

#### 4.11 Materiali za upore in žarilne elemente

Med uporabne materiale uvrščamo tiste, ki imajo specifično upornost med 0,2 in 1,5  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Ker imajo čiste kovine praviloma manjše specifične vrednosti od omenjenih, se za uporabne materiale skoraj vedno uporabljajo njihove **zlitine**. Pri obravnavi čistih kovin smo videli, da že manjša količina drugih primesi poslabša njihovo električno prevodnost. Znatnejše povečanje specifične upornosti je opazno pri tistih zlitinah, kjer komponente tvorijo homogene taline in ti. kristale mešance. Če komponente kristalizirajo ločeno in tvorijo heterogene zmesi, potem je povečanje vrednosti specifične upornosti vedno manjše. Zaradi zahtevanih mehanskih lastnosti uporabljamo za primesi v glavnem kovinske materiale. V nekaterih primerih pa poleg kovinskih komponent uporabljamo tudi nekovinske in polprevodniške materiale.

##### 4.11.1 Materiali za žične upore

Po dopustni delovni temperaturi in specifični upornosti razdelimo zlitine za žične upore v dve večji skupini. V prvo skupino uvrščamo materiale na osnovi bakra z relativno majhnimi specifičnimi upornostmi reda 0,5  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  in dopustno delovno temperaturo do 400 °C. V drugo skupino prištevamo materiale, kjer sta glavni sestavini Ni in Fe. Glede na področje uporabe delimo uporabne zlitine v tri pomembnejše skupine:

1. Uporovne zlitine za izdelavo regulacijskih in drugih tehničnih uporov.
2. Uporovne zlitine za izdelavo precizijskih uporov (predupori in merilni upori za instrumente).
3. Predupori za žarilne elemente za uporabo v elektrotermiji.

Poleg osnovne zahteve po visoki specifični upornosti, pa za upore iz posameznih skupin postavljamo še dodatne zahteve.

Pri materialih za regulacijske upore zahtevamo, da so odporni proti staranju in obenem tudi časovno nespremenljivi. Vzdržati morajo tudi termične obremenitve in sicer do približno 200 °C. To je pomembno tudi zaradi konstrukcijskih omejitev, tj. pri vgrajevanju v naprave in zaradi ekonomičnosti. Zaradi zelo razširjene uporabe tovrstnih uporov, je pomembna tudi njihova cena.

Od materialov za precizijske upore zahtevamo, da imajo majhen temperaturni koeficient, majhno termoelektrično napetost glede na Cu in še posebej, da je upornost čimbolj časovno neodvisna.

Materiali za upore iz tretje skupine morajo vzdržati temperaturne obremenitve do 1000 °C in morajo biti obenem ceneni, podobno kot materiali iz prve skupine. Morajo biti odporni proti kisiku tudi pri višjih temperaturah, kot tudi proti vplivom substrata, na katerem so naviti.

#### 4.11.1.1 Materiali za splošne in regulacijske upore

Pri teh materialih je baker največkrat osnovna komponenta, v nekaterih posebnih primerih uporabljamo zlitine srebra.

V poštev pridejo zlitine Cu - Ni ter zlitina Cu - Ni - Zn. Med zlitinami Cu - Ni je najbolj poznan konstantan Cu-Ni-45 (55 % Cu in 45 % Ni). Na sliki 4.8 smo videli, da dosežemo pri tej sestavi specifično upornost 0,49  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  in temperaturni koeficient upornosti 0,00004 /°C.

Material lahko obdelujemo brez večjih težav. Trdnost mehkožarjenega konstantana je 420 N/mm<sup>2</sup>, raztezek pa znaša 20 %. Pri segrevanju konstantana začne na površini nastajati oksidna plast, ki lahko služi kot izolator. Lahko ga navijamo tesno ovoj ob ovoju, če le napetost med ovoji ne preseže 1 V. Za tvorbo izolacijske oksidne plasti moramo konstantanovo žico hitro segreti na temperaturo 900 °C (ne dalj kot za 3 s), nato pa žico ohlajamo na zraku.

Ker ima konstantan sorazmerno visoko termoelektrično napetost proti bakru (43  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), ni primeren za izdelavo precizijskih merilnih uporov. Zaradi temperaturne razlike na kontaktnih mestih konstantana in bakra, dobimo napetosti, ki so lahko vzrok merilnih pogreškov. Ta pojav je še posebej moteč pri mostičnih in kompenzacijskih vezjih.

Zlitino Cu - Ni - Zn dobimo tako, da v zlitini Cu - Ni, polovico Ni zamenjamo s Zn. Te zlitine imenujemo ново srebro, argentan in nikelin. Procentno razmerje komponent v zlitini se giblje okrog naslednjih vrednosti: 60 % Cu, 20 % Ni in 20 % Zn. Specifična upornost je med 0,3 in 0,4  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , temperaturni koeficient upornosti pa je od 0,0002 do 0,0008/°C.

Zlitina resistin je izdelana brez Ni. To je manganov bron z manjšim deležem železa (13 - 15 % Mn, 0,5 - 1,5 Fe, ostalo je Cu). Ima podobne lastnosti kot konstantan vendar je pri prevajanju izmeničnega toka moteča magnetna nelinearnost železa.

Zlitine Ag - Mn, z manjšim deležem Sn (78 - 85 % Ag, 7 - 13 % Mn, 3 - 9 % Sn) so bolj odporne proti koroziji. Specifična upornost je visoka (do 0,6  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ), temperaturni koeficient upornosti pa je negativen (do 0,001 /°C). Zlitine so odporne proti organskim kislinam, spojinam, ki vsebujejo amonijak in proti slani vodi. Uporabljamo jih za kompenzacijo pozitivnega temperaturnega koeficienta drugih uporovnih zlitin, kjer je potrebno doseči temperaturno neodvisnost upornosti.

#### 4.11.1.2 Materiali za precizijske upore

V ta namen večinoma uporabljamo zlitine Cu in Mn z dodatki Ni ali Al.

Najboljši med njimi je manganin. V nekaterih državah je celo edini dovoljeni material za izdelavo preduporov in paralelnih uporov (shuntov) pri merilnih instrumentih.

V principu je to trojni manganov bron s sestavo: 86 % Cu, 12 % Mn, in 2 % Ni. Temperaturni koeficient upornosti je  $0,00001 / ^\circ\text{C}$ , termoelektrična napetost proti bakru je le  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Specifična upornost je  $0,43 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Da dosežemo tako majhen temperaturni koeficient, je potrebno izvesti posebno toplotno obdelavo materiala. Najprej ga žarimo v vakuumu pri temperaturi od 350 do 550 °C, nato pa počasi ohlajamo. Že izdelane upore potem še dalj časa umetno ali naravno staramo. Meritve so pokazale, da se upornost v 30 letih spremeni le za  $15 \times 10^{-6}$  začetne vrednosti.

Izdelujemo ga v obliki pločevine ali žice. Če ga navijamo, moramo ovoje med seboj dodatno izolirati z lakom, saj je oksidna plast na manganu lahko odstranljiva.

Izabelin je zlitina, ki je sestavljena iz 84 % Cu, 13 % Mn, in 3 % Al in ima specifično upornost  $0,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Temperaturni koeficient je  $-0,00002/^\circ\text{C}$ , termoelektrična napetost pa je  $0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Iz teh podatkov je razvidno, da je material podoben manganinu in ga zato tudi pogosto uporabljamo.

Izabelinu podobna zlitina je therlo, ki je sestavljena iz 85 % Cu, 9,5 % Mn, in 5,5 % Al. Ima nekoliko večjo termoelektrično napetost proti Cu, specifična upornost pa je  $0,45 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Novokonstantan je zlitina Cu, Mn, Fe in Al (82,5 % Cu, 13,5 % Mn, 1 % Fe in 3 % Al). Prav tako jo uporabljamo za izdelavo precizijskih uporov, le temperaturni koeficient je nekoliko večji kot pri manganinu. Specifična upornost je  $0,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

#### 4.11.1.3 Materiali za grelne elemente

V elektrotermiji uporabljamo zlitine, ki lahko delujejo pri visokih temperaturah in morajo imeti zadostno mehansko trdnost ter odpornost proti oksidaciji.

V splošnem kovine, z izjemo Pt in še nekaterih posebnih materialov, oksidirajo in tvorijo kovinske okside. Hitrost oksidacije je različna, praviloma pa narašča pri višjih temperaturah. Proces oksidacije lahko spremeljamo z merjenjem prirastka teže materiala. Na sliki 4.9 je za nekatere kovine prikazana odvisnost količine vezanega kisika na enoto površine od temperature ob prisotnosti zraka. Vidimo, da Fe in W dokaj hitro oksidirata že pri sobni temperaturi. Cu oksidira hitreje pri višjih temperaturah, medtem ko sta Cr in Ni odpornejša proti oksidaciji tako pri nižjih kakor tudi pri višjih temperaturah.

Precejšen vpliv na hitrosti oksidacije imajo lastnosti nastalega oksida. Če je oksid izparljiv, potem ne more ščititi kovine pred nadaljnjo oksidacijo. Tako je pri W in Mo oksidih. Ker niso odporni, teh kovin torej ne moremo uporabljati v običajni atmosferi.

Če pa oksid ne izpareva, potem se kopiči na površini materiala. Tu pa imamo spet dve možnosti:

1. Če je volumen enega mola oksida večji od volumna atoma kovine iz katere je nastal, dobimo zelo gosto oksidno plast, skozi katero kisik zelo težko prodira. V tem primeru oksid ščiti površino kovine pred nadaljnjo oksidacijo.
2. V nasprotnem primeru, ko je volumen enega mola oksida manjši od volumna atoma kovine iz katerega je nastal, takšna oksidna plast ni gosta in ne more preprečiti zraku dostopa do kovine.

V prvo skupino uvrščamo Al, Ni in Cr. Al lahko dalj časa vzdrži visoko delovno temperaturo, ki je le nekoliko nižja od temperature tališča. Pomembno je tudi razmerje temperaturnih koeficientov kovine in nastalega oksida. Če sta različna, potem lahko pride pri hitri temperaturni spremembi do pokanja oksidne plasti, v nastalih razpokah pa prihaja do nadaljnje oksidacije kovine. To je tudi eden od vzrokov, da ima grelni element krajšo življenjsko dobo pri mnogokratnem vklapljanju in izklapljanju, kot če deluje trajno pri delovni temperaturi. Ta lastnost se odraža pri zlitini Cr - Ni. Življenjska doba grelnega elementa se glede na način delovanja lahko razlikuje tudi do tridesetkrat.

Življenjska doba žarilnega elementa je odvisna tudi od homogenosti zlitine in od odstopanja debeline oz. preseka žice po dolžini od nazivne vrednosti. Na delih z manjšim premerom, kakor tudi na mestih kjer je material nehomogen, element najprej pregori.

Trajanje žarilnega elementa je odvisno tudi od delovne temperature. Pri tem prihaja do izraza predvsem temperaturni koeficient upornosti. Tu mislimo predvsem na to, da sta upornosti žarilnih elementov v hladnem in vročem stanju čim bolj enaki. S tem preprečimo preobremenitve v inštalacijah ob vklapljanju grelnih elementov, dokler niso segreti na delovno temperaturo. Zaradi vseh opisanih problemov moramo biti zelo pazljivi pri izbiri ustrezne zlitine.

V prvo skupino materialov za grelne elemente uvrščamo Cr – Ni zlitine. Naprej pa jih delimo v tri podskupine, ki se med seboj razlikujejo po deležu tretje komponente v tej zlitini tj. Fe. Opisno jih potem delimo na zlitine brez Fe, na zlitine z malo Fe in na zlitine z večjim deležem Fe.

Iz dosedanjih ugotovitev že lahko sklepamo, da so Cr – Ni zlitine zaradi odpornosti proti oksidaciji tudi toplotno zelo obstojne. Na površini žarilnih elementov, ki so izdelani iz teh zlitin, nastaja zelo gost oksidni sloj zelo obstojnih oksidov  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  in NiO. Predpostavimo tudi lahko, da so zlitine brez Fe odpornejše proti oksidaciji od tistih z Fe, čeprav je delež Cr v obeh enak. Z dodatkom Fe dosežemo večjo specifično upornost, medtem ko Cr določa toplotno obstojnost.

Najpogosteje je zlitina brez Fe sestavljena iz 20 % Cr in 80 % Ni. Te zlitine imajo še posebno dobre mehanske lastnosti tudi pri višjih temperaturah. Specifična električna upornost je v povprečju enaka  $1,05 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , temperaturni koeficient pa je  $0,06 \cdot 10^{-3} /^\circ\text{C}$ . Najvišja dopustna delovna temperatura je od 1100 do 1150 °C. Te zlitine uporabljamo tudi za regulacijske upore, če so v okolici prisotne agresivne kemične snovi. Škoduje jim prisotnost S v vseh oblikah (žveplena kislina ipd.).

Na trgu jih dobimo pod različnimi imeni kot npr. nikrom, kromel, cekas II, kromin ipd.

Običajna sestava Cr - Ni zlitine z malo Fe je: 60 - 65 % Ni, 15 - 20 % Cr, in 15 - 20 % Fe). Zaradi Fe je njena specifična upornost nekoliko večja in se giblje okrog  $1,1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , temperaturni koeficient upornosti pa je  $0,08 \cdot 10^{-3} /^\circ\text{C}$ . Najvišja dopustna delovna temperatura je od 1000 do 1050 °C. Ima tudi dobre mehanske lastnosti in je odporna proti kislinam.

Na trgu jo najdemo z različnimi imeni in sicer: ferokromin, nikrom II, glowray, hawa 110, cekas itd. Za povečanje upornosti v hladnem stanju dodajamo še do 7 % Mo. Ta zlitina se imenuje kontracid.

Za Cr - Ni zlitine z veliko Fe je značilno, da je delež Ni občutno manjši, kar pomeni, da so tudi cenejše. So pa odpornejše proti S in njegovim spojinam. V osnovni obliki je sestavljena iz 20 % Ni, 25 % Cr, in 55 % Fe. Dobimo jo z imenom cekas 0, cekas I, CNE ipd. Specifična električna upornost je okrog  $0,97 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , temperaturni koeficient upornosti pa je približno  $0,3 \cdot 10^{-3} /^\circ\text{C}$ . Dopustna delovna temperatura je od 950 do 1000 °C. V primerjavi z ostalimi Cr - Ni zlitinami ima slabše mehanske lastnosti.

Drugo skupino teh materialov sestavljajo zlitine, kjer je glavna komponenta Fe. Ker ne vsebujejo Ni, so tudi cenejše. Druga komponenta je vedno Cr. Glede na morebitno prisotnost tretje komponente pa se delijo na zlitine Cr - Fe s Si in na zlitine Cr - Fe z Al. V splošnem so

te zlitine toplotno zelo obstojne, kar je zasluga večje količine Cr, prisotnost Si in Al pa obstojnost še dodatno poveča.

Zlitine Cr - Fe - Si vsebujejo 20-30 % Cr, do 2,5 % Si, ostalo pa je Fe. Specifična upornost je med 0,75 in 0,81  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Z večanjem deleža Si se povečuje tudi specifična upornost. Temperaturni koeficient upornosti je precej večji, kot pri do sedaj naštetih zlitinah in znaša  $0,45 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ . Dopustna delovna temperatura je glede na vsebnost Cr med 900 in 1000  $^\circ\text{C}$ .

Drugo podskupino sestavljajo zlitine Cr - Fe - Al. Optimalne mehanske in toplotne lastnosti dosežemo s sestavo: 65 % Fe, 30 % Cr in 5 % Al, in jo dobimo z imenom megapir. Dopustna delovna temperatura je med 1300 in 1350  $^\circ\text{C}$ . Ima zelo visoko specifično upornost in sicer 1,4  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , temperaturni koeficient pa je majhen le  $0,03 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ . Njena toplotna obstojnost je pri 1200  $^\circ\text{C}$  kar 2,5 krat boljša od Cr - Ni zlitine brez Fe.

Zaradi prisotnosti železa te zlitine oksidirajo, zato jih je potrebno pri vgradnji zaščititi. Pri tem se moramo izogibati kislim masam, ki jih uporabljamo za njihova ležišča. Pri grelih brez Ni je še pomembnejša vloga zaščitnega oksidnega sloja. Gost oksidni sloj s čim večjim deležem aluminijevega oksida lahko znatno podaljša življenjsko dobo grela. Ker pa ne vsebujejo Ni, so te zlitine odporne proti žvepljenim spojinam. Po sestavi in po lastnostih se od megapira zelo malo razlikujejo zlitine cekas ekstra in kantal Al, ki vsebujejo 20 % Cr, 5 % Al, ostalo pa je Fe. Kantal Al vsebuje še 3 % Co.

Če se grelni elementi ne nahajajo le v vročem zraku, ampak v atmosferi z različnimi agresivnimi plini, moramo izbrati zlitino glede na specifične razmere. Delovne temperature posameznih skupin zlitin v teh primerih ne bodo več enake tistim, ki smo jih omenili zgoraj, ampak bodo nekoliko nižje. Če s temi materiali še ne dosežemo želene temperature, potem posežemo po Pt, ki lahko trajno deluje pri temperaturi 1300  $^\circ\text{C}$ . Pogosto namesto platine uporabimo tudi zlitino Pt - Rh (s 30 % Rh), ki je toplotno in kemijsko še odpornejša.

Kot smo že omenili, lahko pri visokih temperaturah poleg Pt in zlitine Pt - Rh uporabimo tudi W in Mo. Ker pa te kovine pri višjih temperaturah zelo rade oksidirajo, jih uporabljamo le v zaščitni atmosferi ali v vakuumu. Uporabljamo jih tam, kjer ne želimo, da je atmosfera peči onesnažena s produkti izgorevanja silicijevega karbida (SiC) ali pa npr. pri pečeh za oplemenitenje dragih materialov ipd. Dopustna trajna temperatura se giblje okrog 1700  $^\circ\text{C}$ .

#### 4.11.2 Uporovni materiali za plastne upore

Ti materiali se uporabljajo v elektroniki za izdelavo diskretnih ali integriranih uporov. Zahteve, kot je točnost upornosti, staranje, šumnost ipd. so tu postavljene skladno z zahtevami elektronskih vezij. Materiali so lahko kovinski (čiste kovine ali zlitine) ali nekovinski (polprevodniški). Plasti so lahko debele (10 do 30  $\mu\text{m}$ ) ali tanke (50 do 100 nm). Tako govorimo o debeloplastnih in tankoplastnih uporih. Pri diskretnih uporih je uporabna plast nanešena na izolacijsko (stekleno ali keramično podlago).

##### 4.11.2.1 Debeloplastni upori

Izdelani so iz posebnih uporovnih past, ki jih po postopku sitotiska nanašamo na podlago in žgemo npr. pri temperaturah med 750 in 1000 °C. Takšna pasta je sestavljena iz (1) prevodnika, ki ga sestavlja prevodni prah premera 1 do 10  $\mu\text{m}$ , (2) prahu izolacijskega materiala premera 1 do 10  $\mu\text{m}$  in (3) iz veziva v katerem sta disperzirana materiala (1) in (2). Čim manj je v pasti komponente (1) tem večja je upornost plasti.

Materiali, ki se uporabljajo v komponenti (1) so lahko čiste kovine (Pd, Pt, Ru) ali zlitina Ni – Cr, pa tudi kovinski oksidi (npr. PaO, RuO<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub> idr.), kovinske spojine (npr. TaN, ZrB idr.) ali specialni sestavi (npr. Au + SiO<sub>2</sub>, Pb<sub>2</sub>RuO<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> idr.); v komponenti (2) je običajno stekleni prah in v (3) strjujoči polimer.

##### 4.11.2.2 Tankoplastni upori

Plast nanašamo s pomočjo napanjanja ali napaševanja. Manj pomembna je debelina plasti kot postopek. Prednosti uporov tankih plasti glede na debeloplastne so naslednje:

- ožje tolerance upornosti,
- manjši temperaturni koeficienti upornosti,
- staranje vpliva na spremembo upornosti z manj kot 1 % in
- zelo nizek nivo šumnosti.

Pri tankoplastnih uporih vpliva na upornost poleg specifične upornosti samega materiala še površina podlage, saj so tanke plasti lahko nanešene v debelini le nekaj medatomskega razdalj. Čim debelejša je uporabna plast, toliko manjši je vpliv podlage na upornost plasti. Materiali, ki se uporabljajo, so lahko čiste kovine (npr. Ag, Cr, Cu, Ir, Ni, Pt idr.) ali zlitine (Ni – Cr, Ta – Al, Si – Cr ipd.) ali posebni sestavi (npr. Au – WO<sub>3</sub>).

Upornost je odvisna še od debeline zrn, kristalne strukture, od orientacije in od tehnološkega postopka.

## 4.12 Nekovinski uporovni materiali

V elektrotehniki oglje zelo pogosto uporabljamo. Najpogosteje ga zasledimo kot elektrodni material za peči, za elektrolitske kopeli, kakor tudi za anode galvanskih elementov, za obločne svetilke ipd. Uporabljamo ga tudi za prenapetostne odvodnike, včasih pa se je uporabljal za ogljene tlačne regulatorje (Pinch), za mikrofone, ipd.

Iz njega izdelujemo tudi ti. ogljene upore za manjše toke in ščetke električnih strojev v zelo širokem razponu nazivnih moči oz tokov.

V vakuumski tehniki pa konkurira Ni in Mo kot elektrodni material.

V elektrotehniki uporabljamo naslednje vrste ogljikov:

- naravni grafit,
- saje,
- elektrodno amorfno oglje,
- elektrografit,
- metalizirani grafit,
- pirolitsko oglje,
- obločno oglje

### 4.12.1 Naravni grafit

**Naravni grafit** uporabljamo za ščetke pri električnih strojih, za uporovne steze pri potenciometrih, za visokohmske upore. Ima heksagonalno osnovno kristalno celico. Atomi v ravnini so tesno povezani, medtem ko ravnine niso, kar je vzrok njegove plastovitosti. Pravokotno na ravnine je trd in brusi celo kovine. V smeri ravnin ima pozitivni temperaturni koeficient raztezka, medtem, ko je v pravokotni smeri na ravnine negativen.

**Saje** uporabljamo kot primesi v uporovnih masah za obloge plastnih uporov.

### 4.12.2 Amorfno elektrodno oglje

**Amorfno elektrodno oglje** je prežarjena zmes antracita, grafira, premogovega koksa, naftnega koksa, retortnega oglja, saj, smole in katrana. Naftni koks je trdni ostanek nafte po prehlapevanju (iz 100 kg nafte ostane 1 kg koksa). Komponente najprej osušimo, očistimo plinov, zmeljemo v zrna s premerom 2 do 3 mm in jim dodamo 22 do 30 % katrana ter raztaljenih smol. Vse skupaj pregnetemo in stisnemo v stiskalnicah ali pa ga iztiskamo v dolge profilirane palice. Potem jih sušimo ter pečemo pri temperaturi od 1100 do 1200 °C. Ostanke katrana in smol, ki ne izhlapijo, zlepijo oziroma sintrajo vsa zrna med seboj v amorfno gmoto, ki je trdna in enotna snov in jo lahko naprej oblikujemo kot kovine. To oglje



ni čisti ogljik, ker izhodiščni material (koks in antracit) vsebuje nekaj (6 do 8 %) anorganskih snovi, ki pri peki ne izhlapijo, pač pa ostanejo v njem kot pepel. Če prevladuje v amorfnem oglju koks, ga imenujemo koksno, če pa saje pa sajno oglje.

Lastnosti amorfnega oglja so odvisne od mnogih stvari in sicer: od kakovosti surovin, od njihovega razmerja, od zrnatosti, od načina pregrevanja od količine anorganskih primesi.

Poglejmo si nekaj značilnih lastnosti najpogostejšega amorfnega oglja:

Gostota	1500 do 1555 kg/m <sup>3</sup>
Upornost elektrod s prerezi od 0,0025 do 0,3 mm <sup>2</sup>	100 do 45 Ω
Tem. koef. upornosti med 25 in 900 °C	-318 · 10 <sup>-6</sup> /°C
Specifična toplota pri 100 °C	754 do 920 J/kg
Tlačna trdnost	22,5 do 40,0 N/mm <sup>2</sup>
Upogibna trdnost	5 do 8 N/mm <sup>2</sup>
Razt. elektrode prvotne dol. pri 700 °C	0,2 %

Tabela 4.9.1 Lastnosti amorfnega oglja

Specifična upornost amorfnega oglja je odvisna od načina žganja. Čim višja je temperatura žganja, manjša bo upornost oglja v hladnem stanju. Najnižja upornost, ki jo more oglje ob žganju doseči, je enaka upornosti čistega grafita. Tudi med obratovanjem se njegova upornost spreminja; ohlajeno ima upornost, ki je odvisna od višine temperature, ki smo jo dosegli med obratovanjem. Tako se specifična upornost amorfnega oglja giblje med 40 in 60 Ωmm<sup>2</sup>/m, temperaturni koeficient upornosti pa je od -0,2 do -0,4 10<sup>-3</sup>/°C. Toploto prevaja tem slabše, čim višja je njegova temperatura. Do 2000 °C ostaja oglje v trdnem stanju, nad 2600 °C postaja plastično, pri 2800 °C pa se začne pri atmosferskem tlaku uplinjati. Pri temperaturah, večjih od 500 °C, začne oksidirati v CO<sub>2</sub>. Obstoje je proti vsem kemikalijam. Uporabljamo ga za metalurške elektrode, za ogljene palice v galvanskih elementih, za mikrofone, za elektrode pri elektrolizi, za varilne elektrode, za ščetke pri kolektorskih strojih, za fiksne in spremenljive upore ipd. Upornost ogljenih plošč, ki so zložene v niz, je odvisna od sile, ki niz stiska.

### 4.12.3 Elektrografit

**Elektrografit** dobimo, če amorfno elektrodno oglje z električnim tokom gostote  $750\ 000\ \text{A/m}^2$  segrejemo do temperature  $2500\ ^\circ\text{C}$ , kjer se začne čistiti in kristalizira v grafit. Pri tem postopku se izloči večina anorganskih primesi tako, da v dobljenem elektrografitu ostane le še do  $0,5\ \%$  pepela. Delovna temperatura tako obdelanega oglja se dvigne celo do  $2300\ ^\circ\text{C}$ , gostota se pri žganju poveča na  $2050\ \text{kg/m}^3$ , specifična upornost pa se ne spremeni mnogo in ostaja med  $46$  in  $66\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , v primerjavi z naravnim grafitom, ki je še vedno osemkrat prevodnejši. Natezna trdnost elektrografita je večja kot pri navadnem amorfnem oglju in sicer niha med  $6,1$  in  $13\ \text{N/mm}^2$ . Poveča se mu toplotna prevodnost, ki je celo večja od Ni ali Pt. Elektrografit uporabljamo do temperature  $3000\ ^\circ\text{C}$  v zaščitni atmosferi. Uporabljamo ga v iste namene kot amorfno elektrodno oglje, posebno pa še tam, kjer so podane dodatne zahteve glede trdnosti, in sicer pri drsnih obročih in trdih ščetkah univerzalnih elektromotorjev ter za anode zelo zmogljivih elektronskih cevi.

### 4.12.4 Metalizirani grafit

Metalizirani grafit izdelujemo tako, da sintramo grafit z  $20$  do  $30\ \%$  kovinskega prahu (bron ali baker). Ta material ima majhno specifično električno upornost, kar je doprinos kovine, zaradi grafita pa je mazav. Uporabljamo ga za nizkonapetostne ščetke.

Primerjava lastnosti ščetk glede na material iz katerega so izdelane je podana v tabeli 4.9.2.

Vrsta ščetk	Dovoljena gostota toka v $[\text{A/cm}^2]$	Dovoljena obodna hitrost $[\text{m/s}]$	Spec. el. upornost $[\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$	Torni količnik	Padec napetosti $[\text{V}]$
Ogljene	4-6	15 - 20	18 - 60	0,20 - 0,30	1,5 - 2,5
Grafitne	8-12	20 - 40	10 - 40	0,10 - 0,20	2,0 - 3,5
El. grafitne	8-12	40 - 60	10 - 65	0,15 - 0,25	2,0 - 3,0
Met. grafit	10-25	20 - 40	0,05 - 12	0,05 - 0,15	0,3 - 1,0

Tabela 4.9.2 Lastnosti ščetk iz različnih materialov

#### 4.12.5 Pirolitsko oglje

Pirolitsko oglje ima podobno strukturo kot naravni grafit. Dobimo ga pri temperaturi 1000 °C, kjer se izbrani ogljikovodiki reducirajo v elementarno oglje, ki se useda na porcelanske palice. Proces imenujemo piroliza ali razkroj zaradi temperature. Takšno oglje uporabljamo izključno za upore v elektronskih napravah.

#### 4.12.6 Obločno oglje

Obločno oglje oddaja pri gorenju bel svetel plamen. Za to uporabljamo čim čistejši C, da pri gorenju ne zamaže okolice z anorganskim pepelom. Uporabljamo ga za obločni plamen, ki gori s temperaturo cca. 3700 °C. Zaradi sajavosti mu dodajamo uparljive anorganske spojine, kot so oksidi redkih zemelj, fluoridi, silikati ipd. Pri gorenju zelo čistega oglja je plamen zelo nemiren, zato ga je potrebno uravnati z magnetnim poljem.

#### 4.12.7 Karborund

Kljub temu, da ima zelo dobre lastnosti, pa oglje le ni brezhiben material za uporabna grela. Glavni problem je v tem, da pri višjih temperaturah oksidira. V stiku s silicijevim dioksidom (kremenjakom) se oglje pri visoki temperaturi prevleče s plastjo silicijevega karbida ali karborunda (SiC), ki je za kisik mnogo bolj odporen kot pa sam ogljik. Ker ima karborund tudi boljše električne lastnosti kot oglje, ogljeno jedro opustimo in izdelamo celoten upor iz karborunda.

Specifična upornost silicijevega karbida je pri sobni temperaturi približno 2000  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , v žarečem stanju pa okrog 1000  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ . Temperaturni koeficient je torej negativen. Silicijev karbid je proti kisiku odpornejši od oglja in grafita. Čez čas nastane na površini oksidna plast, ki ga ščiti pred nadaljnjo oksidacijo. Če hočemo doseči čim daljšo življenjsko dobo teh grelnih elementov, moramo pri uporabi upoštevati več pravil. Temu poleg drugega botrujejo tudi neugodne mehanske lastnosti. Silicijev karbid ima na trgu različna imena: silit, globar, silikarbon ipd.

### 4.13 Spajke

Spajke so zlitine, ki jih raztaljene nanese med dva kovinska kosa, kjer se ohladi in kosa vežejo med seboj v celoto. Spajka veže dobro tedaj, če so relativne napetosti obeh kovinskih delov in spajke ugodne. Raztaljene spajke morajo dobro omočiti površino kovine. Z različnimi spajkami vežemo med seboj zelo različne kovine. Po načinu spajkanja, po značaju in tališčih za spajkanje pripravljenih kovin uporabljamo ali mehke ali trde spajke. Mehke

imajo nizka tališča od 180 do 400 °C in jih talimo s spajkalom ali s plamenom ali v talilnikih. Trde spajke imajo tališča med 600 in 1000 °C, so trše in jih talimo z varilnim plamenom ali v talilnih pečeh. Spajka mora vezati mehansko in električno. Trde spajke prekašajo mehke mehansko in električno, je pa delo z njimi mnogo težavnejše kot z mehkiimi. Navadna mehka spajka za električno rabo ima komaj 12,2 % prevodnosti Cu, je mehansko neprimerno slabša kot kaka trda, je pa zelo priročna.

#### 4.13.1 Mehke spajke

Mehke spajke vežejo med seboj Zn, Sn, Pb, Cu, medenino, bron, Ni, Fe, jeklo itd, nekatere tudi Al z Al. Na področju elektronike najpogosteje vežemo med seboj prvih šest kovin in uporabljamo največ mehke spajke. Mehke spajke so enojne, dvojne, trojne ali četverne zlitine. Njihove sestavine si po pomembnosti sledijo v naslednjem vrstnem redu: Sn, Pb, Sb, Cd, Ag in Bi, v spajkah za Al pa tudi Zn. Najnižja tališča med 140 in 145 °C imajo Bi in Sn - Cd, njim sledijo Sn, zlite s Pb s tališči med 183 in 312 °C. Najvišja tališča med 260 in 400 °C imajo Cd - Zn in Cd - Ag spajke. Cd - Zn spajke so v hladnem trde, vendar potemniijo in korodirajo. Zn v spajkah slabi spoje mehanično in se nagiba k oksididaciji. Spajke za dobre električne zveze morajo vsebovati vsaj 40 % Sn. Manj Sn sicer poceni spajko, zmanjša pa ji vezalno moč in električno prevodnost. Bi spajke, sestavljene iz enakih delov Bi, Pb in Sn, so raztaljene zelo tekoče, Bi niža tališče in manjša površinske napetosti. Cd - Sn spajke uporabljamo za spajkanje Mg zlitin. V Sn - Pb spajkah pogosto srečamo dodatek antimona (Sb), ki poveča trdnost in trdoto, medtem ko v spajkah z mnogo Pb priporočajo kot dodatek Ta, ki veča takim spajkam vezivnost in trdnost.

Spajke morajo imeti nižje tališče kot pa kovine, ki jih spajkamo. Evtektično zlite spajke imajo ostro določeno tališče, npr. spajka z 62 % Sn in 38 % Pb pri 183 °C, zato so kot nalašč za natančna dela. Nasprotno morajo imeti spajke za kable, ki jih moramo s kabla obrisati, široko razpotegnjeno območje tekočnosti, npr. spajka s 30 % Sn in 70 % Pb, ki se pričinja taliti pri 185 °C in se popolnoma stali šele pri 248 °C. V tem temperaturnem območju ostane plastična in jo lahko razvlečemo. Najboljše Sn spajke za posebna elektrotehnična dela smejo vsebovati največ 0,02 % Fe in 0,05 % Az.

#### 4.13.2 Trde spajke

Električno in mehansko vežemo medenino, nerjaveče ali običajno jeklo, Ni in druge kovine s trdimi spajkami. Trde spajke so zlitine Cu in Zn z dodatki Ag, Pb, Sn, Cd ali P. Na tržišču jih dobimo v obliki žic in zrn. Najnižje tališče imajo Cd, najvišje pa medeninaste spajke. Zaradi

visokih tališč uporabljamo pri njih kot zaščitno sredstvo boraks  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , ki topi bakrov oksid. Od vseh trdih spajk so srebrne najboljše.

Trde spajke za Al vsebujejo do 15 % Al. Tako je sestavljena trda spajka za Al, solumin iz 55 % Sn, 33 % Zn, 11 % Al in 1 % Cu. Mouray spajka je sestavljena iz 80 do 90 % Zn, 3 do 8 % Cu in 6 do 12 % Al.

Zaščitno sredstvo proti oksidiranju pri spajkanju Al je klorovo apno, raztopljeno v alkoholu, litijev fluorid itd.

Na splošno velja, da spajkanje omogoča najzanesljivejše in najtrajnejše električne kontakte.

#### 4.13.3 Spajkalna zaščitna sredstva

Običajno so kovine prekrte z oksidi, ki jih je potrebno pred spajkanjem odstraniti. Mehansko čiščenje sicer odstrani okside pred spajkanjem, vendar se pa kovina med spajkanjem ponovno oksidira. Zaradi tega uporabljamo še kemična sredstva, ki ohranjajo površino kovine kemično čisto. Sproti odstranjujejo okside ali pa preprečujejo oksidiranje in so lahko zgolj zaščitna ali pa kemično aktivna. V prvo skupino spadajo smola, kolofonija, vazelin, olivno olje in njihove zmesi, v drugo pa cinkov klorid  $\text{ZnCl}_2$ , amonijev klorid. Kemično aktivnih zaščitnih sredstev se večkrat tudi izogibamo, ker jih je potrebno po spajkanju odstraniti s kontaktnih mest, saj ostanki soli razkrajajo kovine.

#### 4.13.4 Prevodni kiti

Prevodne kite uporabljamo povsod tam, kjer prevodnih stičnih površin oz. mest ne smemo greti. Kit je sestavljen iz zrnatega srebra, ki je pomešan z lakom. Suh kit je 20 krat slabše prevoden od srebra. Če ga segrejemo do temperature, kjer lakaste molekule polimerizirajo, postane kit trikrat bolj prevoden od neseGREtega.