Na ta način postanejo prosti in omogočajo električno prevodnost. Po zakonih kvantne mehanike, kjer lahko elektroni zavzamejo le določen energijski nivo, se lahko med stanjem, ko elektron še ne zapusti lastnega atoma in stanjem električne prevodnosti nahaja ti. prepovedano področje, v katerem ni nobenega elektrona. Širina tega področja določa električne lastnosti snovi. Če je prepovedano območje tako široko, da pri normalni temperaturi ni zadosti energije za prehod elektrona iz zunanje oble na ti. prevodni nivo, potem je material izolator. Če se oba ta dva

nivoja prekrivata in elektroni z lahkoto dosegajo prevodni nivo, je na voljo vedno dovolj elektronov za prevajanje. V to skupino uvrščamo kovine, ki so na splošno dobri prevodniki. Obstaja še tretja možnost, pri kateri je prepovedano območje sorazmerno ozko. Če dovajamo toploto, potem lahko le določeno število elektronov preide na prevodni nivo. Zaradi omejene zmožnosti prevajanja električnega toka imenujemo te materiale polprevodniki.

Vsak elektron pri prehodu iz valenčnega na ti. prevodni nivo pusti za seboj prazno mesto. Pri kovinah se ta praznina zapolni z novim elektronom. Nosilci toka so le elektroni na prevodnem nivoju zato govorimo o elektronski prevodnosti.

Pri polprevodnikih ostaja vrzel naprej nezapolnjena in potuje ob prisotnosti električnega polja kot pozitivni naboj proti negativnemu polu. Pri polprevodnikih je prevajanje omogočeno zaradi gibanja elektronov in zaradi gibanja vrzeli na valenčnem nivoju.

Pri gibanju vzdolž kristalne strukture kovine prihaja do trkov elektronov s kovinskimi ioni. Elektroni pri tem oddajo del kinetične energije, ki se pretvori v toploto. Število trkov določa električno upornost. Energija, izgubljena ob trku, segreva kovino oz. prevodni material. Verjetnost trka je tem večja, čim večja je amplituda nihanja iona okrog svoje osnovne lege. Ker je amplituda odvisna od temperature, je to tudi vzrok za zmanjšanje električne prevodnosti pri višjih temperaturah. Pri zlitinah je verjetnost trkov še večja. Vzrok temu je spremenljiva struktura snovi. Zlitine so načeloma manj prevodne kot njihova prevladujoča komponenta oz. čiste kovine. Dodatki, ki zmanjšujejo električno prevodnosti, pa lahko popravijo njihove mehanske lastnosti.

Plini in pare, kakor tudi kovinske pare v običajnih pogojih niso prevodni. Ko pa jakost električnega polja naraste prek kritične vrednosti, pri kateri pride do ionizacije, le ti postanejo prevodni. Zasledimo tako ionski kakor tudi elektronski način prevajanja električnega toka.

Od trdnih snovi so kovine in njihove zlitine najpomembnejši prevodniki v elektrotehniki. Skoraj vse kovine, ki se pojavljajo v naravi samorodne, kristalizirajo po kubičnem sistemu. Njihove kemične vezi so kovinske.

Nekatere kovine lahko kristalizirajo v različnih vrstah kristalnih mrež. Pravimo, da so take kovine polimorfne, kristalne oblike pa imenujemo modifikacije, ki jih označimo z grškimi črkami α , β , γ ...

Prehajanje ene kristalne strukture v drugo imenujemo premena ali prekrystalizacija. Najbolj pogosti razlog za premeno je temperatura.

Dobra toplotna in električna prevodnost sta lastnosti, ki sta pri teh materialih medsebojno povezani. Ker je prenos energije vezan na gostoto in gibljivost elektronov velja, da so dobri električni prevodniki obenem tudi dobri prevodniki toplote.

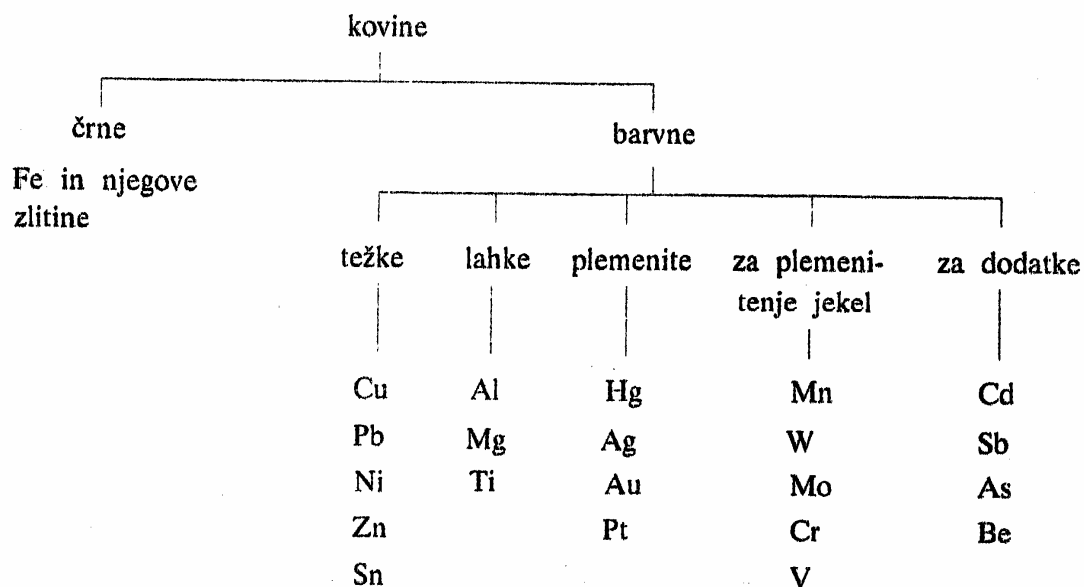
4.1 Razdelitev kovin

Kovine so materiali, ki jih odlikuje vrsta karakterističnih lastnosti: neprozornost, značilen sijaj, dobra električna in toplotna prevodnost ter tehnološke sposobnosti litja, termomehanske obdelave, spajanja in kovanja.

Kovine delimo na dva načina. Po prvem uporabimo periodični sistem, po katerem jih delimo v štiri skupine:

- Prva glavna skupina (Li, Na, K, Rb, Cs in Fr),
- Druga glavna skupina (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra),
- Tretja skupina (Al, Sc, Y, La in lantanidi),
- Redke zemlje.

Drugi način razdelitve kovin je bolj praktičen. Ta delitev ni povsem dosledna, se pa največkrat uporablja:



4.2 Nastanek kovinskih kristalov

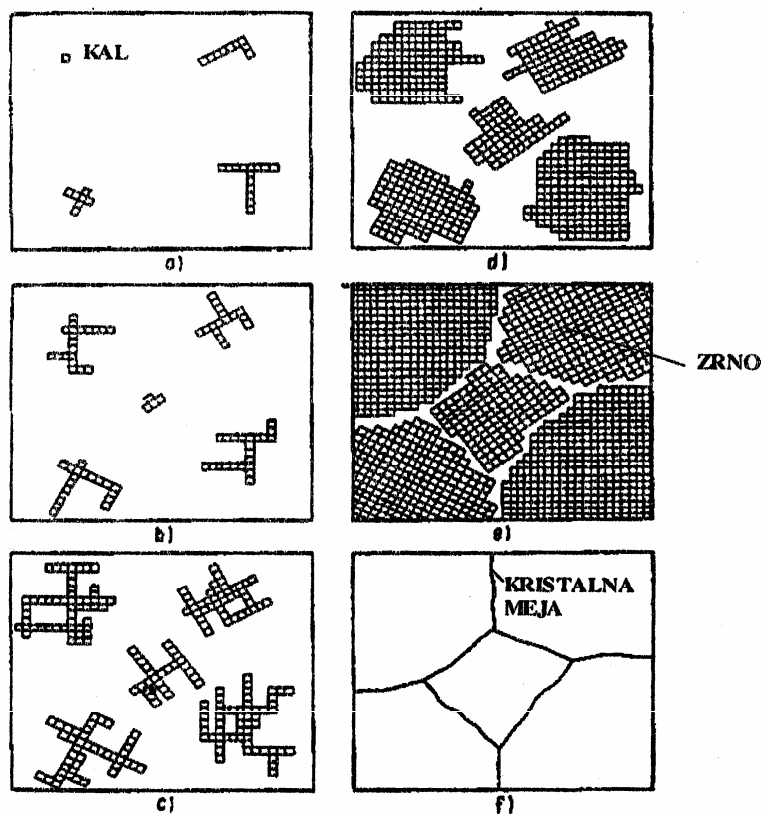
V talini imajo delci precejšnjo gibalno energijo. Pri ohlajanju taline je energija gibanja delcev vedno manjša. Zmanjšujejo se tudi medatomske razdalje. Delci z manjšo energijo se najprej približajo drug drugemu in to tako, da začnejo med njimi vladati medsebojne sile, ki jih držijo v takšni razdalji, ki **pomeni najmanjši energijski nivo**, obenem pa je to razdalja med središči delcev elementarne celice. Tako nastane kristalizacijska kal. V tem redu, kot se je uredila **kristalizacijska kal**, se začnejo urejati zdaj še ostali delci taline, ki se ohlaja. Dobimo kristal. Za nastanek kristala potrebujemo torej kal. Ta nastane na **najhladnejšem mestu**. Teh mest je običajno več - posebej na robu ulitka. Smer rasti kristala je določene s postavitvijo kali. Ker raste več kristalov naenkrat, se zadenejo drug v drugega, s čemer se nadaljna rast kristalov ustavi.

Tako nastale kristale imenujemo **kristalna zrna**, ki so na splošno v prostoru različno orientirana (Sl. 4.1). Snov, ki je sestavljena iz kristalov, imenujemo **kristalit ali polikristal**. Kristalna zrna so med seboj ločena s **kristalnimi mejami**. Tu preide orientacija kristalne mreže enega kristala (zrna) v **orientacijo** kristalne mreže drugega zrna. Kristali v mejnih prostorih so deformirani. V teh prostorih so lahko odloženi tudi delci snovi, ki niso vključeni v osnovno kristalno mrežo. Čeprav so te meje zelo ozke, jih lahko odkrijemo s primernim jedkanjem. **Velikost kristalov** (zrn) v nekem predmetu **je odvisna od števila kali**. Če nastane samo ena kal in se iz te razvije enako orientiran kristal v celotnem prostoru, govorimo o **monokristalu**.

V tem primeru se strogo določena razvrstitev osnovnih delcev ponavlja do fizičnih meja snovi. Takšne kristale uporabljamo npr. v **polprevodniški tehniki** (Ge, Si).

Če ohladimo predmet počasi, potem je **malo mest z nižjo temperaturo** in tako **ni veliko možnosti za nastanek kali**. Nastane majhno število kali, **predmet ima velike kristale** - govorimo, da **je predmet grobozrnat**.

Pri **veliki hitrosti ohlajanja nastane istočasno več kali**. Na ta način dobimo veliko število majhnih kristalov in **predmet je fino zrnat**. Seveda je velikost kristalov odvisna tudi od **hitrosti rasti kristala**. V talino lahko damo tudi **dodatke** (drobne kristale), ki **pospešujejo nastanek kali**. Govorimo o "cepljenju" taline.



Slika 4.1 Prikaz rasti kristalov

Kadar imajo kristali **enotno orientacijo**, govorimo da ima kovina **teksturo**. Zaradi tega ima **usmerjene lastnosti**, ki jih koristimo predvsem pri magnetnih materialih. Mehanske lastnosti kovinskega materiala so močno odvisne od vrste kristalov. **Pri kovinah je v splošnem finoizrnatost zaželena.**

S posebnimi **postopki lahko spremenimo kristalno** strukturo predmeta: govorimo o **rekristalizaciji**.

V neki polikristalni zgradbi rastejo kristali v različnih smereh in z različnimi hitrostmi. Zaradi tega so smeri prostorskih mrež in s tem usmerjene lastnosti kristalov različne.

Anizotropne lastnosti posameznih kristalov v kovini se tako približno izravnavajo. Rečemo, da je kovina "kvazi izotropna" - torej skoraj tako kot izotropna.

Anizotropija pa se pojavi npr. takrat, ko polikristalni material mehansko oblikujemo tako, da nastopi usmerjena plastična deformacija, ki nastane npr. pri **hladnem preoblikovanju** kovin, kot so valjanje pločevine in vlečenje žice. S takšnim postopkom **dosežemo usmerjeno poravnavanje kristalov**. Usmerjeno poravnane kristale imenujemo **tekstura**. Po pravilu bo kovina **po hladnem preoblikovanju trša in trdnejša**.

Hladno preoblikovanje, ki plastično deformira kovino, **povzroča spremembo lastnosti in anizotropijo**. Mnogokrat spremembe lastnosti po hladnem preoblikovanju niso zaželeni. Večkrat pa si jih želimo: povečanje trdnosti žice, izboljšanje magnetenja v smeri valjanja pri transformatorski pločevini.

Stopnjo plastične deformacije izračunamo s pomočjo enačbe:

$$V(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

A_0 - začetni presek (pred preoblikovanjem)

A - presek po preoblikovanju

V splošnem hladna plastična deformacija kovine spremeni njene lastnosti:

- a) **jo utrdi** (trdi baker, trdi aluminij)
- b) **poveča njeno električno upornost**, kemično reaktivnost in energijo kristalne mreže.

Kovine namreč **pri hladni plastični deformaciji absorbirajo neko določeno energijo in so zaradi tega v metastabilnem stanju**. Zato lahko **spmembe**, ki so nastale pri hladnem preoblikovanju, **z žarjenjem zopet odpravimo**. Tekom žarjenja potekata v materialu dva **procesa: poprava kristala ter rekristalizacija**. Pri tem lahko dobimo tudi drugo vrsto **teksture**.

4.2.1 Poprava kristala

V le malo hladno preoblikovanem materialu imamo v glavnem premaknjene in malo deformirane kristalne mreže. Notranje napetosti v mreži so majhne. **Z dodajanjem energije** v obliki toplote postanejo **ioni bolj gibljivi**. **Premaknjenost in deformacije se odpravijo**. Zgradba snovi in oblika kristalov se ne spremenita. S popravo kristala se spremenijo fizikalne lastnosti. **Električna prevodnost dobi zopet isto vrednost kot pred hladnim preoblikovanjem**. **Mehanske lastnosti se v glavnem ne menjajo**.

4.2.2 Rekristalizacija

Pri močno hladno preoblikovanih materialih ne nastopijo le močne deformacije ampak **tudi porušitve kristalov**. Z dodajanjem energije (segrevanje), ne nastopi **samo vračanje v prvotne oblike celih kristalov**, ampak **dobijo drobci razdrobljenih kristalov vlogo kristalizacijskih kali**, ki omogočajo rast novih kristalov. Čim večje so bile deformacije

pri hladnem preoblikovanju, toliko **bolj fino**zrnato strukturo dobimo. Proces nastanka novih kristalov pri isti vrsti mreže imenujemo rekristalizacija. S tem so posledice hladnega preoblikovanja povsem **odpravljene**, material postane **ponovno mehak** in nadaljnje hladno preoblikovanje je zopet omogočeno. Da se lahko **rekristalizacija začne**, pa moramo materialu **dovesti zadosti energije**. V tabeli 4.1 so podane temperature, pri katerih se odvija proces rekristalizacije.

Kovina	Temperatura prežarjenja [°C]
W	1100
Mo	1000
Ti	800
Ni	660
Fe, Pt	450
Cu, Ag, Au	150 – 200
Al, Mg	150 – 200
Zn, Cd, Pb, Sn	pod 20

Tabela 4.1 Temperature, pri katerih se vrši rekristalizacija nekaterih kovin

Te temperature imenujemo **minimalne temperature rekristalizacije**. S to temperaturo je neposredno povezana **toplotna obstojnost materiala**. Materiali z višjo temperaturo rekristalizacije so toplotno bolj obstojni.

Iz zgornje tabele je razvidno, zakaj ne moremo Zn, Cd, Pb in Sn mehansko ojačati s hladnim preoblikovanjem, saj že med samim mehanskim preoblikovanjem pride do obnove kristala in rekristalizacije. Zato tudi pri teh ni razlike v kvaliteti oz. lastnostih materiala, če je npr. hladno ali vroče valjan.

Lastnosti kovine je možno s hladnim preoblikovanjem spremeniti le takrat, kadar ima material tekom hladnega preoblikovanja nižjo temperaturo, kot je temperatura rekristalizacije.

Z obnovo kristala ali rekristalizacijo dobimo material močno podoben prvotnemu. Ker s tem odpravimo notranje napetosti, govorimo tudi o popuščanju. Govorimo o **mehkem** (popuščenem ali žarjenem) bakru, aluminiju itd.

4.3 Sestavljeni materiali, zlitine

Čiste kovine zelo težko pridobivamo, poleg tega pa se v tehniki malo uporabljajo. V splošnem so bolj uporabne njihove zlitine ali legure.

Zlitine so zmesi najmanj dveh kovin ali kovin in nekovin v trdnem stanju.

Sestavine zlitine imenujemo **komponente**. Skupnost vseh komponent v zlitini imenujemo sistem. Lot npr. je zlitina, ki se najpogosteje sestoji iz svinca in kositra. Svinec in kositer sta komponenti, ki sestavljata dvojni ali binarni sistem.

V trojnem sistemu so prisotne tri komponente. Sisteme, v katerih so več kot tri komponente, imenujemo večkomponentne in jih je grafično nazorno zelo težko prikazati. Razmerja mešanja komponent A : B imenujemo koncentracija, ki jo navadno podajamo v masnih odstotkih. Npr. koncentracija zlitine Sn – Pb, 60/40 pomeni: v 100 g te zlitine je 60 g Pb in 40 g Sn.

Zlitine imajo drugačne lastnosti kot čiste kovine; imajo drugo trdoto, raztezke, trdnost, električno in toplotno prevodnost. Ker so lastnosti zlitin odvisne od vrste in količine komponent, lahko naredimo kovinske materiale s povsem določenimi lastnostmi, kot npr. nerjavna ali nemagnetna jekla.

4.3.1 Zlitine dveh komponent

a) Topnost komponent

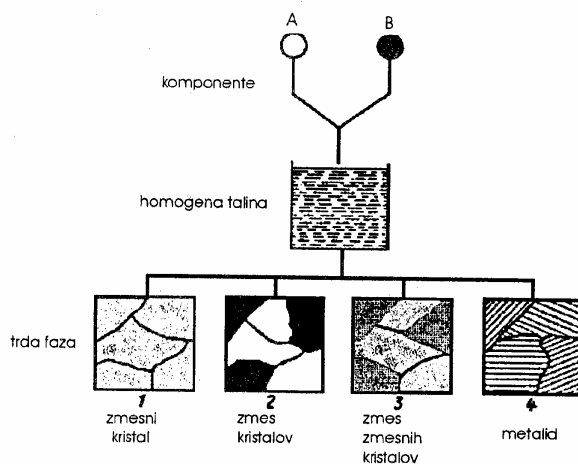
Znano je, da lahko vodo in alkohol mešamo v poljubnem razmerju. Obe tekočini sta med seboj popolnoma topni. Nasprotno pa se Hg v vodi ne topi: oba materiala sta v vodi popolnoma netopna. Med mejama popolne netopnosti in popolne topnosti je področje delne topnosti. Komponente v talinah kovin, ki jih lahko opazujemo kot tekočine (talina = staljena zlitina) so lahko popolnoma topne ali delno topne. Poleg tega se lahko pojavijo še kemične spojine t. i. intermetalne spojine ali metalidi. Če komponente že v tekočem stanju med seboj

niso topne, kot npr. Pb in Fe (obe kovini sta povsem ločeni ena od druge), potem po strjevanju ne moremo dobiti zlitine.

Pogoj za tvorbo zlitine je homogena talina, ki je raztopina vseh komponent.

Pri strjevanju homogene taline ločimo v odvisnosti od komponent, v principu, štiri oblike topnosti v trdnem stanju:

1. *Popolna topnost.* Komponente gradijo pri strjevanju iz taline skupno kristalno mrežo; torej se v osnovni (elementarni) celici nahajajo atomi ene in druge komponente. Komponente so se v trdnem stanju popolnoma stopile med seboj in se jih ne da razdvojiti. Pod mikroskopom opazimo, da tvori zlitina homogene kristale trdne raztopine – zmesne kristale (Sl. 4.2 - 1). α je trdna raztopina komponente B v A, β je trdna raztopina komponente A v B.
2. *Popolna netopnost.* Vsaka komponenta gradi svoje kristale, ki se jih da razdvojiti. V vsaki elementarni celici imamo predstavnika le ene kovine. Komponente so v trdnem stanju popolnoma netopne – dobimo mehansko zmes kristalov obeh komponent (Sl. 4.2 - 2).
3. *Talina se topi delno;* t. j. komponente so v trdnem stanju med seboj delno ali omejeno topne. V odvisnosti od koncentracije dobimo v trdnem stanju samo zmesne kristale pomešane med seboj. (Sl. 4.2 - 3).
4. Komponente lahko tvorijo tudi kemične spojine, imenovane intermetalne (medkovinske) spojine, metalide (sl. 4.2 - 4). Te spojine imajo komplicirane kristalne mreže, ki se razlikujejo od mrež komponent. Metalidi so zelo trdi in krhki, imajo malo kovinskih lastnosti, zaradi tega se slabo oblikujejo in so zato največkrat nezaželeni. V to grupo spadajo npr. karbidi, nitridi, oksidi itd.

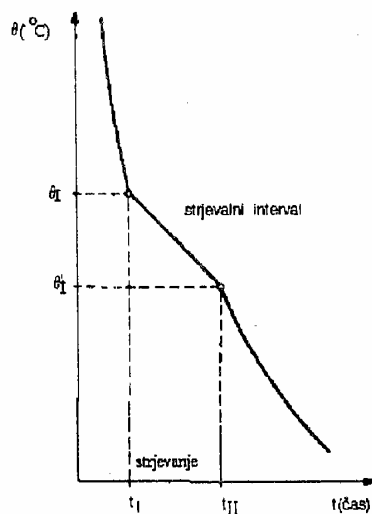


Slika 4.2 Produkti homogene taline

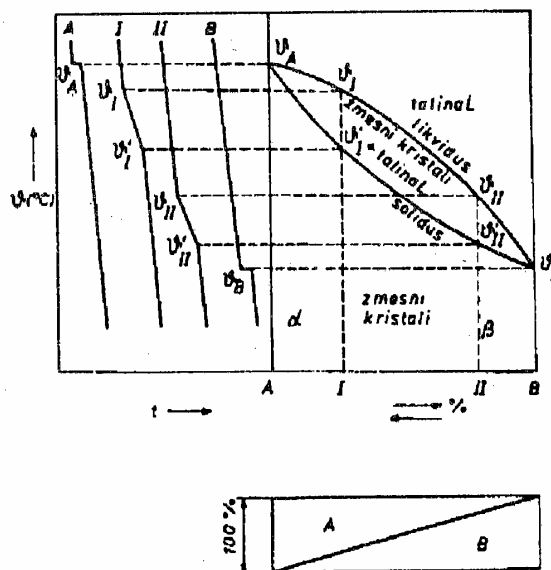
b) Popolna topnost komponent v trdnem stanju.

Zlitine, ki so popolnoma topne v trdnem stanju, tvorijo kot rečeno, zmesne kristale. Krivulja ohlajanja je takšna kot jo kaže slika 4.3.

Strjevanje se prične pri temperaturi ϑ_I in konča pri ϑ_{II} . Taline zlitin kristalizirajo torej v intervalu strjevanja. S pomočjo ohlajevalnih krivulj za posamezne koncentracije lahko dobimo diagram ohlajanja za nek sistem (gl. Sl. 4.4), sestavljen iz komponent A in B. Takšen diagram imenujemo binarni fazni diagram.



Slika 4.3



Slika 4.4

Za posamezne koncentracije si narišemo diagrame ohlajanja in iz prelomnih točk (kolen) ohlajevalne krivulje narišemo ohlajevalni diagram sistema (narisan imamo primer za dve zlitini I in II). V točkah, kjer se prične talina strjevati (ϑ_I , ϑ_{II}), dobimo krivuljo, ki jo imenujemo **likvidus**, spodnjo krivuljo, ki nam predstavlja trdno stanje pa **solidus**. Vmes med obema je zlitina v testastem oz. kašastem stanju. To je v bistvu zmes trdnih zmesnih kristalov (trdna faza α oz. β) in taline (faza L).

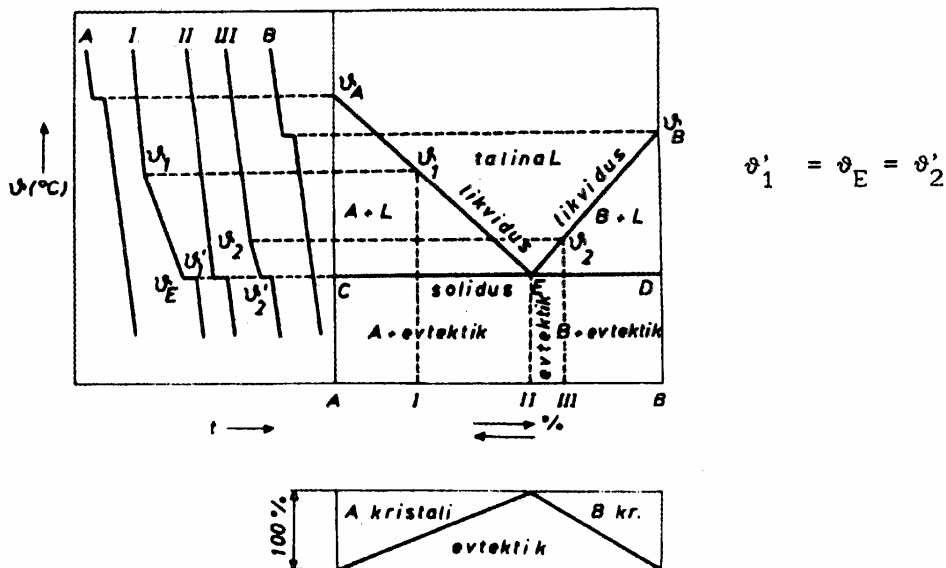
Homogene zmesne kristale pa dobimo le takrat, če ohlajamo zlitino dovolj počasi, da se lahko atomi obeh komponent pravilno razporedijo po kristalni mreži. V kolikor je ohlajanje hitro, se vsi atomi ne morejo enakomerno razporediti po mreži. Takrat dobimo zmesne kristale z različnimi stopnjami koncentracije – nehomogeni zmesni kristali. Takšni kristali v glavnem niso

zaželeni, ker pospešujejo korozijo. To odpravimo s homogenizacijo t.j. z žarjenjem ali tudi s staranjem.

Zlitine s popolno topnostjo v trdnem stanju so npr. zlitine Cu – Ni, ki so zelo uporabne na področju uporavnih materialov, Pt – Ni, Au – Pt in Ag – Pt, ki se uporabljajo predvsem kot kontaktni materiali v tehniki za preklapljanje manjših tokov.

c) Popolna netopnost v trdnem staju

V trdnem stanju obstaja tudi mehanska zmes kristalov komponent. Krivulje ohlajanja zlitin so zdaj drugačne in so sestavljene dejansko iz dveh delov (s stojno temperaturo kot pri čistih kovinah in temperaturnim prehodom, kot pri zmesnih kristalih) – glej sliko 4.5



Slika 4.5 Fazni diagram sistema pri popolni netopnosti

Talina zlitine I začne s strjevanjem pri ϑ_1 , pri čemer se izločijo kristali komponente A. Ker se z ohlajanjem izloča vedno več kristalov komponente (faze) A, postaja talina bogatejša s komponento (fazo) B. Ta doseže pri temperaturi ϑ'_1 določeno koncentracijo, pri kateri se talina strdi. Zlitina III se strjuje analogno kot I, le da se tu izločajo najprej kristali komponente B. Ker je tu komponenta B prevladujoča, se le-ta tudi najprej izloča. Ta zlitina se strdi pri temperaturi ϑ'_2 , ko doseže talina določeno koncentracijo komponente A. Opazimo, da je $\vartheta'_1 = \vartheta'_2$. Solidus linija je tu premica, ki je paralelna abscisi. Zlitina II se strjuje direktno, brez vmesne faze, pri temperaturi ϑ_E .

Likvidus ima obliko črke V. Pri določeni koncentraciji se liniji likvidus in solidus združita - **evtektična točka**. Pri tej koncentraciji se sistem obnaša kot čista kovina, torej preide iz tekočega stanja direktno v trdno (in obratno) – pri evtektični temperaturi. ϑ_E . Snov, ki jo dobimo vedno pri tej zlitini, je sestavljena iz drobnozrnate zmesi kristalov komponent A in B. To fino zmes kristalov imenujemo **evtektik**.

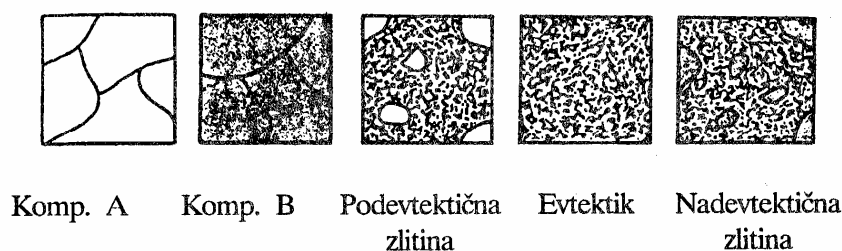
Evtektik je drobnozrnata zmes kristalov sestavin zlitine. Ima povsem določeno sestavo in konstantno strjevalno oz. talilno (evtektično) temperaturo, ki je obenem najnižja v sistemu.

Evtektik se pojavlja v vsaki koncentraciji sistema pri temperaturi ϑ_E . Sistemi, ki so netopni v trdnem stanju so npr. Al - Sn, Bi - Sn, Bi - Cd in Ag - Ni.

Zlitine z evtektično sestavo imenujemo evtektične zlitine. Ker imajo nizka tališča in dobre mehanske lastnosti, so v praksi izredno pomembne. Zlitine dobimo z nižjimi tališči kot jih imajo komponente.

Evtektične zlitine so v binarnih sistemih zelo pogoste. Največkrat pa so te zlitine tudi delno topne v trdnem stanju. Za takšne primere velja le linija likvidus, medtem ko je solidus drugačna.

Razlikujemo še: **pod-evtektične zlitine**, to so zlitine s koncentracijami levo od evtektične zlitine. Vsebujejo zmes komponente (faze) A in evtektika in **nad-evtektične zlitine**, ki ležijo s koncentracijami desno od evtektika in so zmes faze B in evtektika. Grafično so posamezne sestave ponazorjene na sliki 4.6

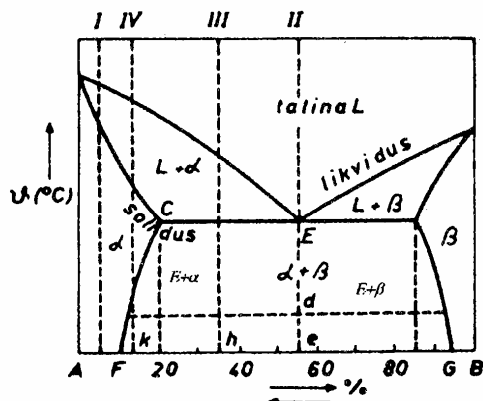


Slika 4.6 Prerez kristalnih zrn pri popolni netopnosti kovin v trdnem stanju

d) Delna topnost v trdnem stanju

Na splošno velja, da je stopnja nasičenja neke mešanice odvisna od temperature. Če neko raztopino, ki je bila nasičena pri višji temperaturi, ohlajamo, se potem odvečna komponenta izloča (primerjava: sol v vodi, vlaga v zraku).

Pri večini zlitin so komponente v trdnem stanju samo delno topne. To se vidi tudi iz sledeče slike za delno topen sistem (Sl. 4.7).



Razlaga:

α ... trdna raztopina B v A
(enako kot pri popolni topnosti)

β ... trdna raztopina A v B
(popolna topnost)

E ... evtektik = $\alpha + \beta$

Slika 4.7 Fazni diagram pri delni topnosti

Opis zlitin:

- I popolna topnost (α kristali),
- II čisti evtektik (zmes zmesnih kristalov α in β),
- III zmes kristalov faze $\alpha + E$ (netopnost),
- IV vidimo kako se koncentracija spreminja s temperaturo (nasičenje).

Pri nižjih temperaturah npr. komponenta A ni v stanju sprejeti enake količine komponente B, zaradi tega se iz zmesnih kristalov α izloča komponenta B, vendar v obliki zmesnega kristala β . Če so ti izločeni delci primerno veliki, se zlitina utrdi (izločevalna utrditev): poveča se trdnost in trdota. Izločanje je v trdnem stanju.

Sistemi, pri katerih imamo delno topnost, so npr. Ag – Cu, Pb – Sn, Pb – Sb, Al – Si.

Mehke spajke, zlitine Pb – Sn, imajo evtektično sestavo. Silumin, zlitina Al – Si, s približno evtektično sestavo ima dobre livne lastnosti.

V elektrotehniko poznamo še zlitine:

Ag – Cu – za kontakte,

Pb – Sb – za kable in akumulatorje.

Če je sestavljena zlitina iz več komponent, je lahko evtektična temperatura zelo nizka. Na primer Woodova kovina (50 % Bi, 25 Sn, 25 Cd) ima talilno temperaturo 70 °C. Znanih je še nekaj takšnih zlitin, ki se uporabljajo v elektrotehniki na področju varovalk.

e) Posebne lastnosti binarnih sistemov

Za elektrotehniko so posebno pomembne spremembe lastnosti zlitin v primerjavi z lastnostmi posameznih komponent. V tem poglavju bomo spoznali le nekaj tipičnih primerov, medtem ko bomo v nadaljnjih poglavjih obravnavali še nekatere druge. Pri dvokomponentnih zlitinah se specifična prostornina zlitin spreminja med specifično prostornino komponente A in komponente B. Glede trdote velja, da lahko ustvarimo takšne zlitine, ki so trše od obeh komponent brez hladnega oblikovanja. Običajno se tej lastnosti pridruži še povišana temperatura rekristalizacije, kar pomeni, da se je povišala tudi temperaturna obstojnost materiala. To s pridom izkoriščamo pri uporovnih materialih za grela. Korozijska obstojnost nekaterih zmesnih kristalov je večja. Tudi povečana električna upornost nam lahko koristi pri uporovnih materialih. Z različnimi koncentracijami komponent v zlitini lahko dosežemo manjši ali večji temperaturni koeficient upornosti. Za vodnike, ki morajo prehajati skozi steklo, pripravimo zlitine, katerim skušamo prilagoditi temperaturni koeficient raztezka tistemu pri steklu. To dosežemo npr. z zlitinami Fe – Ni (npr. invar), Fe – Ni – Cr, Fe – Ni – Co in nekaterimi legiranimi nerjavnimi jekli.

4.4 Materiali za električne vodnike

Pri materialih, ki jih uporabljamo v prvi vrsti za električne vodnike, nas najbolj zanimajo naslednje lastnosti:

- a) specifična električna upornost,
- b) temperaturni koeficient specifične upornosti,
- c) toplotna prevodnost,
- d) trdnost in dolžinski raztezek pri vleku.

V tabeli 4.2 so zbrane najpomembnejše kovine, njihove specifične upornosti in temperaturni koeficienti specifične upornosti.

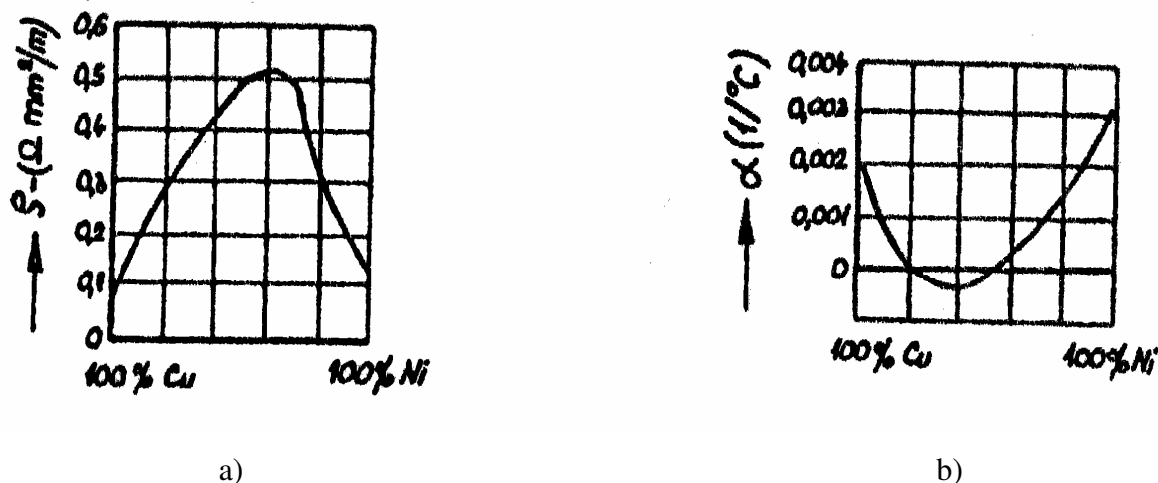
Kovina	Specifična električna upornost [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]	Temperaturni koeficient upornosti [$1/^\circ\text{C}$]
Srebro, Ag	0,0149	0,0041
Baker, Cu	0,0172	0,0043
Zlato, Au	0,0210	0,0040
Aluminij, Al	0,0264	0,0047
Molibden, Mo	0,0500	0,0047
Volfram, W	0,0549	0,0048
Nikelj, Ni	0,0689	0,0067
Železo, Fe	0,0978	0,0046
Platina, Pt	0,0980	0,0039
Živo srebro, Hg	0,941	0,0009

Tabela 4.2 Specifične električne upornosti in temperaturni koeficienti specifične upornosti nekaterih kovin.

Čiste kovine imajo pravilno in enolično kristalno strukturo, kar doprinaša k nizki vrednosti specifične upornosti. Prisotnost drugih elementov povzroča spremembe v kristalni strukturi, ki povečujejo specifično upornost. Do tega povečanja ne prihaja le ob dodajanju nekovinskih primesi ampak tudi pri kovinskih zlitinah, če kristalizirajo skupaj in sicer tako, da so atomi ene kovine vgrajeni v strukturo druge kovine.

Na sliki 4.8a vidimo odvisnost specifične upornosti od zastopanosti posamezne kovine v zlitini. Pri neki sestavi je opazen izrazit maksimum. Z zmanjševanjem zastopanosti ene ali druge kovine v zlitini se vrednost specifične upornosti zmanjšuje in približuje vrednosti, ki jo ima čista kovina.

Prav tako lahko opazimo značilen potek temperaturnega koeficienta specifične upornosti na sliki 4.8b. Pri čistih kovinah je temperaturni koeficient relativno visok, medtem ko je pri zlitinah občutno manjši ali pa celo postane negativen. Do spremembe specifične upornosti kovinskih materialov prihaja tudi zaradi mehanskih deformacij kristalnih struktur.



Slika 4.8 Potek upornosti pri različnih koncentracijah komponent v zlitini a), potek temperaturnega koeficienta upornosti v odvisnosti od koncentracije komponent v zlitini b)

Poleg tega prihaja pri hladni obdelavi, tj. pod pritiskom pri valjanju, vlečenju, izrezovanju ipd. do sprememb mehanskih lastnosti materialov (povečanje trdote, material pridobiva na žilavosti ipd.). Spremembe zaradi mehanske obdelave pa lahko odpravimo z žarjenjem. Obdelan material segrejemo na zadosti visoko temperaturo, nakar ga počasi ohlajamo. Precejšno spremembo specifične upornosti lahko opazimo v točki taljenja. V spodnji tabeli so podani nekateri prevodniki in razmerje med upornostjo v raztaljenem stanju (pri temperaturi tališča) ter upornostjo v trdnem stanju:

Hg	Cu	Ag	Al	Sn	Zn
3,2	2,07	1,9	1,64	2,10	2,09

Tabela 4.3 Razmerja med upornostmi kovin v raztaljenem stanju in upornostmi v trdnem stanju

Pri aplikacijah prevodnikov večkrat naletimo na problem, ko ena od dveh iskanih lastnosti ne ustreza postavljenim zahtevam. Pogosto se izključujeta dobra prevodnost in potrebna mehanska trdnost. Pri vodnikih za električno omrežje železnic čisti Cu ni dober. Uporabnejša postane zlitina s Cd, Cr, ali drugimi elementi s podobnimi lastnostmi. Električna prevodnost zlitine je manjša, kar pomeni, da je potreben večji presek vodnika, ki ima tudi večjo težo.

Obenem pa je obraba manjša, kemične lastnosti so boljše, kar kompenzira povišane materialne stroške.

S čistostjo prevodnih kovinskih elementov ne pretiravamo, sicer bi bili predragi zaradi vseh potrebnih postopkov pri izdelavi. Omenili smo že, da višja koncentracija nečistoč povečuje specifično upornost snovi. To je pomembno zlasti pri vodih za velike razdalje. (npr. prenos energije). Pri raznih povezavah v aparataturah enostavno povečamo preseke. S tem se cena in teža aparature bistveno ne spremenita. Rešimo pa problem segrevanja. Pri prenosu energije pa postanejo to zelo pomembne postavke.

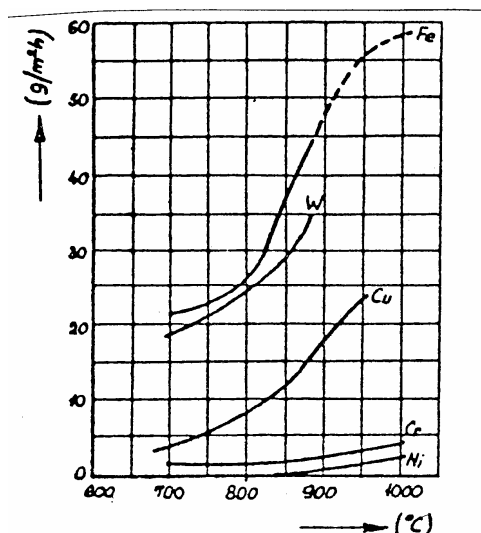
Vemo, da ohmska upornost ni odvisna le od materiala ampak tudi od oblike vodnika in frekvence električnega toka (kožni pojav). Efektivni presek vodnika, ki prevaja el. tok se zmanjša. Pri reševanju tega problema si pomagamo z vodniki, ki so sestavljeni iz več žic - pletenicami, s cevmi s tankimi stenami ipd.

4.5 Materiali z visoko specifično prevodnostjo

4.5.1 Baker

Katere so odlike bakra, ki ga uvrščajo med najpomembnejše prevodniške materiale?

1. Majhna specifična upornost (le srebro ima še nižjo specifično upornost, vendar je bistveno dražje).
2. Ima dokaj dobre mehanske lastnosti.
3. Ima zadovoljivo odpornost proti koroziji. (baker oksidira na zraku tudi pri visoki vlagi počasneje kot železo. Intenzivna oksidacija se začne pri bistveno višji temperaturi, kar je razvidno s slike 4.9.



Slika 4.9 Oksidacija kovin v odvisnosti od temperature

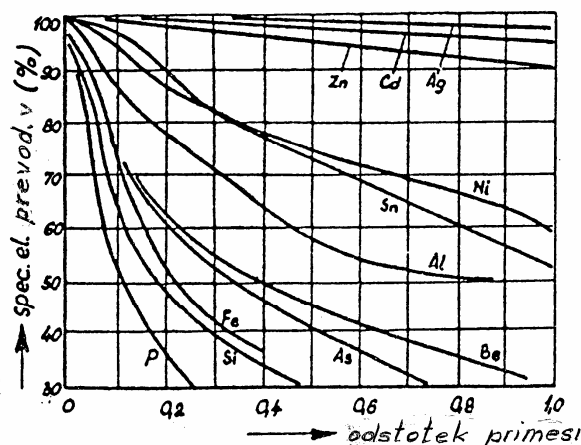
4. Možnost obdelovanja (npr. možno ga je valjati v trakove debeline nekaj stotink milimetra)
5. Spajkljivost in možnost varjenja, kar je pomembno pri montaži elektrotehničnih naprav in strojev.

Baker se s svojo značilno rdečkasto barvo že na zunaj razlikuje od ostalih kovin. Specifična masa bakra je odvisna od nečistoč in se giblje med 8,87 in 8,93 kg/dm³. V elektrotehniko je standardizirana specifična masa E - Cu in znaša 8,9 kg/dm³. Temperaturni koeficient linearnega raztezka ja $17 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Tališče je pri temperaturi 1083°C, temperatura izparevanja pa je 2300°C.

Specifična električna prevodnost je prav tako odvisna od primesi. V kemično čistem mehkožarjenem stanju se prevodnost giblje okrog 60 Sm/mm², oziroma specifična upornost znaša 0,0168 Ωmm²/m.

Po mednarodnih standardih mora imeti baker v mehkožarjenem stanju prevodnost vsaj 58 Sm/mm². To vrednost običajno vzamemo kot referenčno oziroma 100 % vrednost. S to vrednostjo primerjamo prevodnost ostalih materialov in zlitin. Tej vrednosti ustreza specifična upornost 0,017241 Ωmm²/m.

Glede na to, da tehnične vrste bakra vsebujejo nekaj nečistoč, čeprav v zelo majhnih količinah, je treba poznati njihove vplive na specifično prevodnost. Kot je razvidno iz diagrama na sliki 4.10 se prevodnost hitro zmanjšuje že ob prisotnosti manjše količine primesi. Zaradi tega je prevodnost bakra merilo za njegovo čistost. Kot bomo v nadaljevanju videli, pa vplivi, kot npr. hladna obdelava, na električno upornost nimajo tako velikega vpliva.



Slika 4.10 Vpliv primesi na specifično prevodnost bakra

Zanimivo je dejstvo, da prisotnost Ag, Cd in Zn v manjših količinah ne povzroča bistvenega zmanjšanja prevodnosti, medtem ko je vpliv dodatkov P, Fe in Si zelo velik. Tudi dodatek Al, ki je sicer dober prevodnik, znatno poslabša prevodnost bakra. Zanimiv je vpliv O, ki redno nastopa v tehničnem bakru. Glede na to, da baker lahko veže kisik, nastaja bakrov oksid Cu_2O . Če predpostavimo, da je baker kemično popolnoma čist, potem vpliv kisika ni tako izrazit, če seveda gre za manjšo količino (0,02 do 0,04 %).

Ker ima čisti baker najvišjo prevodnost, se za vodnike uporablja le baker, ki ima do 0,01 % primesi in je pridobljen z elektrolizo. Tako pridobljen baker se imenuje tudi katodni. Nato ga lahko še dodatno čistimo s ti. rafiniranim taljenjem, ki se najpogosteje opravi tako, da se talini dodaja manjšo količino lahko oksidirajočih primesi, kot npr. litij, ki se spajajo s kisikom v oksid in ga vodik ne more reducirati.

Pri nadaljnjem postopku pretaljevanja katodnega bakra se taljenje in vlivanje opravlja v zaščitni atmosferi CO_2 , ki ščiti talino pred kisikom vse do strditve. To je ti. Oxygen Free High Conductivity Copper (OFHC) baker s prevodnostjo preko 102 % standardnega mehkožarjenega bakra in z zelo dobrimi mehanskimi lastnostmi. Iz njega lahko vlečemo žice do premera 0,03 mm.

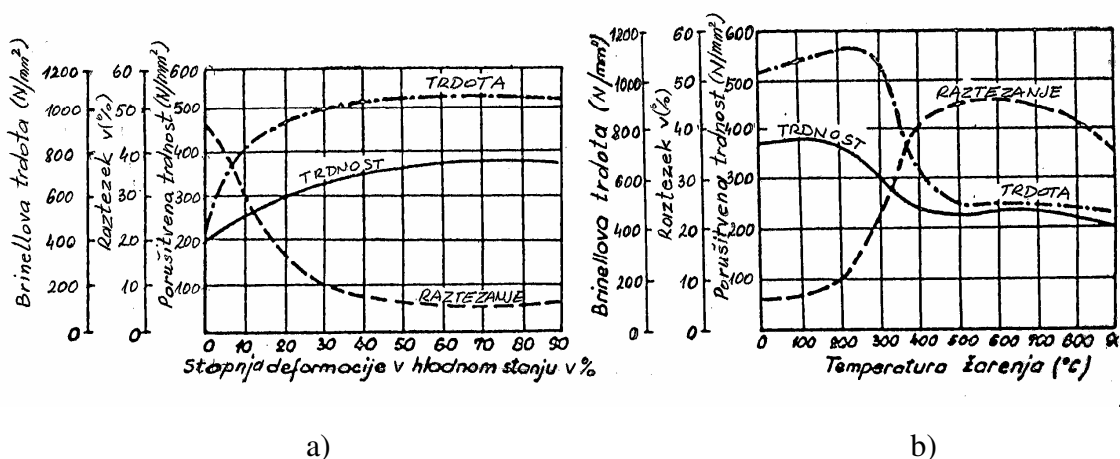
Mehanske lastnosti bakra so prav tako odvisne od primesi. Za elektrolitski mehkožarjeni baker je standardizirana vrednost porušitvene trdnosti 200 N/mm^2 in vrednost relativnega raztezka 40 %. Bolj kot je baker čist, lažje ga oblikujemo.

Iz odlivkov v različnih oblikah se izdelujejo žice, palice, pločevina in cevi. Z valjanjem in vlečenjem izdelujemo profilne okrogle žice.

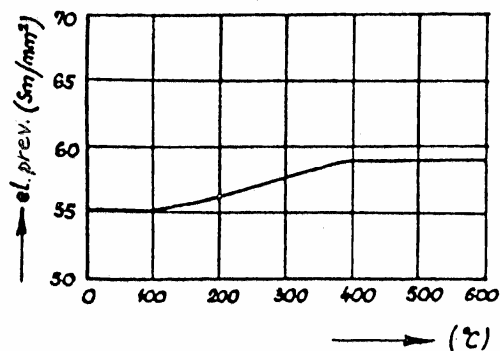
Pri proizvodnji okrogle žice se baker najprej toplo valja na premere 6, 8, 10 ali 12 mm. Valjan se potem luži v raztopini žveplove kisline, da se odstrani temnosivi sloj bakrovega oksida, ki nastane na površini med toplotno obdelavo. Tako pripravljen se potem hladno vleče vse do najmanjših premerov. S hladnim vlečenjem dobimo ti. trdovlečeni baker, ki ima višjo porušitveno trdnost in majhen relativni raztezek. Baker postane tudi bolj "elastičen". Pri običajnem vlečenju je meja mehanske trdnosti $450 - 480 \text{ N/mm}^2$, pri čemer pa raztezek ne znaša več kot 2 - 3 %. Pri tankih žicah, s premerom manjšim od 0,1 mm, lahko porušitvena trdnost po hladnem vlečenju naraste tudi na 600 N/mm^2 .

Če baker po vlečenju še žarimo pri $200 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ in ga potem počasi ohlajamo, dobimo mehkožarjeni baker, ki je relativno plastičen, z manjšo trdnostjo in trdoto ter z večjim relativnim raztezkom. Prav tako se mu nekoliko poveča specifična električna prevodnost. Da bi se izognili oksidaciji, poteka žarjenje v posebnih pečeh brez prisotnosti zraka, oziroma v zaščitni atmosferi vodnih par ali pa inertnega plina.

Vpliv hladne obdelave na mehanske lastnosti bakra vidimo na sliki 4.11a, medtem ko vidimo spremembe teh veličin pri toplotni obdelavi na sliki 4.11b.



Slika 4.11 Vpliv hladne obdelave na mehanske lastnosti bakra a) in vpliv toplotne obdelave b)



Slika 4.12 Vpliv toplotne obdelave bakra na specifično električno prevodnost

Porast specifične električne prevodnosti pri žarjenju je prikazan na sliki 4.12. Specifična električna prevodnost bakra se spreminja pri hladni oziroma toplotni obdelavi podobno kot relativni raztezek, vendar v mnogo manjšem obsegu.

Po standardih (npr. DIN) so bakreni polizdelki iz elektrolitskega bakra (okrogli baker, ploščati, profilni, cevni, pločevina, trakovi ipd) razdeljeni po vrednosti porušitvene trdnosti. Razdelitev je prikazana v tabeli 4.5.

Ime	Oznaka	Trdnost [N/mm ²]	Trdota po Brinellu [N/mm ²]	Sp. prevodnost [Sm/mm ²]	
				okrogli	dr. profili
Posebno mehak	E-Cu F20	200-250	400-650	57	56
Mehak	E-Cu F25	250-300	600-800	57	56
Poltrdi	E-Cu F30	300-370	750-950	d < 1mm 55	d < 1mm 54
Trdi	E-Cu- F37	370-450	850	d > 1mm 56	d > 1mm 55
Posebno trdi	E-Cu-F45	450	-	56	55

Tabela 4.5 Standardizirane vrednosti bakra

V elektrotehniko uporabljamo baker iz vseh skupin in sicer trdovlečenega kakor tudi mehkožarjenega. Trdi baker se uporablja povsod tam, kjer je treba zagotoviti večjo mehansko trdnost in ustrezno trdoto (npr. za drsne obroče, kolektorske lamele itd).

Mehkožarjeni baker se največ uporablja v obliki žic različnih oblik in presekov. (za navitja strojev, navitja transformatorjev, za kable, za inštalacijske vode itd.

4.5.2 Baker v zlitinah z drugimi kovinami

V bakru, ki ga uporabljamo kot prevodnik, je najpomembnejša njegova visoka specifična prevodnost. Po drugi strani pa njegova mehanska trdnost, trdota in odpornost proti obrabi pri mnogih aplikacijah niso zadosti velike. Zaradi tega in kot bomo videli pozneje še zaradi nekaterih drugih vzrokov, bakru dodajamo druge kovine. Na ta način pa zlitina nima več tako visoke električne prevodnosti.

Kot smo omenili že v prejšnjem poglavju, se z manjšim deležem Ag, Cd in Zn, njegova električna prevodnost bistveno ne zmanjša. Ker pa imajo te kovine pomemben vpliv na druge lastnosti, je izdelava posebnih bakrovih zlitin močno pridobila na pomembnosti. Že pri manjši količini dodanega Ag se zviša temperatura rekristalizacije bakra. Tja do 1 % deleža se specifična prevodnost zlitine zmanjša le na 98 % standardne vrednosti bakra.

Da se trdo vlečeni baker pri trdem spajkanju ali pokositrenju ne bi omehčal, se mu dodaja manjšo količino do (0,8 %) Ag. Takšen baker se uporablja pri sodobnih strojih, kjer zelo kvalitetna izolacija med ovoji dovoljuje obratovanje pri zelo visokih temperaturah. Dodatek Ag nam pri povišani temperaturi preprečuje mehčanje bakra.

Povsod tam, kjer so vodniki izpostavljeni natezni sili, (npr. pri prostih zračnih vodih, mora presek voda ustrezati mehanskim zahtevam. Celo trdovlečeni baker bi imel prekratko življenjsko dobo povrh pa bi bil še neekonomičen. V takšnem primeru se načrtovalci raje odločijo za zlitino bakra z 0,55 do 1,04 % Cd. Takšna žica ima celo za 50 % večjo trdnost od trdovlečenega bakra pri čemer električna prevodnost pri 1 % deležu Cd pade le za 6 % standardne prevodnosti čistega bakra. Taka zlitina je še posebej primerna za vode z večjim razponom med podporniki. Najboljšo kombinacijo prevodnosti, odpornosti proti vibracijam in odpornost proti obrabi da zlitina z 0,8 % Cd. Pomembno je, da se z dodatkom Cd krhkost ne poveča. Cd in Ag prav tako zvišujeta temperaturo rekristalizacije bakra.

V splošnem so zlitina mehansko odpornejše od čistega bakra.

5.5.2.1 Broni

V osnovi je bron dvojna zlitina bakra in kositra, pri čemer mu baker v večji meri določa prevodnost, kositer pa trdnost in trdoto. S stališča prevodnosti je zaželeno, da je delež bakra v bronu vsaj 97 %. Sestava bronov ni natančno predpisana. Zanimivo je dejstvo, da je možno na več načinov doseči visoko prevodnost in zadostno mehansko trdnost. Poznamo tudi bron, ki je trojna zlitina, kjer je tretja sestavina P, Si, Mn, Zn, Al, Ni ali Cd.

Zakaj je potrebna še tretja sestavina?

Sn sam ne oksidira bakra, pač pa do neke mere celo sam oksidira in ostaja v obliki kositrovih oksidov v zlitini. P kot dodatek reducira okside in povišuje natezno trdnost bronu.

Prav tako se kot dezoksidacijsko sredstvo uveljavlja Al, vendar njegov delež ne presega 0,25 %, saj bi se sicer poslašale obdelovalne možnosti bronu.

Dodatek Zn izboljšuje livnost in skrbi za točnost odlitkov, svinec izboljšuje kovnost in vlečljivost, vendar na račun manjše natezne trdnosti.

Natezno trdnost bakra povečujejo Al, Cd, Sn, Be, manj pa Si in Ni. S tem se doseže porušitveno trdnost od 500 do 700 N/mm² in specifično prevodnost od 18 do 48 Sm/mm².

Primer sestave nekaterih bronov (DIN standard) je podan v tabeli 4.

Oznaka	Porušitvena trdnost [N/mm ²]	Specifična el. prevodnost [Sm/mm ²]	Sestava
Bz I	500	48	0,1 % Mn, ostalo Cu
Bz II	600	36	0,5-0,8 % Mn, ostalo Cu ali 1 % Sn, 1 % Cd, ostalo Cu
Bz III	700	18	2,4 % Sn, ostalo Cu ali 1,2 % Sn, 1,2 % Zn, ostalo Cu

Tabela 4.6 Nekatere standardizirane sestave bronu

a) Cd - bron

Delež kadmija se giblje med 0,6 in 1 %. Zlitina ima 85 % standardne prevodnosti bakra in ima za 50 % večjo natezno trdnost kot čisti baker. Uporablja se za daljnovidne vrvi, kontaktne konice, posebne kolektorske lamele, elektrode pri točkovnem varjenju, vzmeti ipd.

b) Si - bron

Za zračne vode v telefonij se uporablja tudi Si- bron, ki ima dobre mehanske lastnosti. Njegova sestava je npr. 85 % Cu, 8 % Sn, 4 % Si s primesmi Zn in P. Porušitvena trdnost znaša 700 N/mm^2 , prevodnost pa okrog 40 Sm/mm^2 .

c) P - bron

Z nekoliko večjim deležem P dobimo fosforjev bron. Običajno je sestavljen iz 6-9 % Sn in do 0,3 % P, ostalo pa je Cu. S tem dosežemo zelo dobro obdelovalnost (valjanje, kovanje v hladnem stanju). Ta material se oblikuje v pločevino, žico in palice. Po trdoti razlikujemo tri skupine: trdi, poltrdi in mehki. V elektrotehniki je zelo razširjen, čeprav je specifična električna prevodnost sorazmerno nizka. Uporablja se povsod tam, kjer mora imeti material visoko elastičnost, obenem pa čimbolje prevajati električni tok. To so npr. vijačne vzmeti v najrazličnejših električnih napravah. Za rabo v elektrotehniki je optimalen P - bron. (7 % Sn, 0,1 % P) s prevodnostjo $5,5$ do 8 Sm/mm^2 in s porušitveno trdnostjo do 1050 N/mm^2 .

d) Al - bron

Al - bron nastopa kot dvojna zlitina z dodatkom do 10 % Al, ali pa kot večkratna zlitina Al, Fe, Ni ali Mn in ima dobre lastnosti. Je cenena in odporna proti koroziji. Uporablja se tudi za obroče kratkostičnih rotorjev električnih strojev.

e) Cr - bron

Optimum mehanskih in električnih lastnosti dobimo z dodatkom Cr. Njegov delež v zlitini se giblje od 0,5 do 3 %. Specifična električna prevodnost je od 80 do 90 SPB oziroma do 46 Sm/mm^2 . Pri tem bronu lahko z ustrezno toplotno obdelavo dosežemo zelo visoko trdoto ob zmerni porušitveni trdnosti, kar omogoča dobro odpornost proti obrabi. Uporablja se za sklopke, za drsne obroče strojev ipd.

f) Be - bron

Be - bron je prav tako material z odličnimi mehanskimi lastnostmi. Glavna pomanjkljivost pa je ta, da mu pri večjem deležu Be, prevodnost hitro pada. Zlitina z 2,5 % Be lahko ob ustrezni toplotni obdelavi doseže trdnost do 1220 N/mm^2 in trdoto 350 po Brinellu. Ker zlepa ne oksidira, se ga uporablja kot kontaktni material. Obenem mu to omogoča veliko odpornost pri

električnem obloku. Njegova prevodnost doseže 33 % SPB. Uporabljamo ga za vzmeti pri kontaktih ščetk, za sklopke ipd.

g) Ag - bron

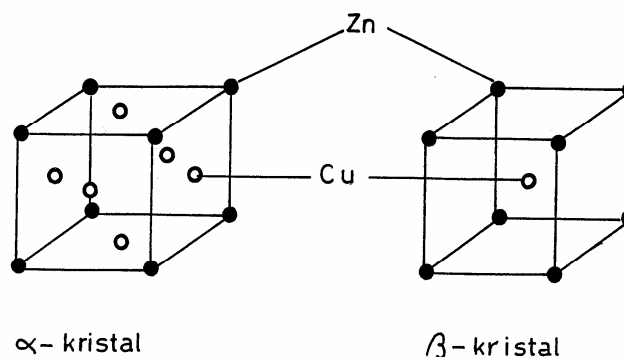
Delež srebra je od 2 do 6 %, ki se mu dodaja še 0 - 15 % Cd. Njegova prevodnost doseže tudi 83 % SPB. Največ se je uporabljal za izdelavo mrežic in nosilcev v elektronskih ceveh. Pri tem bronu je zanimivo to, da se z dodatkom 0,1 do 0,7 % srebra njegova prevodnost ne zmanjša, zviša pa se temperatura kristalizacije.

4.5.2.2 Medenina

Zlitina bakra in cinka ti. medenina ima sorazmerno velik relativni raztezek in večjo porušitveno trdnost od bakra. V zlitinah nastopata baker in cink kot kristala mešanca. Do mešanja atomov pride v raztaljenem stanju, ko posamezni atomi ene komponente zamenjujejo atome druge. V tehničnem smislu so pomembne le zlitine, kjer je bakra več kot 50 %. V obsegu od 50 % do 100 % bakra dobimo dve vrsti mešanih kristalov: alfa in beta kristale.

V zlitinah z več kot 65 % bakra so le alfa kristali, pod 54 % bakra pa le beta kristali. Med 54 % in 65 % pa sta prisotna oba tipa kristalov.

Alfa kristali imajo kubično-ploskovno centrirano osnovno celico, v kateri so atomi cinka razporejeni v ogliščih kocke, medtem ko imajo beta kristali kubično-prostorsko centrirano osnovno celico, s samo enim atomom bakra v središču kocke, kar vidimo tudi na sliki 4.13.



Slika 4.13 Obliki kristalizacije pri medenini

Obe vrsti kristalov imata različne fizikalne lastnosti. Medenina z alfa kristali se dobro obdeluje v hladnem stanju, slabše pa pri višjih temperaturah. Medenina z beta kristali ima večjo natezno trdnost in manjši raztezek in se v hladnem stanju zelo težko obdeluje, pri višjih temperaturah pa enostavneje.

V praksi so pomembne tudi zlitine, ki poleg alfa kristalov vsebujejo tudi beta kristale. Zlitina Ms 63 vsebuje le manjše število beta kristalov, zato jo prištevamo k zlitinam z alfa kristali. Ms 60 vsebuje obe vrsti kristalov in jo je možno tako toplo kot hladno obdelovati. Zlitina Ms 58 je sestavljen pretežno iz beta kristalov.

Mehanske lastnosti pomembnejših vrst valjanih medenin so podane v tabeli 5.

Ime	Porušitvena trdnost [N/mm ²]	Raztezek [%]	Možnost obdelovanja	Uporaba
Ms 58	370 - 610	25 - 5	struženje, kovanje, mehko prešanje	palice za vijake, profili za elektrotehniko
Ms 60	340 - 600	45 - 5	struženje, kovanje, mehko prešanje, zmerno zvijanje	palice, žice, profili, vlečene cevi
Ms 63	290 - 700	60 - 2	vlečenje, kovanje, trdo lotanje	palice, profili, vlečene cevi, kondenzatorske cevi, pločevina
Ms 67	300 - 450	66 - 20	globoko vlečenje, hladni gnetenje, trdo lotanje	pločevina, cevi, palice, profili, žice, vzmeti
Ms 72	250 - 680	35 - 5	vlečenje, gnetenje, hladno kovanje	žice, pločevina
Ms 80 - 90	/	/	hladna obdelava	pločevina, tanka čica (sita, filtri)

Tabela 4.7 Nekatere standardizirane vrste medenine

V splošnem trdota zelo počasi narašča, dokler je delež cinka v zlitini manjši od 35 %. Prav tako raztezek ne narašča bistveno, če je delež cinka manjši od 25 % potem pa vse do pojave beta kristalov hitreje raste, tako, da imajo zlitine Ms 63, Ms 67 in Ms 72 največji raztezek.

Raztezek pa pada čim se delež beta kristalov povečuje. Trdnost in raztezek sta močno odvisna od predhodnega oblikovanja in od morebitnega žarjenja. Nižje številke v tabeli označujejo mehke vrste medenine, ostale pa so trde. Za lita ohišja in armature se uporabljajo lite zmesi Ms 60, Ms 63 in Ms 67.

Električna prevodnost medenine pada s porastom cinka do 39 %, potem narašča do 50 %, nato pa spet pada.

Zaradi večje vsebnosti cinka, so beta kristali manj odporni proti koroziji kot alfa kristali. Korozija se širi vzdolž meje kristala in govorimo o interkristalni koroziji. Na splošno proti kemičnim vplivom ni odporna in na zraku oksidira. Škoduje ji amonijak, Hg, morska voda in zrak. Govorimo o razcinkanju medenine. Površino zaščitimo z galvaniziranjem (Ni, Cr, Ag itd.).

Medenina je v elektrotehniki dokaj razširjena. Prednjači povsod tam, kjer ima tehnološke prednosti pri izsekavanju, vlečenju ipd.

Polizdelki so palice, cevi, pločevina, žice, ki jih dobimo z vlečenjem in valjanjem.

Pločevino in trak se izdeluje iz zlitine z več kot 60 % bakra. Ms 60 je v treh trdotnih različicah in sicer trdi, poltrdi in mehki. Pri Ms 63 je tudi v posebno trdi izvedbi s trdoto med 1300 in 1500 N/mm² po Brinellu.

Pločevina Ms 60 se v elektrotehniki uporablja predvsem za dele, ki jih izsekavamo. Najpogostejša je pločevina Ms 63, ki se uporablja za različne inštalacijske elemente.

V obliki palic se najpogosteje uporablja zlitina Ms 58, medtem ko zlitini Ms 60 in Ms 63 nista tako pogosti.

V posebnih primerih se žica iz medenine uporablja tudi pri navitjih strojev (pomožna ali zagonska navitja).

Posebne medenine so tiste, ki jim je zaradi izboljšanja nekaterih mehanskih lastnosti kot npr. povečanje mehanske trdnosti in trdote in večje odpornosti proti koroziji ter obrabi, dodana manjša količina drugih kovin, ne da bi pri tem izgubila značaj medenine.

Zato npr. Mn, s termično obdelavo pa tudi Sn povečujeta odpornost medenine proti delovanju morske vode. Dodatek Ni, Al in Fe pa povečuje porušitveno trdnost.

4.5.3 Aluminij

Zgodovinsko gledano je aluminij mnogo mlajši material od bakra. Medtem, ko zasledimo uporabo bakra že pred več tisočletji, pa je aluminij postal uporabnejši šele pred dobrimi sto

leti. Vzrok temu je predvsem v precejšnji količini energije, ki je potrebna za njegovo proizvodnjo. Pridobivanje aluminija je postalo gospodarnejše šele, ko je bilo na razpolago dovolj poceni električne energije.

Pridobivamo ga iz rdečega boksita, iz katerega najprej izločimo glinico - Al_2O_3 .

V končni fazi se aluminij pridobiva z redukcijo aluminijevega dioksida Al_2O_3 (glinice) po elektrolitskem postopku.

Glede na uporabljeno tehnologijo je za pridobitev 1 kg aluminija je potrebno od 13 do 30 kWh električne energije. Pri sodobnejših pečeh doseže tok v peči tudi 100 kA. To pomeni, da proizvodnja aluminija ne more biti ekonomsko upravičena, če ni zadosti poceni električne energije.

Katere so njegove lastnosti, zaradi katerih ga uvrščamo med pomembnejše elektrotehnične materiale?

1. Sorazmerno majhna specifična električna upornost,
2. Majhna gostota,
3. Dobra kemična obstojnost,
4. Enostavna obdelava kot npr. valjanje, stiskanje, vlečenje, vlivanje ipd.

Aluminij je kovina srebrno-bele barve in je najpomembnejša v skupini lahkih kovin z gostoto pod 5 kg/dm^3 .

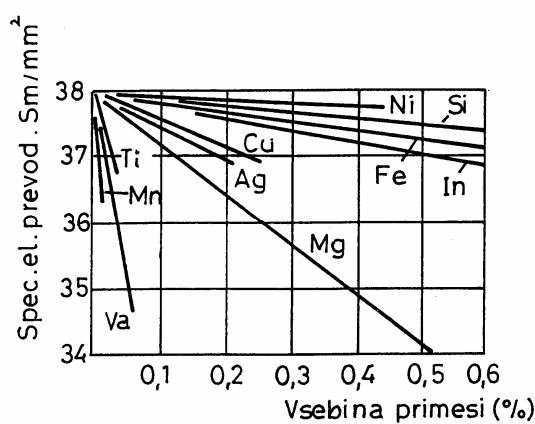
Specifična teža je odvisna od vsebnosti primesi in od izbranega tehnološkega postopka.

Za aluminijev vliček velja teža 26 N/dm^3 , medtem ko je za vlečeni aluminij običajne čistosti 99,95 % specifična teža $27,03 \text{ N/dm}^3$. Specifična teža aluminija je močno odvisna od temperature. Aluminij je torej 3,5 krat lažji od bakra. Linearni koeficient raztezka je $23,9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ in je za 1,5 večji od bakra. Temperatura tališča znaša $657 \text{ }^\circ\text{C}$. Čeprav je temperatura tališča nižja od temperature tališča bakra, je potrebno za taljenje aluminija več energije. Specifična toplota ($0,899 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$) in toplota taljenja (398 kJ/kg) sta pri aluminiju znatno večji kot pri bakru ($c_{Cu} = 0,390 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$).

Specifična električna prevodnost aluminija je odvisna od njegove čistosti. Prevodnost čistega aluminija doseže 38 Sm/mm^2 ($\rho = 0,0264 \text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, 65 % SPB). V praksi so v aluminiju prisotne primesi, ki mu znižujejo električno prevodnost. Vpliv primesi na specifično električno prevodnost je prikazan na sliki 4.14. Zanimiv je dokaj majhen vpliv Fe, Ni, Si in Zn. Močnejši vpliv imajo Cu, Ag, Mg. Prevodnost pa močno pade ob prisotnosti Ti, Va in

Mn. Za razliko od bakra je specifična električna prevodnost aluminija manj odvisna od stopnje trdnosti.

V elektrotehniki je standardizirana čistost 99,5 %, ostalo so primesi Fe, Si, Cu. Zaradi električne prevodnosti se zahteva, da ima aluminij manj kot 0,03 % primesi Ti, Cr, Va in Mn. Takšen aluminij označujemo z E - Al. Za posebne primere kot so npr. elektrode elektrolitskih kondenzatorjev, se uporablja aluminij s čistostjo 99,995 %, ki se ga pridobiva s posebnim elektrolitskim rafiniranjem, kar pa aluminij precej podraži. Po elektrolizi se surovi aluminij pretaka in pošilja v valjarne v obliki blokov, ki so primerni za nadaljnjo obdelavo.



Slika 4.14 Vpliv primesi na specifično prevodnost aluminija

V elektrotehniki se najpogosteje uporabljajo polizdelki v obliki žic, pločevine, profilov in palic.

Polizdelki so podobno kot pri bakru razvrščeni po trdoti in trdnosti v tri skupine: mehki, poltrdi in trdi. Porušitvena trdnost mehkega, prežarjenega aluminija je med 65 in 100 N/mm², relativni raztezek je med 20 in 30 %. Trdo vlečeni aluminij doseže porušitveno trdnost 230 N/mm² in raztezek od 2 do 5 %. Trdota se giblje v obsegu od 150 do 550 N/mm² po Brinellu. S prežarjenjem dosežemo trdnost od 34 do 48 N/mm² in raztezek 40 - 50 %. Elektrotehniški polizdelki v obliki žice, profilov, cevi, pločevine in trakov so razporejeni po mehanskih lastnostih, kot je prikazano v tabeli 4.8.

Iz tabele je razvidno, da aluminij po vseh parametrih zaostaja za bakrom. Pri enakem preseku in dolžini vodnika, je upornost 1,6 krat večja od upornosti bakrenega vodnika ($56/35 = 1,6$). Presek vodnika iz aluminija je torej za 1,6 krat večji oziroma premer je večji za faktor 1,27.

Oznaka	Porušitvena trdnost [N/mm ²]	Trdota po Brinellu [N/mm ²]	Specifična električna upornost [Ω·mm ² /m]	
			Žica in okrogli	Profili material
E-Al F7	65 - 100	200 - 300	1/36	1/35,4
E-Al F10	100 - 140	280 - 380	1/35,4	1/34,8
E-Al F13	130 - 170	320 - 480	1/35,1	1/34,5
E-Al F16	160 in več	> 400	1/34,8	1/34,2

Tabela 4.8 Nekatere standardizirane vrste aluminija

Zato ni smiselno, da zamenjamo baker z aluminijem povsod tam, kjer ni na razpolago zadosti prostora za vodnike. Aluminij se zato redkokdaj uporablja za navitja električnih strojev. Poleg tega bi se zvišala tudi cena potrebne izolacije zaradi večje površine vodnikov kot pri bakru. Drugače pa je s težo navitij. Če primerjamo vodnika iz bakra in aluminija, ki imata enaki upornosti, se izkaže, da je vodnik iz aluminija kljub večjemu preseku dvakrat lažji od bakrenega:

$$\frac{8,9}{2,7 \cdot 1,6} = 2,06$$

Uporaba aluminija ima prednost pred bakrom povsod, kjer je teža navitja pomemben faktor. (navitja elektromagnetov za transport, za vodnike pri gradnji letal ipd).

Če je aluminij izpostavljen električnemu obloku ali streli, potem začne na izpostavljenem mestu nastajati neprevodni material (glinica), ki omogoča lokalno omejitev električnega obloka.

Ob prisotnosti zraka se na površini zgradi plast, ki ga ščiti pred nadaljnjim razpadanjem. Tudi ob poškodbah na površini se oksidna plast kmalu obnovi. Bolj kot je aluminij čist, tj. manj kot je v njem primesi, bolj je obstojen.

Dodatna površinska zaščita aluminija ni potrebna, razen v posebnih primerih. V splošnem je bolj občutljiv na baze (NaOH, KOH) kot pa na kisline. V stiku s slano raztopino, še posebej z morsko vodo, začne oksidni sloj pokati, kar omogoča nadaljnjo korozijo. V takšnih primerih je nujna dodatna zaščita. Oksidno plast lahko še dodatno odebelimo z anodnim oksidiranjem ali ti. eloksiranjem.

Poseben problem povzroča ti. kontaktna korozija na stičnih površinah bakra in aluminija. V vlažni atmosferi tvorita obe kovini galvanski člen, z dokaj visoko kontaktno napetostjo.

Polariteta tega člena je takšna, da tok na mejni površini teče od aluminija proti bakru in aluminij pri tem močno korodira. Zaradi tega morajo biti stična mesta bakra in aluminija dodatno zaščitena pred vlago in agresivno atmosfero. Poleg čistega bakra imajo podoben učinek tudi vse njegove zlitine z nikljem in železom. Takšne kontaktne površine je treba predhodno galvanizirati s Cd ali Zn.

Zaradi oksidne plasti se ga težje spajka. Varimo ga ob uporabi posebnih praškov, ki pri temperaturi tališča aluminija delujejo na oksid in ga reducirajo (litijev klorid oz. litijev fluorid).

Aluminij se uporablja na mnogih področjih elektrotehnike. Od začetka intenzivnejšega pridobivanja se aluminij najpogosteje uporablja pri gradnji daljnovodov. V ta namen se uporablja vrvi iz trdovlečene aluminijeve žice (E Al F17). Glede na to, da je porušitvena trdnost Al za približno 35 % manjša od porušitvene trdnosti bakra z enako električno upornostjo, je njegova uporaba omejena na daljnovode s krajšimi razponi med podporniki. Večje razpone se doseže s ti. Al-jeklenimi vodi, ki so sestavljeni iz jedra z eno ali več pocinkanimi jeklenimi žicami ter enega ali več slojev trdovlečenih aluminijastih žic. Število žic na en sloj se povečuje, če izhajamo iz jedra po znanem pravilu: 1+6+12+18, ne glede na to ali je vrv sestavljena iz enega ali več pramenov. Pri teh vodih je mehanska trdnost določena z jeklenim jedrom, električno upornost pa določa skupni presek aluminija.

Običajno je razmerje med presekom jeklenih in aluminijevih vodov enako 6:1, 4:1 in 3:1. Pri sodobnejših daljnovodih z večjimi razponi se uporablja vrvi s tremi Al in štirimi jeklenimi žicami.

Za proste vode se uporablja tudi zlitine aluminija, ki imajo v primerjavi s čistim aluminijem večjo mehansko trdnost. Med najpomembnejšimi zlitinami je Aldrey, ki vsebuje 0,3 - 0,5 % Mg, 0,4 - 0,7 % Si in 0,2 - 0,3 % Fe, ostalo pa je aluminij. Ta material ima oznako E – Al Mg Si. Z ustrezno toplotno obdelavo pridobi dobre mehanske lastnosti. Valjan material se najprej predgreva na 510 - 550 °C. Temu sledi hlajenje v vodi in dodatno staranje vlečenega materiala pri temperaturi okrog 150 °C. V Aldrey-u nastaja Mg₂Si (magnezijev silikat), ki izboljšuje mehansko trdnost. V obliki žice ima specifično težo 27 N/mm² in porušitveno trdnost 350 N/mm², raztezek pa okrog 6,5 %. Specifična električna prevodnost je približno 31 Sm/mm².

Aluminij se uporablja tudi za vodnike pri proizvodnji kabla. Ker vodniki v kablilih mehansko niso tako obremenjeni kot pri prostih vodih, se uporablja mehak aluminij E-Al-F7. Za enako prevodnost kabla, kot bi ga imel z bakrenimi vodniki, je potreben večji presek vodnikov iz

aluminija, zato je kabel debelejši. Za povečanje odpornosti proti koroziji se plašč izdelava iz plastičnih mas.

Ker je aluminij lahek in ker pri električnem obloku nastajajo neprevodni ostanki, se uporablja tudi za visokotokovne zbiralke (v ta namen se uporablja tudi Aldrey).

Pri izdelavi električnih strojev se uporablja aluminij kot prevodni in kot konstrukcijski material. Služi za vlivanje kratkostičnih kletk rotorjev asinhronskih strojev. Če je potrebna višja specifična upornost, se uporablja zlitina z 2 - 12,5 % Si. Poleg tega se uporablja tudi za ohišja manjših izmeničnih motorjev.

Pri napravah za večje moči so aluminij in njegove zlitine uporabni predvsem zaradi majhne teže in možnosti vlivanja tudi zelo zahtevnih oblik.

Aluminij je nasploh uporaben v elektroniki in mikroelektroniki. Pločevina, folije, žične mreže ipd. uporabljamo za elektrostatične oklope. Ti ščitijo elektronske elemente pred zunanji motnjami, ali pa okolico pred motnjami, ki jih nek elektronski sklop povzroča (problem *elektromagnetne kompatibilnosti*).

Uporablja se tudi za antenske sisteme v obliki cevi, profilov in palic. Na tem področju prednjači predvsem zaradi majhne teže. Zaradi zahtev po večji trdnosti pridejo v poštev v glavnem zlitine, kot npr Aldrey in Hidronalij (2,5 - 10 % Mg).

Poleg tega se uporablja za membrane zvočnikov. Za to se uporablja trde aluminijeve zlitine (Al Mg Si) debeline nekaj tisočink mm.

Kot konstrukcijski material najde svoje mesto v skoraj vseh aplikacijah na elektrotehniškem področju.

Aluminij je ena glavnih komponent pri izdelavi elektrolitskih kondenzatorjev. Kondenzatorji z dielektriki iz umetnih folij imajo elektrode iz aluminija v obliki plošč ali pa zelo tankih folij. Pri nekaterih izvedbah se aluminij napari na dielektrični material.

Obakreni aluminij dobimo, če nanj nanese dovolj debelo bakreno prevleko. (kupal). Zlahka ga vlečemo, spajkamo, nikljamo ali kromiramo. Kemično je odpornejši kot sam aluminij, ker sta obe kovini v tesnem spoju. Plast bakra preprečuje, da prišla vlaga in zrak do aluminija, ki bi na površini tvorila aluminijev oksid Al_2O_3 . Uporabljamo ga za vmesne člene pri spoju bakra in aluminija.