

4.6 Materiali za električne kontakte

V splošnem so kontakti stična mesta dveh enakih ali pa različnih materialov. Njihova osnovna naloga je, da sklenejo oz. prekinejo električni tokokrog in tako omogočijo ali onemogočijo prevajanje električnega toka. Omenjeno nalogo lahko v vezju uspešno opravljajo le v primeru, če izpolnjujejo nekatere zahteve:

1. Kontaktna upornost naj bi bila čim manjša in stalna. Pri tem mislimo predvsem na to, da je površina odporna proti oksidaciji, proti nastajanju sulfidov in nasploh odporna proti nastajanju kakršnihkoli slabopredvodnih prevlek. Ker oksidne in druge slabo prevodne prevleke na površini kovin povzročajo povečanje prehodne upornosti, mora biti zagotovljeno, da se pri vzpostavljanju kontakta oz. drsenju stičnih površin ti oksidi "odstranijo". To zahtevo najbolje izpolnjujejo plemenite kovine, kar je razvidno iz tabele 4.6.1, kjer so zapisane spremembe prehodne upornosti za različne kovine glede na zlato ploščo po 6 mesecih mirovanja na zraku.

Kovina	Specifična. el. upornost [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	Specifična el. upornost po šestih mesecih [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
Pt	0,001	0,005
Ag	0,001	0.01
Cu	0,05	20
W	1	10

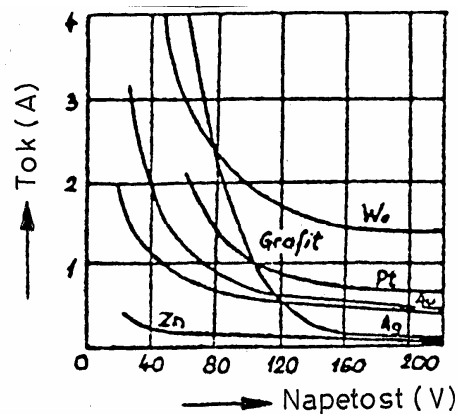
Tabela 4.6.1 Časovna sprememba specifične električne upornosti nekaterih kovin

Kontakti, ki delujejo z manjšimi pritiski, morajo biti izdelani iz plemenitih kovin, medtem ko za kontakte, ki delujejo z velikimi pritiski, kjer je trenje površin izrazitejše, uporabljamo neplemenite kovine.

Tanek molekularni sloj olja na kontaktnih površinah ni škodljiv, pri debelejši plasti olja pa se prehodna upornost hitro poveča. Še posebej moramo paziti na okolje v katerem stikalni element deluje, saj je lahko hitrost korozije površin v agresivni atmosferi nekajkrat večja kot pri normalnih pogojih. Posebno škodljivi so S in njegove spojine.

2. Materiali za kontakte morajo imeti čim večjo toplotno prevodnost, da so toplotne izgube na kontaktnem materialu čim manjše. Material mora imeti čim manjšo toplotno upornost. Na to lahko vplivamo tudi z ustreznim oblikovanjem kontaktnih površin. Največjo električno in toplotno prevodnost imata Ag in Cu. Njune zlitine imajo ta dva parametra le slabša. V tem primeru raje uporabljamo kombinacije tistih kovin, ki se ne zlivajo oz. pri zlivanju ne tvorijo kristale mešanice, ampak kristalizirajo ločeno. V tem primeru sta toplotna in električna prevodnost večji. Zelo dobro se obnesejo kombinacije Ag - Ni, ki jih dobimo s prešanjem praha ene in druge kovine, potem so tu še impregnirane zlitine, ki imajo ogrodje iz sintranega W ali Mo, polnilo pa je Ag ali Cu. Dobro se obnesejo tudi ti. kontaktni bimetali iz Cu, medenine, bronca, Ni ali Fe z vgrajenim slojem plemenite kovine.
3. Material mora biti odporen tudi proti obrabi. To je predvsem odvisno od trdote materiala in od načina pomikanja kontaktov. Lahko gre za pritisk površin, za drsenje, za udarjanje, za kotaljenje ipd. Pri mehansko zelo obremenjenih kontaktih, kot npr. pri drsnih, uporabljamo trde neplemenite materiale. Trdoto lahko še nekoliko povečamo, če jih zlivamo z Ni, P, ali Be. Vendar pa je pri neplemenitih kovinah nevarnost, da pride do izrabe že zaradi hitrejšje oksidacije.
4. Do obrabe materiala lahko pride tudi zaradi odgorenja oziroma izparevanja materiala. Med iskrenjem in gorenjem električnega obloka prihaja na kontaktih do prenašanja materiala. Kontaktna površine namreč niso povsem gladke. Zaradi hrapavosti kontaktna površina se dotikalna površina pri odpiranju kontakta zmanjšuje. Povečuje se specifična obremenitev te površine, zaradi česar lahko temperatura močno naraste. Material se na tem mestu tali in izpareva, prihaja pa tudi do toplotne emisije elektronov, ki jih pospešuje močno električno polje ob razklenitvi kontaktov. Prosti elektroni, ki se pospešeno gibljejo, ionizirajo kovine. Pri enosmernem toku prihaja tako do trganja materiala s pozitivnega pola in do nalaganja materiala na negativnem polu. Do tega pojava prihaja tudi pri sklenitvi kontakta zaradi "trepetanja", vendar v precej manjšem obsegu. Je pa tu večja nevarnost, da pride do zvarjenja kontaktov. Prvi kontakt je vzpostavljen preko zelo majhne površine, kar povzroča močno segrevanje in zvaritev kontaktov. V takšnem primeru uporabljamo W, trdo srebro s 3 - 10 % Cu, pogosto pa tudi Ag z dodatkom Cd ali celo grafita.

Izguba materiala zaradi zgorevanja, izparevanja ali prenašanja je precej manjša, če kontakti sklepajo in razklepajo tokokroge brez nastanka električnega obloka. To je možno doseči, če so preklopne napetosti dovolj nizke, da ne pride do ionizacije prostora med kontakti, ali pa pri tokih, ki so še tako majhni, da iskra ugasne takoj ob odmikanju kontaktov. Možnost nastanka električnega obloka definiramo s ti. najmanjšo napetostjo obloka in se giblje pri vseh kovinah v mejah od 12 do 22 V. Če je napetost nižja, potem lahko prekinjamo neomejene toke brez nevarnosti, da bi prišlo do obloka. Pri višjih napetostih je nastanek obloka odvisen od velikosti toka. V praksi uporabljamo Ag pri tokih do cca 1 A, W pri večjih tokih in napetostih, grafit pa pri nizkih napetostih in velikih tokih. Na sliki 4.6.1 so za nekatere materiale prikazane odvisnosti mejnih tokov od napetosti.



Slika 4.6.1 Mejne vrednosti napetosti in tokov nekaterih materialov za nastanek električnega obloka

4.6.1 Razdelitev kontaktov po tokovni obremenitvi

Glede na tokovno obremenitev delimo kontakte na tiste za majhne, za srednje in za velike obremenitve.

4.6.1.1 Kontakti za majhne tokovne obremenitve

Med kontakte za majhne obremenitve uvrščamo precizne kontakte za instrumente, releje ipd., ki vedno delujejo v področju brez električnega obloka in z minimalno obrabo. Pri teh potrebujemo čim manjšo in čim bolj konstantno prehodno upornost oziroma kemično obstojnost površine. Pritiski so zelo majhni in znašajo približno 0,2 N. Če želimo doseči odlično korozijsko obstojnost, potem uporabljamo Pt, Au in Rh. Zaradi visoke cene teh kovin

in zaradi dobre toplotne prevodnosti, zelo pogosto uporabljamo kontakte, kjer je Cu ali Ag nosilna kovina, ki jo nato le prevlečemo s Pt.

Čisto srebro (Ag) je dokaj mehko, zato ga v glavnem uporabljamo v zlitinah. Pri uporabi v merilni tehniki najpogosteje uporabljamo zlitino Au - Pt. Ne oksidira in ima zelo konstantno prehodno upornost.

Še boljša je zlitina Pt - Ir, kjer je Ir do 5 %. Ta zlitina ima še posebno dobre mehanske lastnosti, saj jo lahko valjamo do debeline 0,05 mm. Največ jo uporabljamo za peresne kontakte z visokimi zahtevami. Tudi kemično je izredno obstojna, prehodna upornost je majhna in konstantna tudi pri majhnih pritiskih.

Majhno prehodno upornost v neugodnih atmosferskih pogojih ima zlitina Au - Ag z do 3 % Ni. Ni dodajamo za povečanje mehanske trdnosti Au, vendar le toliko, da ne poslabšamo kemične obstojnosti. Zaradi Ag ima nižjo ceno in manjšo specifično težo. Uporabljamo jo pri časovnih relejih, pri merilnih napravah in merilnih preklopnikih.

4.6.1.2 Kontakti za srednje velike tokovne obremenitve

Kontakti za srednje obremenitve preklaplajo tokove do 20 A pri napetostih do 600 V. Pri teh vrednostih že prihaja do intenzivnejšega izrabljanja materiala, zato iščemo kompromisno rešitev med mehansko trdnostjo, časovno nespremenljivostjo in velikostjo prehodne upornosti. Pomembna je tudi toplotna prevodnost, saj se kontakti že občutneje grejejo. Kemična obstojnost tu ni najpomembnejša, saj oblok prodira skozi slabše prevodno plast in čisti kontakte. Pri teh kontaktih uporabljamo W, Ag in zlitine Ag - Cd ter sestavljene kovine Ag - W, Ag - Mo, Ag - Ni. Zlitina Ag - Cd je bolj odporna proti obrabi. W je zelo trd material in ga zato težje obdelujemo. Kontakte izdelujemo tako, da ploščice iz W privarimo na nosilce iz Fe, medenine ali Cu. Ker je odporen na električni oblok, ga uporabljamo tudi pri večjih obremenitvah. S sintranjem W, Ag in Mo dobimo materiale z boljšimi električnimi lastnostmi. Podobno velja tudi za sintranje teh kovin s Cu.

4.6.1.3 Kontakti za velike tokovne obremenitve

Za obremenitve preko 20 A uporabljamo drugačne izvedbe kontaktov od teh, ki smo jih spoznali do sedaj. Zaradi obremenitev prihaja do močnega segrevanja, hitre obrabe in do problema z varjenjem kontaktov. Stikalne površine morajo biti večje, obenem pa so temu primerno večje tudi pritezne sile (cca. 100 N). Pri konstrukciji moramo paziti, da dosežemo dobro odvajanje toplote.

Za izdelavo teh kontaktov najpogosteje uporabljamo trdi Cu in njegove zlitine ter Ag in njegove zlitine. Zaradi oksidacije Cu, je njegova preklonna moč nekoliko omejena, saj bi pri debelejši oksidni plasti prihajalo do pregrevanja. Temu se izognemo z uporabo Ag. Zelo pogosto se kontakt izdelava tudi tako, da se srebrno prevleko prispajka na bakreno podlago.

4.6.2 Razdelitev kontaktov po načinu preklapljanja

Po načinu preklapljanja delimo kontakte v tri skupine:

- a) stalne,
- b) prekinjevalne,
- c) drsne.

4.6.2.1 Stalni kontakti

Tipični primeri stalnih kontaktov so ločilke, ploščate sponke, vijačne sponke itd. Če so kontakti atmosfersko zaščiteni, potem lahko uporabljamo široko paleto materialov. Če te zaščite ni ali pa se ji želimo izogniti, potem uporabimo materiale, ki so korozijsko odporni in ceneni. To so Cu, Ag, bron, medenina, ali pa tudi nerjavna jekla. Zaradi različnih električnih naravnih potencialov Cu in Al, pride pri stiku teh dveh kovin do korozije. Temu se lahko izognemo z ustrezno zaščito ene od obeh kovin.

4.6.2.2 Prekinjevalni kontakti

Za večje obremenitve uporabljamo Ag, W, Mo, Ni in Cu. Pri posebnih izvedbah prekinjevalnih stikal se preklapljanje izvaja v medijih, kjer se doseže višjo prebojno trdnost in odlično korozijsko zaščito. Kot medij se najpogosteje uporablja vakuum, olje ali inertne pline kot npr. SF₆.

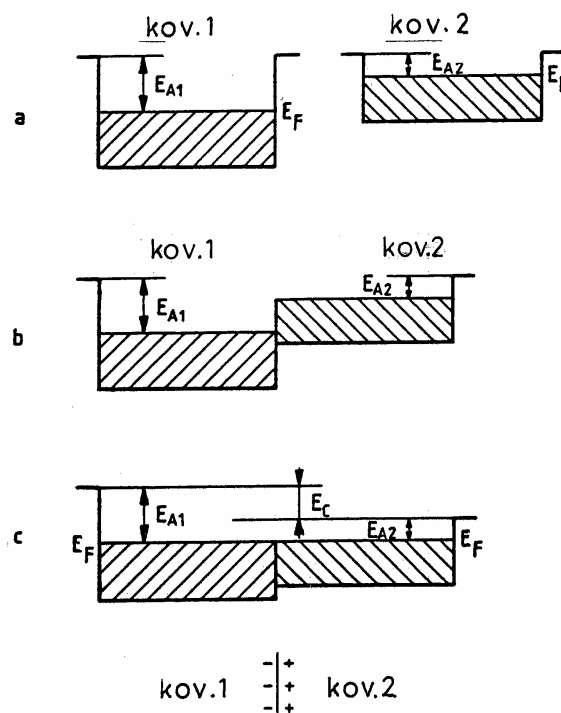
Za prekinjevalne kontakte pri manjših tokovnih obremenitvah uporabljamo kovine, ki so korozijsko dobro obstojne kot npr. Au, Ag, Pt, Ni. Tudi tu uporabljamo zlitine in sintrane materiale kot npr. Pt – Ir ali Pt sinter napolnjen s Cu ali Ag.

4.6.2.3 Drsni in kotalni kontakti

Drsni in kotalni kontakt je istočasno tudi prekinjevalni, saj se mesta na drsnih ploskvah neprestano sklepajo in prekinjajo. Za tovrstne kontakte so najbolj uporabni materiali, ki sami sebe mažejo. En kontakt je vedno srebrov, kromov ali kadmijev bron, drugi kontakt (ščetka) pa je izdelan iz amorfne oglja, grafita, metaliziranega grafita ali mehkih zlitin.

4.6.3 Nekatere pomembnejše lastnosti spojev različnih materialov

Enega od revolucionarnih spojev izkoriščamo v polprevodniški tehniki in govorimo o pn spoju. Med najpomembnejše zveze štejemo stike kovine s kovino in kovine s polprevodnikom. Pri tem zasledimo termoelektrične pojave, ki jih s pridom izkoriščamo pri termoelementih, Peltierjevih ploščah kakor tudi pri usmerniških in ohmskih spojih kovine s polprevodnikom. Na sliki 4.6.2 vidimo poenostavljena energijska modela dveh različnih kovin 1 in 2.

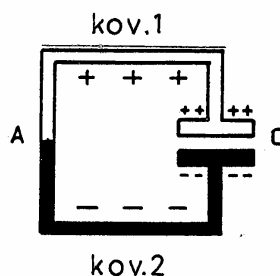


Slika 4.6.2 Energijske razmere prostih elektronov v kovinah z različnim izstopnim delom

Obe kovini imata različni vrednosti izstopnega dela. Če sedaj obe kovini staknemo, potem na stični površini izgine potencialna pregrada (Slika 4.6.2b). Vidimo, da nekaj elektronov druge kovine zavzame energijske vrednosti, ki so v prvi kovini še proste. Zaradi tega nekateri elektroni odtečejo iz druge kovine v prvo. Na ta način se kovina 1 nabije negativno napram kovini 2, kjer imamo prav toliko pozitivnih nabojev. Nastane torej potencialna razlika, ki ta dva energijska modela premakne in tako onemogoči nadaljnji pretok elektronov med kovinama. To potencialno razliko oz. napetost lahko izračunamo s pomočjo statistične termodinamike. Pri tem se izkaže, da je potencialna razlika, ki jo imenujemo tudi kontaktna napetost, enaka razliki izstopnih del obeh kovin:

$$W_{A1} - W_{A2} = W_C = e \cdot U_{12} \quad (4.6.1)$$

To je napetost, ki potrebna, da se izenačita Fermijeva nivoja obeh kovin. Za merjenje kontaktne napetosti uporabljamo Kelvinovo metodo, ki je prikazana na sliki 4.6.3.



Slika 4.6.3 Merjenje kontaktne napetosti

Obe kovini sta na levi strani staknjeni, na desni strani pa tvorita kondenzatorski plošči. Če spremenimo razdaljo med ploščama, se spremeni kapacitivnost kondenzatorja in ker velja enačba $Q = C U$, se spremeni tudi naboj med ploščama. Pri tem steče električni tok in na ta način lahko posredno izmerimo tudi kontaktno napetost.

Kontaktne napetosti so precej odvisne od nečistoč na površini, od količine adsorbiranih plinov in od orientacije kristalov. Pri W niha kontaktna napetost za več kot 30 %. Zato večkrat zasledimo v literaturi različne vrednosti kontaktnih napetosti.

Prve raziskave na tem področju je opravil že Volta. V tabeli 4.6.2 so razvrščeni nekateri kovinski pari in njihove kontaktne napetosti (Bergmann, Schäfer):

$U_{Zn,Pb} = 0,39 \text{ V}$
$U_{Pb,Sn} = 0,06 \text{ V}$
$U_{Sn,Fe} = 0,30 \text{ V}$
$U_{Fe,Cu} = 0,14 \text{ V}$
$U_{Cu,Ag} = 0,08 \text{ V}$
$U_{Ag,Pt} = 0,12 \text{ V}$

Tabela 4.6.2 Napetosti nekaterih kovinskih parov

Prvi element v vsakem paru je pozitiven glede na drugega. Zn je torej pozitiven glede na Pb, ta je pozitiven glede na Sn itd. Na ta način lahko kovine razvrstimo v ti "Voltovo napetostno vrsto":

$$+ \text{Zn, Pb, Sn, Fe, Cu, Ag, Pt, } - \quad (4.6.2)$$

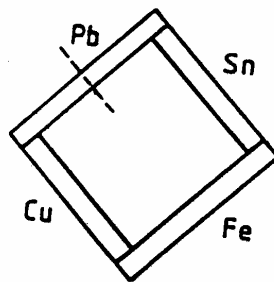
Pri tem se izkaže, da je kontaktna napetost dveh poljubno izbranih kovin v vrsti enaka vsoti vmesnih vrednosti, pri čemer je vseeno ali se ti dve kovini stikata ali pa so vmes še druge kovine. Tako je npr. kontaktna napetost med Sn in Cu:

$$U_{\text{Sn,Cu}} = 0,44 \text{ V.} \quad (4.6.3)$$

Skupna kontaktna napetost kovinske verige Sn-Fe-Cu je prav tako enaka:

$$U_{\text{Sn,Fe}} + U_{\text{Fe,Cu}} = 0,30 \text{ V} + 0,14 \text{ V} = 0,44 \text{ V} \quad (4.6.4)$$

Ker je $U_{AB} = -U_{BA}$, (3) potem mora biti vsota napetosti v zaključeni zanki kovinskih spojev enaka nič. Naboj je v ravnotežju, zato v krogu ne teče el. tok.



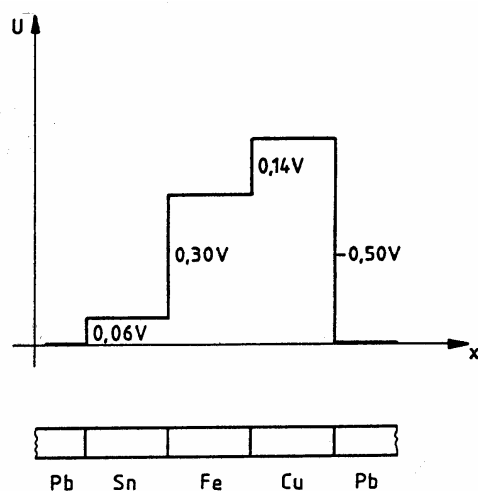
Slika 4.6.4 Sklenjena vezava različnih kovin

Za zaključeno verigo na sliki 4.6.4 velja:

$$U_{\text{Pb,Sn}} + U_{\text{Sn,Fe}} + U_{\text{Fe,Cu}} + U_{\text{Cu,Pb}} = 0 \quad (4.6.5)$$

$$0,06 \text{ V} + 0,30 \text{ V} + 0,14 \text{ V} + U_{\text{Cu,Pb}} = 0 \quad (4.6.6)$$

$U_{Cu,Pb}$ ima zaradi obrnjenega vrstnega reda in v skladu z enačbo 4.6.4 negativen predznak in sicer $U_{Cu,Pb} = -0,50$ V. Če obroč na označenem mestu prekinemo, potem dobimo potek napetosti kot ga vidimo v diagramu na sliki 4.6.5. Iz slike je razvidna veljavnost Voltove napetostne vrste. Prevodne snovi, ki se ravnaajo po tem zakonu imenujemo prevodnike prve vrste. Izkaže se namreč, da niso vse prevodne snovi članice te vrste. Te imenujemo prevodniki druge vrste. Pri teh namreč ne velja, da je vsota kontaktnih napetosti več prevodnikov v zaključeni verigi enaka nič, pač pa teče v sklenjenem tokokrogu električni tok. Takšni prevodniki so npr. solne raztopine in kisline, oz. galvanski členi.



Slika 4.6.5 Potek napetosti v sklenjem tokokrogu pri prevodnikih prve vrste

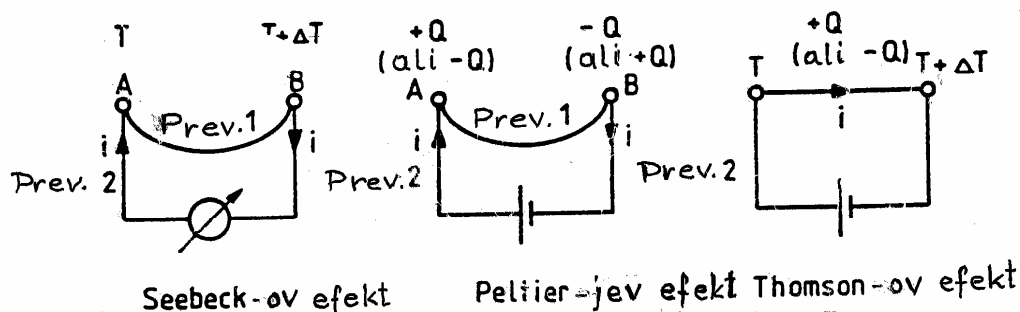
Ker so elektroni (v polprevodnikih pa tudi vrzeli) nosilci kinetične energije, lahko v kovinah in polprevodnikih opazimo termoelektrične pojave. Najpomembnejši pojavi so: Seebeck-ov, Peltier-jev in Thomson-ov efekt (Slika 4.6.6).

Pri Seebeck-ovem efektu dobimo med dvema kovinama potencialno razliko, ker imamo dve različni kovini, ki sta segreti na različni temperaturi.

Pri Peltier-jevem pojavu nastopi segrevanje ene kontaktne strani oz. ohlajanje druge, če v tokokrogu teče električni tok. Segrevanje oz. ohlajanje je proporcionalno električnemu toku (v nasprotju z Joulovim zakonom, kjer je $P = I^2 R$). Faktor, ki pri tem nastopa je ti. Peltier-ov koeficient, ki je pri kovinah velikostnega reda 10^{-2} do 10^{-3} V. Pri spremembi smeri električnega toka se tudi toplo in hladno mesto zamenjata.

Pri Thomson-ovem pojavu se homogen vodnik segreje oz. ohladi, če vzdržujemo temperaturno razliko in električni tok skozi vodnik. Pretvorjena toplota je proporcionalna

$\Delta T i$. Proporcionalni faktor je τ . Thomson-ov koeficient, (velikostni razred za Bi je 10^{-5} V/°C). Če zamenjamo smer električnega toka ali temperaturni padec, se začne vodnik ohlajati.



Slika 4.6.6 Trije termoelektrični pojavi

V elektrotehniko zelo pogosto uporabljamo spoje dveh kovin za merjenje temperature. Sestavljeni so iz dveh žic in pri tem želimo, da nam dajo čim večjo termoelektrično napetost. Za izdelavo teh spojev (termočlenov) uporabljamo naslednje zlitine:

- kopel (56 % Cu, 44 % Ni),
- alumel (95 % Ni, 5 % Al, Si, Mg),
- kromel (90 % Ni, 10 % Cr)

in zlitine konstantana, Pt - Rh (90 % Pt, 10 % Rh), potem čiste kovine kot npr. Cu, Fe, Ni, Pt. Bolj redko pa pridejo v poštev Au, W in zlitine W - Mo. V praksi srečamo največkrat termoelemente za temperature do 350 °C, ki so sestavljeni iz Cu - konstantan, Cu - kopel. Za temperature do 600 °C uporabljamo Fe - konstantan, Fe - kopel in kromel - kopel. Za temperature do 900-1000 °C uporabljamo kromel - alumel in Ni - kromnikelj. Termoelement Pt - platinarodij uporabljamo za temperature do 1600 °C, za še višje temperature do 3000 °C pa termoelement W - volframmolibden.

Največjo termoelektrično napetost dobimo s kombinacijo kromel - kopel, pri kateri dobimo pri temperaturni razliki 100 °C napetost 8 mV. Zelo občutljiv je tudi termoelement Fe - konstantan s približno 5,4 mV/100 °C. Termoelement Pt - platinarodij ima manjšo občutljivost (cca 0,7 mV/100 °C). Ker pa ga uporabljamo za zelo visoke temperature, je dobljena napetost kljub temu uporabna. Če se instrument za merjenje nahaja daleč proč od merilnega mesta, moramo uporabiti ti. vode za izenačevanje, ki so izolirani in pogosto iz

istega materiala kot termoelement. S tem se izognemo napaki pri merjenju. Debeline žic za termoelemente so glede na notranjo upornost termoelementa od 0,3 do 6,5 mm.

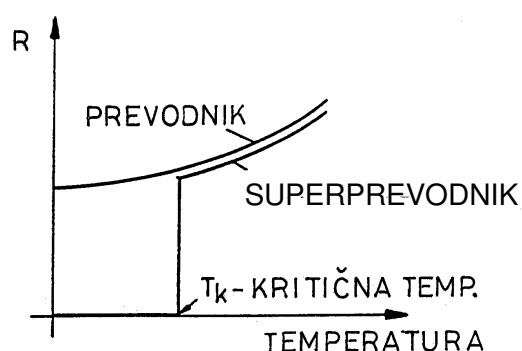
Za zaščito termoelementov uporabljamo varjene ali brezšivne cevi iz materiala, ki je obstojen pri visokih temperaturah (Fe-Cr ali Cr-Ni).

4.7 Superprevodni materiali

4.7.1 Superprevodnost

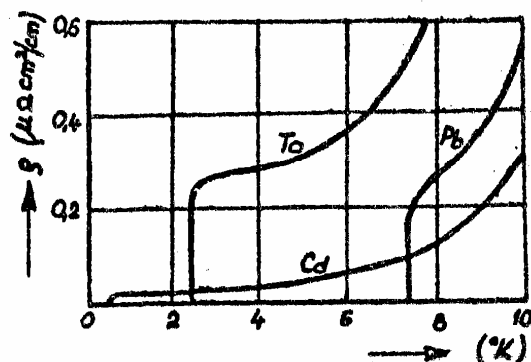
Iz dosedanjega razmišljanja o vplivih na prevodnost kovin lahko sklepamo, da se njihova prevodnost pri nižjih temperaturah povečuje.

Pomembnejši premik pri študiju lastnosti materialov pri nizkih temperaturah je omogočil Kammerlingh leta 1908. Prvič mu je uspelo utekočiniti He, ki ima najnižjo temperaturo utekočinjenja 4,2 K (-269 °C). V elektrotehniki pa nas predvsem zanima obnašanje prevodnih materialov oziroma njihove specifične upornosti v bližini absolutne ničle. V splošnem velja, da se prevodnost kovin pri nižjih temperaturah povečuje. Pri ohlajanju se amplitude nihanja atomov v kristalni mreži zmanjšujejo, to pa omogoča večjo gibljivost elektronov in na ta način tudi večjo električno prevodnost. Pri tem načinu razlaganja spremembe prevodnosti pri nižjih temperaturah bi pričakovali, da bo upornost kovine, ki nima povsem monokristalne strukture, pri absolutni ničli zavzela neko končno vrednost; pri absolutno čistih kovinskih strukturah pa naj bi upornost popolnoma izginila, saj ni več nihanja atomov zaradi toplote v kristalni strukturi. Meritve pri Pt so to trditev tudi potrdile. Meritve pri Hg pa so pokazale, da zgornja predpostavka ne drži. Pri 4,2 K vrednost upornosti vzorca ni bila več pričakovanih 0,1 Ω , ampak je postala skokoma izredno majhna, oziroma že nemerljiva. Na sliki 4.7.1 je prikazana odvisnost upornosti od temperature pri običajnih prevodnikih in pri superprevodnikih. Upornost se najprej zmerno zmanjšuje, pri kritični temperaturi T_k pa skočno. V intervalu s širino cca 10^{-5} K zavzame nemerljivo majhno vrednost. Ta vrednost je onkraj merilne meje, ki je okrog 10^{-17} upornosti Cu.



Slika 4.7.1 Potek električne upornosti v bližini absolutne ničle pri prevodnikih in superprevodnikih

Poleg Hg poznamo še celo vrsto kovin, ki postanejo superprevodne v bližini absolutne ničle, Temperaturne odvisnosti specifičnih upornosti nekaterih izmed njih so prikazane na sliki 4.7.2.



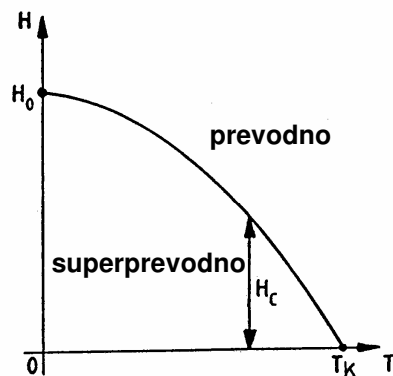
Slika 4.7.2 Poteki specifičnih upornosti nekaterih kovin v področju okrog absolutne ničle

Eden od postopkov za meritev izredno majhnih upornosti temelji na meritvi iznihajnega časa inducirane toka v zaključenem tokokrogu. Vrednost toka v superprevodnem obroču lahko ocenimo tudi s pomočjo vrtilnega momenta, ki ga razvija ob prisotnosti zunanjega magnetnega polja. Če uporabimo običajne prevodnike, se tok v obroču izniha v času 10^{-12} s, v superprevodnem obroču pa ostaja nespremenjen zelo dolgo. S poskusom je bilo ugotovljeno, da se v obdobju treh let amplituda toka ni spremenila. Kakor hitro pa temperatura preseže kritično točko, material prevzame običajno vrednost specifične upornosti, tok začne upadati in energija se pretvarja v toploto po Joulovem zakonu.

Vendar pa temperatura ni edina veličina, ki vpliva na stanje superprevodnosti kovin. Odvisno je tudi od jakosti magnetnega polja H . Kakor hitro jakost magnetnega polja preseže določeno vrednost, material izgubi superprevodno lastnost in postane običajni prevodnik. Če prikažemo obe veličini - temperaturo in magnetno poljsko jakost v grafu, dobimo značilno parabolično mejno krivuljo na sliki 4.7.3, ki razmejuje področji superprevodnega in prevodnega stanja materiala. Opišemo jo lahko z naslednjo enačbo:

$$H_c = H_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (4.7.1)$$

V tabeli 4.7.1 so zapisane številske vrednosti kritičnih jakosti in gostot magnetnega polja ter kritičnih temperatur za posamezne kovine.



Slika 4.7.3 Odvisnost superprevodnega stanja od temperature in od jakosti magnetnega polja

Kovina	T_K [°K]	H_0 [A/cm]	$B_0 = \mu_0 H_0$ [Vs/m ²]
Al	1,18	79	0,0099
Cd	0,54	24	0,0030
Ga	1,09	40	0,0050
Hg (α)	4,15	328	0,0412
Hg (β)	3,95	270	0,0339
In	3,40	233	0,0293
Ir	0,14	15	0,0019
Mo	0,92	78	0,0098
Nb	9,46	1575	0,1979
Pb	7,19	639	0,0803
Sn	3,72	246	0,0309
Ta	4,48	660	0,0829
Th	1,37	130	0,0163
Ti	0,39	16	0,0020
Tl	2,39	136	0,0171
V	5,30	1050	0,1300
W	0,0154	0,92	0,0001
Zn	0,92	40	0,0050

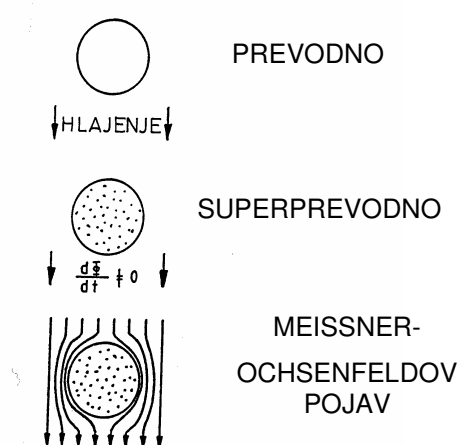
Tabela 4.7.1 Kritične temperature in magnetne poljske jakosti superprevodnih kovin

Superprevodne lastnosti pa nimajo le elementi v zgornji tabeli temveč tudi mnoge zlitine. Nekatere, tehnično pomembnejše zlitine, so navedene v tabeli 4.7.2. V nekaterih primerih je kritična temperatura odvisna tudi od pritiska. Ge in Si sta le pod pritiskom superprevodna.

Zlitina	T_K [°K]
Nb - Zr	9 - 11
Nb - Ti	8 - 10
Nb - Ti - Zr	8 - 10
Nb - Ti - Ta	8 - 10
Nb ₃ - Sn	18,3
V ₃ - Ga	14,5

Tabela 4.7.2 Superprevodne zlitine

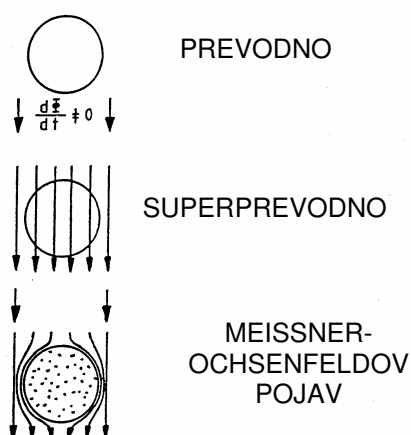
Izredno nizka upornost pri končnih temperaturah pa ni edina značilna lastnost superprevodnika. Zanimivo je tudi, da prihaja do izriva magnetnega polja iz notranjosti superprevodnega vodnika. To lastnost bi lahko jemali kot samo po sebi umevno, vendar ni tako. Na sliki 4.7.4 je prikazan postopek ohlajanja prevodnika in prehod v superprevodno stanje.



Slika 4.7.4 Ohlajanje superprevodnika brez zunanega magnetnega polja

Če v superprevodnem stanju vzbudimo še zunanje magnetno polje, se v vodniku inducira električni tok, ki je po Lentzovem pravilu usmerjen tako, da magnetno polje oslabi oziroma izrine magnetne silnic iz vodnika (Meissner - Ochsenfeldov pojav). Ta pojav je podoben

izrivu magnetnega polja zaradi vrtnčnih tokov, le da se tokovi pri superprevodniku ne iznihajo. Na sliki 4.7.5 je prikazan nekoliko drugačen vrstni red ohlajanja in generiranja magnetnega polja kot v prvem primeru. V tem primeru Meissner - Ochsenfeldov pojav ni več tako očiten. Tokrat najprej postavimo vodnik v magnetno polje, nato pa ga začnemo ohlajati, da preide v superprevodno stanje. Čeprav pri prehodu v superprevodno stanje ni prišlo do spremembe magnetnega pretoka, se obnaša kot idealen diamagnetni material in izrine magnetno polje iz njegove notranjosti. To pomeni, da lahko v takem stanju tudi sam generira nek tok, ki vzdržuje notranjost brez magnetnega polja. Ta pojav pa ni več v skladu z zakoni klasične elektrodinamike.



Slika 4.7.5 Postavitev prevodnika v magnetno polje in ohlajanje do superprevodnega stanja

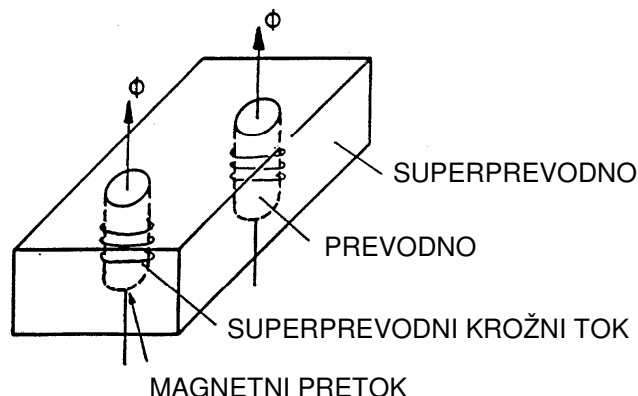
Če magnetno polje ne more prodreti v notranjost superprevodnega vodnika, potem v notranjosti vodnika tok ne teče. Tok v superprevodniku je izrinjen na površino in je omejen na zelo tanko plast debeline reda 10^{-8} m. Takšen tok torej povzroča na površini cilindričnega vodnika jakost magnetnega polja:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4.7.2)$$

Kakor hitro magnetna poljska jakost doseže kritično vrednost H_K , in s tem tudi tok I_K (Silbseejeva hipoteza), pride do prehoda iz superprevodnega stanja v prevodno.

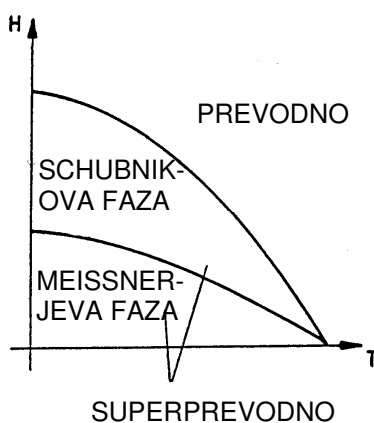
Superprevodnike, pri katerih pride do izriva celotnega magnetnega polja iz notranjosti vodnika, imenujemo superprevodniki prve vrste oziroma mehki superprevodniki. Poznamo pa tudi superprevodnike, pri katerih so kritične magnetne poljske jakosti za nekaj desetiških

potenc večje in so za uporabo v tehniki še posebno zanimivi. Delno prodiranje magnetnega pretoka se odvija preko ti. pretočnih kanalov, ki so prikazani na sliki 4.7.6.



Slika 4.7.6 Prevodni kanali pri superprevodnikih druge vrste

Imamo torej dve območji in sicer območje z normalno prevodnostjo, ki je vgnezdno v območje superprevodnosti. S pomočjo takšnega mešanega stanja (ti. Schubnikova faza) je možno vzdrževati superprevodnost tudi pri močnejših magnetnih poljih. Vse dokler so superprevodna območja povezana, je električna upornost "neskončno majhna". Pri previsokih pa tudi ti, superprevodniki druge vrste, preidejo v območje normalne prevodnosti. Na sliki 4.7.7 vidimo odvisnost magnetne poljske jakosti H od temperature pri superprevodnikih druge vrste.



Slika 4.7.7 $H - T$ karakteristika pri superprevodnikih druge vrste

Zaradi Lorentzove sile lahko tokovi v superprevodnikih druge vrste premikajo prevodne kanale in s tem povzročajo nestabilnosti. Z umetnim vgrajevanjem ti. motilnih mest (nem.

Pinning-Zentren), je možno te prevodne kanale fiksirati. Takšne superprevodnike imenujemo superprevodnike tretje vrste oziroma trde superprevodnike ali tudi superprevodnike pri visokih magnetnih poljih.

4.7.2 Nekaj razlag o nastanku superprevodnosti

4.7.2.1 Klasična razlaga superprevodnosti

Ena od fenomenološko-empiričnih teorij superprevodnosti se naslanja na Newton-ov zakon o delovanju sil,

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -e \cdot \vec{E}, \quad (4.7.3)$$

ki v povezavi z izrazom o gostoti toka:

$$\vec{i} = -e \cdot n \cdot \vec{v}, \quad (4.7.4)$$

da naslednjo enačbo:

$$\Lambda \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{E}. \quad (4.7.5)$$

Λ je okrajšava za: $\Lambda = \frac{m}{n \cdot e^2}$, m je masa elektronov [kg], n je gostota nabojev na enoto prostornine [m^{-3}] in e je vrednost naboja elektrona [As].

Če enačbo 4.7.5 vstavimo v drugo Maxwelllovo enačbo:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (4.7.6)$$

potem dobimo:

$$\Lambda \cdot \text{rot} \frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.7.7)$$

Tako je F. H. London prišel do dveh enačb, ki opisujeta lastnosti superprevodnosti:

$$\Lambda \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{E} \quad \text{1. Londonova enačba} \quad (4.7.8)$$

in

$$\Lambda \cdot \text{rot} \vec{i}_s = -\vec{B} \quad \text{2. Londonova enačba} \quad (4.7.9)$$

Prva Londonova enačba, ki je identična enačbi 4.7.5 pravi, da superprevodni tok i_s lahko teče ustaljeno tudi brez prisotnosti električnega polja. Druga Londonova enačba pa zajema Meissner-Ochsenfeld-ov pojav in opisuje izriv magnetnih silnic iz superprevodnika.

Analiza druge enačbe pokaže, da gostota magnetnega pretoka v superprevodniku pada od površine, kjer je enaka B_s , proti notranjosti po enačbi:

$$B(x) = B_s \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad (4.7.10)$$

kjer je $\lambda = \sqrt{\frac{A}{\mu_0}}$, (4.7.11)

ti. Londonova vdorna globina. Po velikosti je λ reda 10^{-8} m in se v precejšnji meri ujema z izmerjenimi vrednostmi.

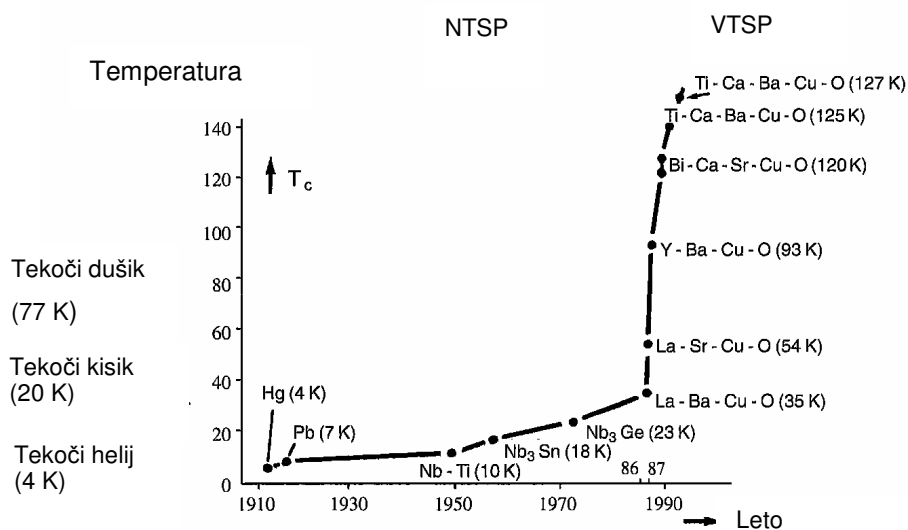
4.7.2.2 Bardeen-Cooperjeva razlaga superprevodnosti

Poleg pravkar omenjene razlage pa so različni avtorji razvili nove teorije. Teorijo, ki izhaja iz kvantne mehanike, so razvili **Bardeen**, **Cooper** in **Schrieffer** (BCS). Izpeljava dokazov za BCS teorijo je zahtevnejša, zato bi se na tem mestu omejili le na nekatere glavne poudarke. Teorija je osnovana na dejstvu, da se pri dovolj nizki temperaturi vzpostavijo privlačne sile med prevodnimi elektroni, pri čemer tvorijo ti. Cooperjeve pare. Njihov skupni spin je enak nič. Vsi Cooperjevi pari zavzamejo eno kvantnomehansko stanje (k.m. stanje). Ker se vsi nahajajo v enem k.m. stanju, ne prihaja do izmenjave energije, in električni tok, ki ga prenašajo v vodniku, ne čuti nobene električne upornosti.

4.7.3 Pomembnejši dosežki v razvoju superprevodnih materialov in uporaba v tehniki

Predvsem po letu 1985 je opazen hiter napredek na tem področju. Osnovni cilj razvoja je, da bi lahko superprevodno stanje materiala izkoriščali pri čim višji temperaturi. V tem primeru govorimo o visokotemperaturni superprevodnosti - VTSP (Slika 4.7.8).

Doslej so bile za doseganje tako nizkih kritičnih temperatur potrebne zelo drage in zahtevne naprave. Uporaba te lastnosti materialov je bila upravičena le pri najmočnejših generatorjih. Pri novejših materialih lahko dosežemo superprevodno stanje že z bistveno cenejšo opremo in pri temperaturi, ki jo ima tekoči dušik (77 °K). Na ta način lahko računamo, da se bodo superprevodni materiali kmalu uporabljali tudi v energetskih sistemih srednjega in nižjega razreda moči.



Slika 4.7.8 Razvoj superprevodnih materialov

Na sliki 4.7.8 je prikazan model za uležajenje motorja s pomočjo superprevodnega materiala. Rotor motorja je iz trdomagnetnega materiala. Superprevodni material je nameščen spodaj tako, da rotor lebdi v magnetnem polju. V tem primeru izkoriščamo lastnost superprevodnika, da izriva magnetno polje. Zgornje navitje generira vrtilno polje in tako omogoča vrtenje rotorja, ki se vrti praktično brez izgub z "enako" vrtilno hitrostjo kot magnetno polje.



Slika 4.7.9 Uležajenje rotorja motorja s pomočjo superprevodnika

Superprevodnost danes najpogosteje uporabljamo pri ti. superprevodnih magnetih, za elektromagnetno lebdenje, pri električnih strojih, na področju fizike, ki se ukvarja z visokimi energijami, pri prenosu energije prek superprevodnih kablov itd.