

ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI, materijali koji služe izradi električnih i magnetskih krugova elektrotehničkih proizvoda. S obzirom na električnu vodljivost i ponašanje u električnom polju, materijali se mogu podijeliti na vodljive, poluvodljive i izolacijske. S obzirom na magnetsku vodljivost i ponašanje u magnetskom polju, ti isti materijali mogu se podijeliti na dijamagnetske, paramagnetske, feromagnetske, ferimagnetske i antiferomagnetske. U elektrotehnici je, međutim, uobičajena podjela materijala na temelju svojstava važnih za njihovu primjenu. Elektrotehnički materijali se prema tome kriteriju dijele u vodljive, poluvodljive, izolacijske, magnetske i nemagnetske.

U ovom članku bit će obrađeni magnetski, vodljivi i izolacijski materijali. Poluvodljivi materijali su obrađeni u posebnom članku (v. *Poluvodiči*), a nemagnetski su materijali, zbog relativno manjeg značenja, ukratko spomenuti u poglavlju o magnetskim materijalima (v. pogl. Konstrukcijski materijali, str. 59).

MAGNETSKI MATERIJALI

U elektrotehnici je uobičajeno magnetskim materijalima smatrati feromagnetske i ferimagnetske materijale, jer se mogu magnetizirati relativno slabim magnetskim poljima, dok se ostali materijali (dijamagnetski, paramagnetski i antiferomagnetski) smatraju nemagnetskim.

Magnetizam, osnovni pojmovi

Magnetska svojstva materije uslovljena su strukturom atoma. Elektron, koji je nabijen negativnim električnim nabojem $-e$ i kruži oko pozitivno nabijene jezgre atoma kružnom frekvencijom ω , može se formalno razmatrati kao elementarna kružna struja i iznosa $-e\omega/2\pi$. Elementarnoj kružnoj struji pridružen je magnetski moment $\mathcal{M}$, koji je proporcionalan umnošku kružne struje i površine koju ona zatvara:

$$\mathcal{M} = \mu_0 i r^2 \pi = \frac{-e \mu_0}{2 m_e} m_e \omega r^2,$$

gdje je r polumjer kružne putanje elektrona, a m_e njegova masa. Koeficijent proporcionalnosti μ_0 zove se *magnetska konstanta* (apsolutna magnetska permeabilnost praznog prostora).

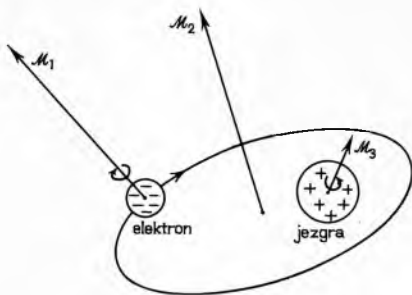
Impuls vrtnje $m_e \omega r^2$ može prema Bohrovom modelu atoma i kvantnoj mehanici biti samo višekratnik kvocijenta $\hbar/2\pi$ (gdje je $\hbar$ Planckova konstanta). Prirodna jedinica magnetskog momenta kružnog gibanja elektrona iznosi, prema tome,

$$\mathcal{M}_B = \frac{e \mu_0 \hbar}{4 \pi m_e};$$

ona je nazvana *Bohrov magneton* ($\mathcal{M}_B = 1,165 \cdot 10^{-29}$ Vsm). Istom jedinicom mogu se mjeriti i magnetski momenti pridruženi rotaciji elektrona oko vlastite osi (spinu) i rotaciji atomske jezgre.

Eksperimentom je utvrđeno da je magnetski moment pridružen spinu elektrona za 0,114% veći od Bohrovog magnetona, a proračunom pokazano da je magnetski moment pridružen spinu atomske jezgre 1836 dio Bohrovog magnetona.

Rezultantni magnetski moment atoma je vektorska suma magnetskih momenata uslijed kružnog gibanja svih elektrona tog atoma, njihove rotacije oko vlastite osi i rotacije jezgre atoma (sl. 1).



Sl. 1. Magnetski moment atoma (s jednim elektronom). $\mathcal{M}_1$ Magnetski moment spina elektrona, $\mathcal{M}_2$ magnetski moment kružnog gibanja elektrona, $\mathcal{M}_3$ magnetski moment spina atomske jezgre

Ukupan magnetski moment dijela volumena neke tvari jednak je vektorskoj sumi magnetskih momenata atoma u tom dijelu volumena.

U čvrstoj tvari ukupni je magnetski moment u većini slučajeva određen samo magnetskim momentima elektronskog spina, jer se magnetski momenti orbitalnog gibanja elektrona međusobno poništavaju.

Magnetski moment po jedinici volumena nazvan je *magnetska polarizacija* $\vec{J}$, ili unutarnja magnetska indukcija $\vec{B}_i$. Ako se tvar nalazi u magnetskom polju $\vec{H}$, ono će usmjeravati magnetske momente atoma (mehanički zakretni moment jednak je vektorskom umnošku magnetskog momenta s magnetskim poljem), pa će magnetska polarizacija biti proporcionalna jakosti magnetskog polja:

$$\vec{J} = \mu_0 \chi \vec{H};$$

koeficijent proporcionalnosti χ je *relativna magnetska susceptibilnost* ili, kraće, *magnetska susceptibilnost*; ona karakterizira magnetsku vodljivost tvari.

U izotropnoj tvari vektori $\vec{J}$ i $\vec{H}$ su paralelni i χ je skalar. U anizotropnoj tvari χ je tenzor, tj. $\vec{J}$ i $\vec{H}$ nisu paralelni.

Magnetska indukcija, odnosno gustoća magnetskog toka kroz tvar koja se nalazi u magnetskom polju $\vec{H}$, jednaka je:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}.$$

Kako je magnetska polarizacija proporcionalna magnetskom polju, može se pisati:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H},$$

gdje je μ (apsolutna) *magnetska permeabilnost*, a $\mu_r = 1 + \chi$ *relativna magnetska permeabilnost*.

Ukupni magnetski tok Φ kroz neku površinu A iznosi:

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}.$$

Magnetski tok je skalarna veličina. U homogenom magnetskom polju magnetski tok okomit na površinu A jednak je umnošku magnetske indukcije i površine:

$$\Phi = B \cdot A.$$

Magnetomotorna sila je linijski integral vektora magnetskog polja po krivulji integracije:

$$F_m = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l}.$$

Ako se integracija vrši po zatvorenoj petlji, magnetomotorna sila je jednaka sumi petljom ulančenih električnih struja:

$$F_m = \sum I.$$

Reluktancija (magnetski otpor) jednaka je omjeru između magnetomotorne sile i magnetskog toka:

$$R_m = \frac{F_m}{\Phi}.$$

Magnetski otpor upotrebljava se za analizu i proračun magnetskih krugova analogno električnom otporu u proračunu električnih krugova.

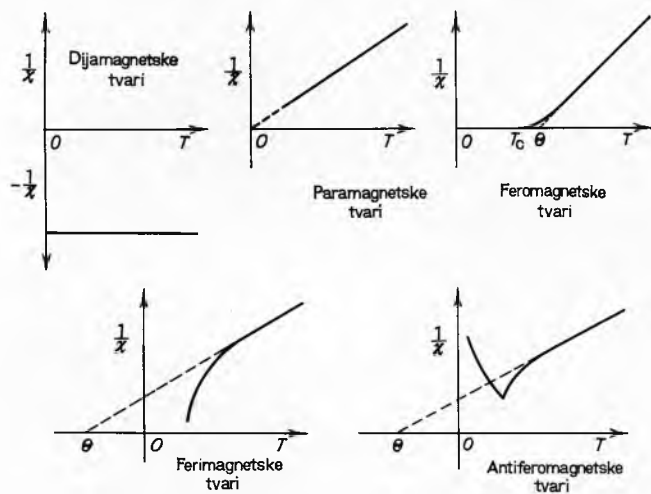
Ponašanje tvari u magnetskom polju

Prema ponašanju tvari u magnetskom polju, odnosno prema veličini i predznaku magnetske susceptibilnosti te njene ovisnosti o temperaturi (sl. 2), tvari dijelimo u *dijamagnetske*, *paramagnetske*, *feromagnetske*, *ferimagnetske* i *antiferomagnetske*. U posljednje vrijeme neki autori navode kao zasebnu grupu tzv. *metamagnetske* tvari. To su tvari koje, ovisno o temperaturi i jakosti magnetskog polja, imaju feromagnetska ili antiferomagnetska svojstva.

Dijamagnetizam i dijamagnetske tvari. Kad se tvar nalazi u magnetskom polju, ovo djeluje na pojedine komponente rezultantnog magnetskog momenta atoma ili iona, i to prema teoremu L. Larmora, tako da inducira dodatni magnetski moment precesije usmjeren protiv polja. Npr. elektron koji kruži oko jezgre atoma ponaša se u magnetskom polju kao zvrk u gravitacionom polju, tj. njegova os vrtnje opisuje oko smjera polja precesijsko gibanje. To dodatno gibanje, zbog naboja elektrona, predstavlja kružnu struju kojoj je magnetski moment suprotan smjeru narinutog magnetskog polja. Opisana se pojava naziva *dijamagnetizam*.

Budući da takvo djelovanje magnetskog polja na pojedine komponente magnetskog momenta atoma ili iona uvijek postoji, sve bi tvari morale biti dijamagnetske. Međutim, stvarno su *dijamagnetske tvari* samo one tvari u kojima su rezultatni magnetski momenti atoma ili iona jednaki nuli. To zato što je dijamagnetizam vrlo slaba pojava koja je redovito maskirana znatno jačim pojavama drugih vrsta magnetizma, te se može zapaziti samo u tvarima u kojima su rezultatni magnetski momenti atoma ili iona jednaki nuli.

Magnetska je susceptibilnost dijamagnetskih tvari dakle, negativna, vrlo mala (10^{-6} do 10^{-5}) i temperaturno neovisna.



Sl. 2. Kvalitativni prikaz recipročne vrijednosti magnetske susceptibilnosti $1/\chi$ kao funkcije apsolutne temperature T za različite vrste tvari. T_C Curieova temperatura, Θ paramagnetska Curieova temperatura

U nehomogenom magnetskom polju na tijelo sastavljeno od dijamagnetske tvari djeluje sila u smjeru slabijeg polja, tj. polje ga odbija.

Dijamagnetske tvari su većina nemetala, mnogi organski spojevi, mnogi metali (bakar, zlato, srebro, cink, olovo, živa, bizmut, berilij) i poluvodiči (germanij, silicij, selen). Dijamagnetska svojstva pokazuju također mnogi plinovi (vodik, dušik, plemeniti plinovi) i tekućine (npr. voda). Posebnu grupu dijamagnetskih tvari čine supravodiči u supravodljivom stanju (vidi poglavlje Supravodiči u ovom članku, str. 62).

Paramagnetizam i paramagnetske tvari. Paramagnetske tvari su one u kojima su rezultatni magnetski momenti atoma ili iona različiti od nule. Ali, zbog toplinskog gibanja atoma ili iona, njihovi rezultatni magnetski momenti stalno mijenjaju smjer, tako da je ukupni magnetski moment tijela od paramagnetske tvari jednak nuli. Tek u magnetskom polju se pojedini magnetski momenti, usprkos toplinskog titranja, više ili manje orijentiraju u smjer polja, te ukupni magnetski moment tijela od paramagnetske tvari postaje različit od nule. Ova pojava orijentiranja međusobno nezavisnih magnetskih momenata atoma ili iona u smjer narinutog magnetskog polja naziva se *paramagnetizam*. Zbog usmjeravanja magnetskih momenata atoma ili iona, magnetsko polje u paramagnetskim tvarima inducira magnetski tok gušće veće od one koja bi vladala na tom mjestu kad bi tamo bio prazan prostor. Magnetska susceptibilnost paramagnetskih tvari jest, dakle, pozitivna; ona je vrlo mala (10^{-6} do 10^{-3}) i obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi (Curieov zakon: $\chi = C/T$, gdje je C Curieova konstanta).

U nehomogenom magnetskom polju na tijelo od paramagnetske tvari djeluje sila u smjeru jačeg polja, tj. polje ga privlači.

Paramagnetske tvari su soli metala, alkalni metali, aluminij, magnezij, platina, tantal, volfram. I mnogi plinovi imaju paramagnetska svojstva (zrak, kisik i dr.).

Feromagnetizam i feromagnetske tvari. Kod određene udaljenosti atoma, odnosno iona u kristalnoj rešetki nekih metala i legura nastaje među susjednim magnetskim momentima snažno uzajamno djelovanje, koje ih nastoji orijentirati paralelno. U ograničenim područjima kristala, nazvanim *Weissova područja* ili

domene, iako nema vanjskog magnetskog polja, svi magnetski momenti, suprotstavljajući se toplinskom titranju, orijentiraju se više ili manje u istom smjeru. Domene su dakle spontano magnetizirane.

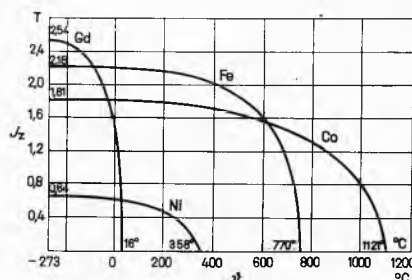
U nemagnetiziranoj feromagnetskoj tvari domene su orijentirane u različitim smjerovima, tako da je ukupni magnetski moment jednak nuli. Pod utjecajem vanjskog magnetskog polja, domene kojima je orijentacija paralelna smjeru polja rastu na račun ostalih domena, te je feromagnetska tvar i kod malih magnetskih polja snažno magnetizirana.

Opisana pojava spontanog magnetiziranja ograničenih područja kristala nazvana je *feromagnetizam*. Magnetska susceptibilnost feromagnetske tvari je pozitivna (veličine 10^0 do 10^6), ovisna o jakosti i frekvenciji magnetskog polja i temperaturi. Porastom temperature sve se više smanjuje spontano magnetiziranje, odnosno orijentiranost magnetskih momenata u domenama (smanjuje se magnetska polarizacija zasićenja J_s), i na određenoj temperaturi, nazvanoj *Curieova temperatura*, potpuno nestaje (sl. 3). Iznad Curieove temperature tvar gubi feromagnetska svojstva i postaje paramagnetska, a susceptibilnost opada sa daljim porastom temperature po Curie-Weissovom zakonu

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta},$$

gdje je temperatura Θ tzv. paramagnetska Curieova temperatura, koja je za približno desetak stupnjeva viša od Curieove temperature (v. sl. 2).

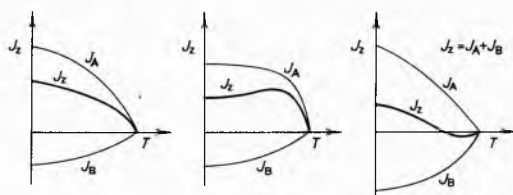
Feromagnetske tvari su željezo, nikal, kobalt i gadolinij, niz njihovih legura, neke legure neferomagnetskih metala: mangana, bizmuta, bakra, aluminija i kositra (npr. Heuslerove legure Cu_2MnAl i Cu_2MnSn , te binarne legure Mn-Bi i Mn-Al).



Sl. 3. Temperaturna ovisnost magnetske polarizacije zasićenja J_s feromagnetskih metala

Ferimagnetizam i ferimagnetske tvari. Pojava da se magnetski momenti susjednih atoma ili iona u ograničenim područjima kristala (domenama) uslijed međusobnog djelovanja djelomično poništavaju nazvana je *ferimagnetizam*.

Svojstva ferimagnetskih tvari najlakše se mogu objasniti modelom koji je predložio Neel: atomi ili ioni čiji su magnetski momenti orijentirani paralelno tvore jednu magnetsku podrešetku kristala A , a atomi ili ioni sa suprotno usmjerenim magnetskim momentima drugu magnetsku podrešetku B ; rezultatni magnetski moment svake domene je jednak sumi magnetskih momenata podrešetke A i B (sl. 4).



Sl. 4. Kvalitativni prikaz karakterističnih ovisnosti magnetske polarizacije zasićenja ferimagnetskih tvari J_s o apsolutnoj temperaturi T (K). J_A i J_B Magnetske polarizacije zasićenja podrešetke A i B

Magnetska susceptibilnost ferimagnetskih tvari je pozitivna (veličine 10^0 do 10^4) i ovisna o jakosti magnetskog polja, o njegovoj frekvenciji i o temperaturi. Na temperaturama višim od Curieove temperature, ferimagnetska tvar postaje paramagnetska, a mag-

netska susceptibilnost linearno opada s porastom temperature po Curie-Weissovom zakonu (v. sl. 2).

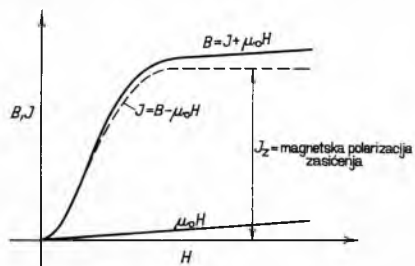
Ferimagnetske tvari imaju $10^6 \dots 10^{15}$ puta veći specifični električki otpor i 3...10 puta manju magnetsku polarizaciju zasićenja od feromagnetskih tvari.

Ferimagnetske tvari su, među ostalim, većina ferita. Kubni feriti imaju opću formulu $MO \cdot Fe_2O_3$ (M je dvovalentni ion metala: željeza, mangana, cinka, nikla, kobalta, bakra, kadmija ili magnezija). Kristalna struktura kubnih ferita jednaka je kristalnoj strukturi minerala spinela. Feriti s heksagonalnom strukturom minerala magnetoplumbita imaju opću formulu $MO \cdot 6Fe_2O_3$ (M je dvovalentni ion barija, stroncija ili olova). Ferimagnetske su tvari i tzv. granati, spojevi oksida trovalentnog željeza s oksidima elemenata rijetkih zemalja. Oni imaju opću formulu $5Fe_2O_3 \cdot 3M_2O_3$ (M je itrij, gadolinij i dr.) i strukturu sličnu kristalnoj strukturi minerala granata.

Antiferomagnetizam i antiferomagnetske tvari. Svojstva antiferomagnetskih tvari mogu se objasniti pomoću istog modela magnetskih podrešetki A i B kao i svojstva ferimagnetskih tvari, s tom razlikom da se njihovi magnetski momenti poništavaju. To strogo vrijedi samo na temperaturi apsolutne nule. Na povišenim temperaturama narušava se paralelnost magnetskih momenata u podrešetkama, te i u antiferomagnetskoj tvari pod djelovanjem magnetskog polja nastaje u smjeru polja rezultantni magnetski moment različit od nule. Magnetska susceptibilnost antiferomagnetskih tvari je, dakle, pozitivna, reda je veličine 10^{-2} i temperaturno je ovisna (v. sl. 2). Antiferomagnetske tvari su oksidi mangana (MnO), željeza (FeO), nikla (NiO) i kobalta (CoO), neki metali (mangan, krom), neke rijetke zemlje (npr. samarij), i dr.

Karakteristična svojstva magnetskih materijala

Krivulja magnetiziranja i petlja histereze. Nelinearna ovisnost između magnetske polarizacije, odnosno u elektrotehnici češće upotrebljavane magnetske indukcije, i postepeno rastućeg



Sl. 5. Krivulja prvog magnetiziranja. J Magnetska polarizacija, B magnetska indukcija, H jakost magnetskog polja

magnetskog polja u prethodno potpuno razmagnetiziranom materijalu, prikazana grafički, zove se *krivulja prvog magnetiziranja* (sl. 5).

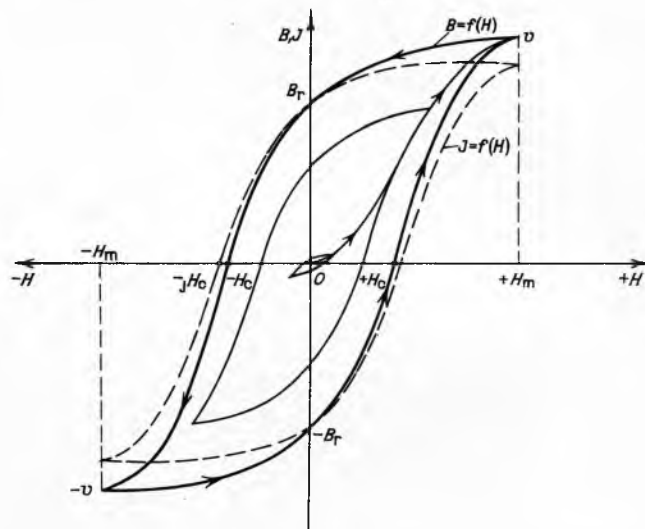
Magnetska indukcija u materijalu nije jednoznačno određena jakošću magnetskog polja, već ovisi i o magnetskoj prošlosti materijala. Razmagnetiziranje materijala, odnosno brisanje magnetske prošlosti, vrši se na dva načina: zagrijavanjem materijala na temperaturu višu od Curieove temperature, ili postepenim smanjivanjem dovoljno jakog izmjeničnog magnetskog polja do nule.

Kada magnetsko polje izmjenično mijenja smjer ($+H$, $-H$) i postepeno se povećava, vrhovi petlji histereza leže na tzv. tehničkoj krivulji magnetiziranja ili, skraćeno, *krivulji magnetiziranja* (sl. 6, $O-v$).

Ako se nakon magnetiziranja poljem $+H_m$ to polje postepeno smanjuje na nulu, magnetska indukcija se neće smanjivati po krivulji $v-O$, već po krivulji $v-B_r$. Materijal je ostao magnetiziran. Zaostali magnetizam (prikazan točkom B_r) zove se *remanencija*. Ako se sada narine u suprotnom smjeru magnetsko polje jakosti H_c , tzv. *koercitivno polje*, magnetska indukcija će se smanjiti na nulu. Daljim povećavanjem negativnog magnetskog polja magnetska indukcija u materijalu se povećava u suprotnom smjeru do točke $-v$. Ako se zatim magnetsko polje smanjuje do

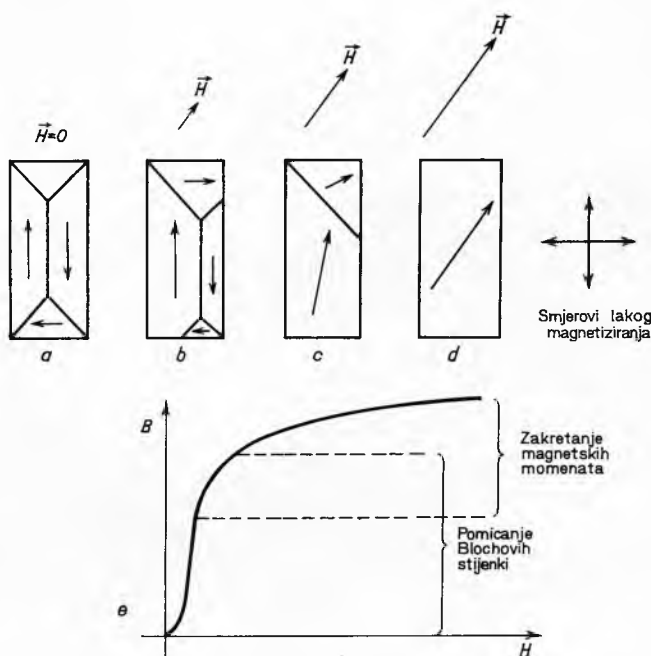
nule i ponovo povećava do $+H_m$, zatvara se *petlja histereze*. Površina petlje histereze proporcionalna je energiji utrošenoj za jedan ciklus magnetiziranja.

Krivulja magnetiziranja i petlja histereze određene su mehanizmima magnetiziranja, koji će biti ukratko opisani.



Sl. 6. Petlja histereze. H Jakost magnetskog polja, J magnetska polarizacija, B magnetska indukcija, H_c koercitivno polje, B_r remanencija

Tijelo od feromagnetskog ili ferimagnetskog materijala sastavljeno je od međusobno sraslih kristalita. U svakom kristalitu postoji jedno ili više ograničenih područja (domena) koja su spontano magnetizirana do zasićenja u smjerovima lakog magnetiziranja (vidi malo dalje odlomak Anizotropija magnetskih svojstava i sl. 12). Domene su jedna od druge razdvojene *Blochovim stijenkama* u kojima magnetski momenti postepeno mijenjaju orijentaciju iz smjera spontanog magnetiziranja jedne domene u smjer susjedne domene. Kada se tijelo, prethodno razmagnetizirano, magnetizira vrlo slabim magnetskim poljem (početni položeni dio krivulje magnetiziranja, v. sl. 7 e), Blochove stijenke se pomiču tako da se povećava volumen onih domena u kojima je smjer orijentacije jednak ili blizak smjeru polja (sl. 7 b). Ako se zatim polje smanji na nulu, Blochove stijenke se vraćaju u prvobitni položaj.



Sl. 7. Proces magnetiziranja. a Nemagnetizirano stanje, b pomicanje Blochovih stijenki, c pomicanje Blochovih stijenki i zakretanje magnetskih momenata, d zakretanje magnetskih momenata do zasićenja

Proces je, dakle, *reverzibilan* (povratan). Kad su magnetska polja veća (strmi dio krivulje magnetiziranja, v. sl. 7 e) Blochove stijenke ne kreću se više kontinuirano jer nailaze na nesavršenosti kristalne rešetke (šupljine, međuatomne uključke nečistoća i primjesa, izlučine faza različitih od osnovne, dislokacije itd., v. *Čvrsto stanje*), nego skokovito (Barkhausenov efekt) zbog uzajamnog djelovanja između nesavršenosti kristalne rešetke i Blochovih stijenki. Nesavršenosti kristalne rešetke stvaraju smetnje kontinuiranom kretanju Blochovih stijenki u vidu protusila. Kad sila na Blochovu stijenku, uzrokovana dovoljno jakim magnetskim poljem, savlada protusilu određene nesavršenosti kristalne rešetke, Blochova stijenka naglo prelazi područje kristala s manjim protusilama i zaustavlja se na novoj prepreci, na mjestu gdje su sile koje djeluju na Blochovu stijenku u ravnoteži. Ako se magnetsko polje potom smanji, Blochova stijenka se više ne vraća u početni položaj, nego u najbliži položaj u kojem je suma sila na Blochovu stijenku jednaka nuli (gdje su sile u ravnoteži). Proces je, dakle, *ireverzibilan* (nepovratan), te nakon smanjenja narinutog magnetskog polja na nulu tijelo ostaje magnetizirano (v. npr. srednju petlju histereze na sl. 6). Zbog velikog broja Blochovih stijenki te različitih i nepravilno raspoređenih nesavršenosti u kristalima, skokovi Blochovih stijenki događaju se statistički nepravilno te se — makroskopski gledano — skokovit porast magnetske indukcije u krivulji magnetiziranja ne primjećuje.

Ovi skokovi (nagle, ali mikroskopski male promjene magnetske indukcije) mogu se, međutim, čuti kao šum u slušalicama koje su preko pojačala s vrlo velikim pojačanjem priključene na zavojnicu omotanu oko štapa od feromagnetskog materijala kojem se primiče permanentni magnet. Ovaj efekt nazvan je po H. Barkhausenu, koji ga je prvi otkrio.

Na osnovi prikazanog modela može se zaključiti da je proces magnetiziranja reverzibilan dok je magnetsko polje toliko malo da Blochove stijenke ne prelaze ni jednu energetska barijeru proizvedenu nesavršenostima kristalne rešetke. Čim je magnetsko polje dovoljno jako da neke Blochove stijenke prijedu jednu ili više energetskih barijera, proces postaje ireverzibilan, jer se Blochove stijenke prilikom smanjenja magnetskog polja zaustavljaju u najbližjoj energetskoj udolini.

Kad su magnetska polja vrlo jaka (gornji položeni dio krivulje magnetiziranja, do zasićenja, v. sl. 7 e), zakretanje magnetskih momenata (kao reverzibilna pojava) postaje energetski povoljniji od pomicanja preostalih Blochovih stijenki, koje su zakočene snažnim protusilama. Kod zasićenja su svi magnetski momenti zakrenuti u smjer magnetskog polja i cijelo tijelo postaje jedna domena (Blochove stijenke nestaju). Kad se magnetsko polje ukloni, magnetski momenti se vraćaju u smjerove lakog magnetiziranja, ali tijelo i nadalje ostaje magnetizirano (s remanencijom B_r).

U osnovi postoje, dakle, dva mehanizma magnetiziranja: pomicanje Blochovih stijenki i zakretanje magnetskih momenata. Koji od ova dva mehanizma ima više udjela u procesu magnetiziranja ovisi o mnogo faktora: broju osi lakog magnetiziranja kristalita, smjeru magnetskog polja u odnosu na osi lakog magnetiziranja, mehaničkoj i magnetskoj prošlosti kristalita, pokretljivosti Blochovih stijenki, te obliku i veličini kristalita i tijela.

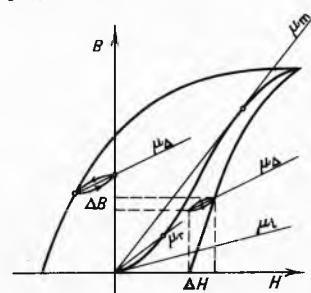
Glavni uzrok magnetske histereze je ireverzibilno pomicanje Blochovih stijenki zbog nesavršenosti kristala. Mehanizmi magnetiziranja po petlji histereze ne razlikuju se od mehanizama opisanih kod krivulje magnetiziranja.

Gubici magnetiziranja. Energija utrošena u jedinici vremena za periodičko magnetiziranje materijala izmjeničnim magnetskim poljem predstavlja *gubitke magnetiziranja*. Oni se mogu rastaviti na *gubitke histereze* i *gubitke vrtložnih struja*. Gubici histereze ovise samo o magnetskim svojstvima materijala (što je petlja histereze uža, manji su gubici histereze), gubici vrtložnih struja, pak, ovise o specifičnom električnom otporu materijala i o obliku presjeka magnetskog kruga, te se mogu smanjiti ako se magnetski krug sastoji od tankih limova koji su jedni od drugih izolirani. Svaka promjena magnetskog toka inducira električno polje koje u električki vodljivom materijalu uzrokuje kruženje električne struje (vrtložne struje) okomito na smjer magnetskog toka. Gubici vrtložnih struja ($i_z^2 \cdot R$) proporcionalni su kvadratu debljine lima, kvadratu frekvencije izmjeničnog magnetskog polja i kvadratu magnetske indukcije, a obrnuto proporcionalni specifičnom električnom otporu.

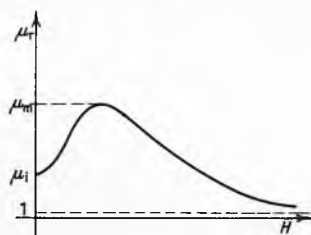
Magnetska permeabilnost. Omjer između magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja naziva se magnetska permeabilnost (sl. 8 i sl. 9):

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Relativna magnetska permeabilnost ($\mu_r = \mu/\mu_0$) izravno pokazuje koliko puta je gustoća magnetskog toka u materijalu veća od gustoće magnetskog toka u praznom prostoru uz isto magnetsko polje.



Sl. 8. Magnetske permeabilnosti: μ_i početna permeabilnost, μ_m maksimalna permeabilnost, μ_Δ inkrementalna permeabilnost



Sl. 9. Ovisnost relativne magnetske permeabilnosti μ_r o jakosti magnetskog polja H

Početna permeabilnost je mjera za nagib krivulje magnetiziranja u potpuno razmagnetiziranom materijalu:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{B=0, H \rightarrow 0}$$

Maksimalna permeabilnost je najveća vrijednost odnosa $B/\mu_0 H$ na krivulji magnetiziranja.

Nagib male petlje koja nastaje uslijed malih izmjeničnih promjena magnetskog polja u bilo kojoj točki krivulje magnetiziranja ili petlje histereze naziva se *inkrementalna permeabilnost*:

$$\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)$$

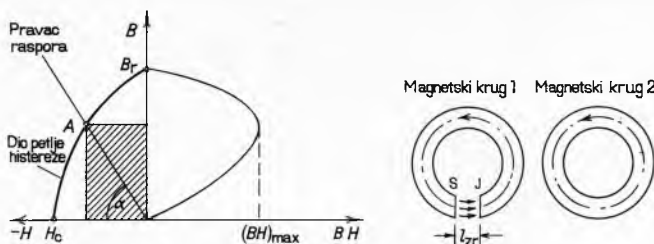
Granična vrijednost inkrementalne permeabilnosti, kad amplituda izmjeničnog magnetskog polja teži nuli, naziva se *reverzibilna permeabilnost*:

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_\Delta$$

Uspon krivulje magnetiziranja u bilo kojoj točki naziva se *diferencijalna permeabilnost*:

$$\mu_{dif} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB}{dH} \right)$$

Produkt $(B \cdot H)_{max}$. Umnožak magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja ($B \cdot H$) u nekoj točki krivulje razmagnetiziranja (dio petlje histereze u II i IV kvadrantu pravokutnog koordinatnog sistema) mjeri se za energiju po jedinici volumena koju magnetizirani magnetski materijal može predati u prostor između magnetskih polova, odnosno u raspor (sl. 10). Magnetski



Sl. 10. Radna točka A magnetskog kruga 1, koji se sastoji od permanentnog magneta i raspora duljine l_{zr}

materijali namijenjeni izradi permanentnih magneta (trajnih magneta) to su kvalitetniji što im je veći produkt $(B \cdot H)_{max}$, jer je kod većeg produkta $(B \cdot H)_{max}$, za zadan korisni volumen raspora (V_{zr}) i zadanu magnetsku indukciju u njemu (B_{zr}), potreban manji volumen magneta (V_m):

$$V_m = k \frac{V_{zr} B_{zr}^2}{\mu_0 (B \cdot H)_{max}}$$

gdje je k korekcijski faktor zbog rasipanja magnetskog toka izvan korisnog volumena raspora. Međutim, radi optimalnog iskorištenja kvalitetnog materijala za permanentne magnete, potrebno je osim toga odabrati dimenzije magneta i raspora tako da tzv. *pravac*

raspora siječe krivulju razmagnetiziranja permanentnog magneta u točki u kojoj je produkt $(B \cdot H)$ maksimalan (točka A na sl. 10). Nagib pravca raspora određen je odnosima dužine i presjeka magneta (l_m , A_m) te dužine i presjeka raspora (l_{xr} , A_{xr}):

$$\tan \alpha = - \frac{\mu_0 A_{xr} l_m}{A_m l_{xr}}.$$

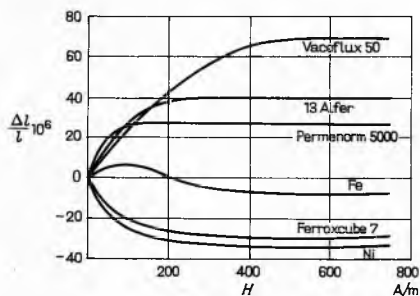
Za korištenje permanentnih magneta nužno je, dakle, da magnetski krug ima raspor (magnetski krug 1 na sl. 10). Što je raspor kraći, nagib pravca je strmiji, odn. indukcija u magnetskom krugu veća. Kad magnetski krug nema raspora (magnetski krug 2 na sl. 10), magnetska indukcija je najveća i jednaka remanenciji, ali takav se krug ne može korisno upotrijebiti, jer je produkt $(B \cdot H)$ jednak nuli.

Magnetostrikcija. Relativna elastična promjena dimenzija magnetskog materijala uslijed djelovanja magnetskog polja naziva se *magnetostrikcija*. Magnetostrikcija može biti dužinska ($\Delta l/l$) ili volumna ($\Delta V/V$). Kako su promjene volumena tijela u magnetskom polju znatno manje od promjena dužine u smjeru narinutog magnetskog polja, obično se pod nazivom magnetostrikcija, u stvari, razumijeva dužinska magnetostrikcija. Magnetostrikcija može biti pozitivna ili negativna, tj. tijelo od magnetskog materijala može se u smjeru narinutog magnetskog polja izdužiti ili skratiti. Predznak magnetostrikcije ovisi i o jakosti magnetskog polja. Tako je ona, npr., kod željeza pozitivna kad je polje malo, a negativna kad je veće (sl. 11). U vrlo jakim poljima magnetostrikcija postiže konačan iznos, koji se daljim povećanjem magnetskog polja ne povećava.

Anizotropija magnetskih svojstava. Magnetiziranje kristala ovisi o smjeru u kojem djeluje magnetsko polje. Na sl. 12 su prikazane krivulje magnetiziranja za monokristale Fe, Ni i Co u ovisnosti o smjeru magnetskog polja. *Smjerovi lakog magnetiziranja* su kod željeza bridovi [001], kod nikla prostorne dijagonale [111], a kod kobalta aksijalna os [0001]. Domene su uvijek spontano magnetizirane u smjerovima lakog magnetiziranja. Za zakretanje vektora magnetske polarizacije iz smjera lakog magnetiziranja u neki drugi smjer potrebno je utrošiti određenu energiju, tzv. *energiju kristalne anizotropije*. Energija kristalne anizotropije po jedinici volumena za kubne kristale iznosi:

$$E_K = K_1 (a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2) + K_2 a_1^2 a_2^2 a_3^2,$$

gdje su a_i kosinusi kutova između vektora magnetske polarizacije i smjerova bridova kocke, odnosno smjerova prostornog pravokutnog koordinatnog sistema. Konstante K_1 i K_2 su *konstante kristalne anizotropije*.

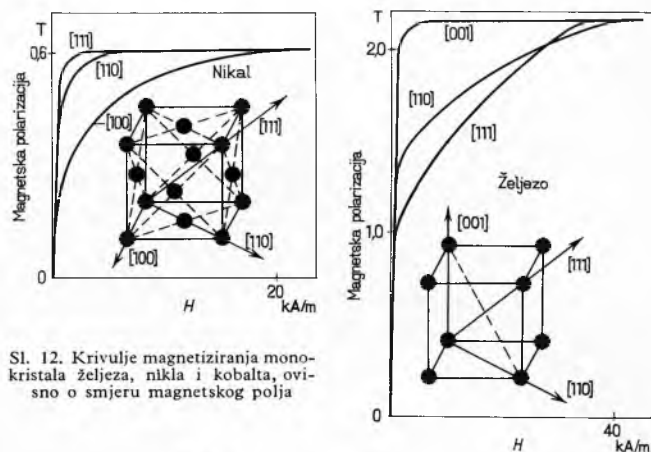


Sl. 11. Relativna promjena dimenzija (magnetostrikcija) nekih metala i legura u magnetskom polju

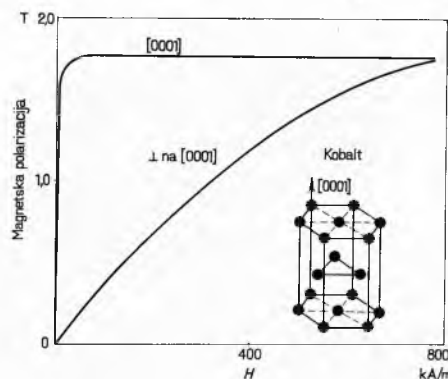
Ako je magnetski materijal izložen mehaničkom naprezanju, a magnetostrikcija je različita od nule, materijal se magnetizira lakše ili teže nego bez naprezanja, što ovisi o predznaku magnetostrikcije i smjeru djelovanja sile. Npr., ako na nikal, koji se u smjeru magnetskog polja skraćuje, djeluje u tom istom smjeru sila istezanja, njegova magnetska permeabilnost će se znatno smanjiti.

To znači da mehanička naprezanja utječu na orijentaciju vektora magnetske polarizacije. Kod nikla, koji ima negativnu magnetostrikciju, istezanje orijentira vektore magnetske polarizacije okomito na smjer djelovanja sile.

Oprečno tome, kad magnetski materijal ima pozitivnu magnetostrikciju, istezanje olakšava njegovo magnetiziranje u smjeru



Sl. 12. Krivulje magnetiziranja monokristala željeza, nikla i kobalta, ovisno o smjeru magnetskog polja



djelovanja sile. Pod djelovanjem mehaničkih naprezanja materijal postaje, dakle, magnetski anizotropan.

Na sl. 10 prikazan je magnetski krug s rasporom. Što je duljina raspora relativno veća prema duljini magnetskog materijala, to je pravac raspora položeniji i indukcija u magnetskom materijalu niža. Povećanje raspora, prema tome, ima isto djelovanje kao povećanje magnetskog polja u smjeru suprotnom smjeru polja kojim je magnetski materijal bio magnetiziran. Raspor, dakle, demagnetizira magnetski materijal. Veličina demagnetiziranja opisuje se obično *faktorom demagnetizacije*.

Kod prstenastih magnetskih krugova sa $l_{xr} \ll l_m$ faktor demagnetizacije je približno jednak inverznoj vrijednosti tangensa kuta α .

Slična pojava zapaža se i kod izduženih tijela od magnetskog materijala. Faktor demagnetizacije izduženih tijela manji je u smjeru veće dimenzije tijela nego u smjeru manje dimenzije. Ova pojava naziva se *magnetska anizotropija oblika*.

Podjela, vrste i primjena magnetskih materijala

Feromagnetski i ferimagnetski materijali se dijele na magnetski meke i magnetski tvrde. *Magnetski meki materijali* odlikuju se visokom permeabilnošću, uskom petljom histereze i malim koercitivnim poljem. *Magnetski tvrdi materijali* imaju vrlo široku petlju histereze sa velikim koercitivnim poljem i visokim produktom $(B \cdot H)_{max}$, teško se magnetiziraju ali i razmagnetiziraju, te se upotrebljavaju za izradu permanentnih magneta.

Magnetski meki materijali

Magnetski limovi od željeza legiranog sa silicijem. Dijelovi magnetskih krugova u izmjeničnim magnetskim poljima sastoje se od magnetskih limova koji su jedni od drugih izolirani da se smanje gubici izazvani vrtložnim strujama. Limovi valjani od legure željeza sa silicijem najbolje udovoljavaju zahtjevima elektroindustrije, jer uz nisku cijenu imaju i vrlo dobra magnetska svojstva. Kvalitet magnetskog lima određen je gubicima magnetiziranja kod određene vršne vrijednosti magnetske indukcije (obično kod 1,0 T ili 1,5 T) sinusnog valnog oblika i određene frekvencije (obično 50 Hz), te krivuljom magnetiziranja.

Što je veći postotak silicija to je veća početna permeabilnost, manje koercitivno polje, manji gubici histereze, veći specifični

električni otpor (sl. 13), ali manja magnetska polarizacija zasićenja (sl. 14) i teža mehanička obrada. Osim sastava, na magnetska i mehanička svojstva magnetskih limova utječe proces valjanja i termičke obrade.

Toplo valjani magnetski limovi proizvode se od željeza legiranog sa silicijem (do 4,5%) toplim valjanjem i završnim žarenjem u pećima sa zaštitnom atmosferom. Debljina limova obično iznosi 0,35 mm, 0,5 mm ili 1 mm. Površina limova je dosta hrapava, tako da je iskorištenje presjeka magnetskog kruga loše (faktor punjenja od 92% do 95%). Prema standardu JUS C. K5.020 toplo valjani magnetski limovi se označuju oznakama MD (dynamo-limovi) i MT (transformatorski limovi) i brojem koji podijeljen sa 100 daje maksimalne još dozvoljene gubitke magnetiziranja za određeni kvalitet kod 1,0 T i 50 Hz. Sve se manje upotrebljavaju jer ih istiskuju znatno bolji hladno valjani magnetski limovi.

Hladno valjani orijentirani magnetski limovi (MLO) proizvode se od željeza (sa vrlo malim postotkom primjesa) legiranog sa ~3% silicija, toplim valjanjem do debljine ~2,5 mm i specijalnim postupkom hladnog valjanja i žarenja, kojim se postiže orijentacija kristalitâ, tzv. Gossova tekstura, kod koje su bridovi kristala [001] usmjereni u smjeru valjanja lima, a dijagonala [110] okomito na površinu lima. Magnetska i mehanička svojstva orijentiranih magnetskih limova su anizotropna: u smjeru valjanja približavaju se svojstvima monokristala u smjeru osi [001], a u ostalim smjerovima svojstva su znatno lošija. Debljina im je obično 0,27 mm, 0,30 mm ili 0,35 mm, a površina glatka i prekrivena vrlo tankim slojem ($2 \cdots 5 \mu\text{m}$) fosfatne izolacije (faktor punjenja je veći od 96%). Gubici magnetiziranja u smjeru valjanja lima kod 1,5 T i 50 Hz iznose od 0,89 do 1,22 W/kg. Hladno valjani orijentirani magnetski limovi uglavnom se upotrebljavaju za gradnju magnetskih krugova transformatora snage, mjernih transformatora, velikih električnih generatora i magnetskih pojačala.

Hladno valjani neorijentirani magnetski limovi (MLN) proizvode se od željeza (sa vrlo malim postotkom primjesa) legiranog sa silicijem do 2,5%, toplim i zatim hladnim valjanjem na konačnu debljinu 0,50 mm, 0,65 mm ili 0,75 mm. Proces valjanja i međuzarenja je takav da su magnetska i mehanička svojstva ovih li-

movâ skoro izotropna (jednaka u svim smjerovima). Faktor punjenja dostiže vrijednost 99%. Gubici magnetiziranja kod 1,5 T i 50 Hz iznose od 2,0 do 8,6 W/kg, približno kao i kod toplo valjanih magnetskih limova, ali kako hladno valjani neorijentirani magnetski limovi sadrže manji postotak silicija, oni imaju veću magnetsku polarizaciju zasićenja (vidi sl. 14). Upotrebljavaju se za gradnju električnih motora, generatora, sklopnika, pri-
gušnica i dr.

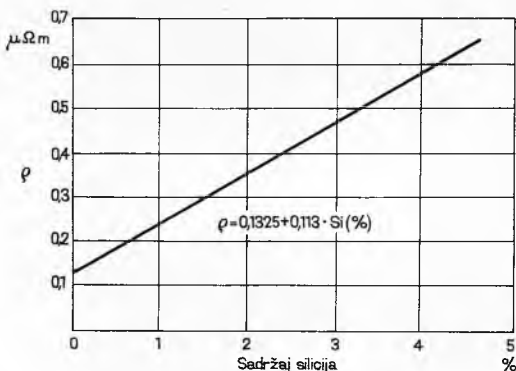
Većina proizvođača označuje orijentirane magnetske limove kraticama M4, M5, M6 i M7, a neorijentirane magnetske limove označuju mnoštvom različitih kratica (BD, NO, H, DK, CK itd.) i brojem koji karakterizira kvalitet.

Magnetski limovi od legura željeza sa silicijem čine oko 95% cjelokupne proizvodnje magnetskih materijala.

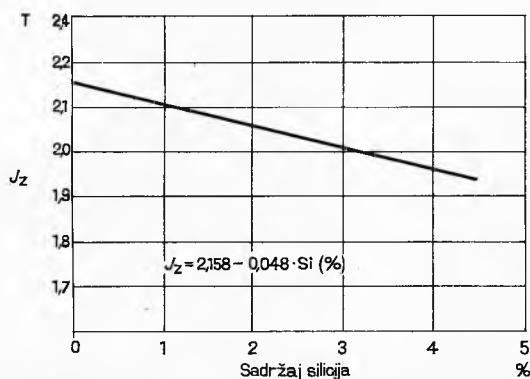
Magnetski limovi od legura nikal-željezo. Razvojem elektronike, telekomunikacija, automatizacije i mjerne tehnike ukazala se potreba za novim materijalima koji bi se odlikovali visokom početnom i maksimalnom permeabilnošću, malim gubicima magnetiziranja i malim koercitivnim poljem. Niz legura iz grupe nikal-željezo udovoljava upravo tim zahtjevima (sl. 15).

Legure sa 36 do 40% nikla (komercijalni nazivi: Permenorm 3601, Hyperm 36, Permalloy D, Radiometal 36 i dr.) odlikuju se relativno visokim specifičnim električnim otporom (malim vrtložnim strujama i visokom graničnom frekvencijom permeabilnosti) i približno konstantnom permeabilnošću u slabim magnetskim poljima (sl. 16). Magnetski limovi napravljeni od ovih legura (debljine od 0,003 do 0,35 mm) pretežno se upotrebljavaju za magnetske krugove transformatora s minimalnim izobličenjem prenesenog signala.

Legure sa ~50% nikla (komercijalni nazivi: Permenorm 5000Z, Hyperm 50, Permalloy F i dr.) imaju u grupi Ni-Fe legura najvišu magnetsku polarizaciju zasićenja (vidi sl. 15) uz vrlo malo koercitivno polje ($5 \cdots 15 \text{ A/m}$). Izotropni magnetski limovi se upotrebljavaju za mjerne transformatore, tonfrekventne izlaze transformatore, sisteme mjernih instrumenata i magnetske zaslone. Anizotropni magnetski limovi sa tzv. »dvostrukom orijentacijom« odlikuju se pravokutnom petljom histereze ($J_1/J_2 > 0,92$), te se upotrebljavaju za magnetska pojačala.



Sl. 13. Ovisnost električnog specifičnog otpora (kod 20°C) legura željezo-silicij o količini silicija

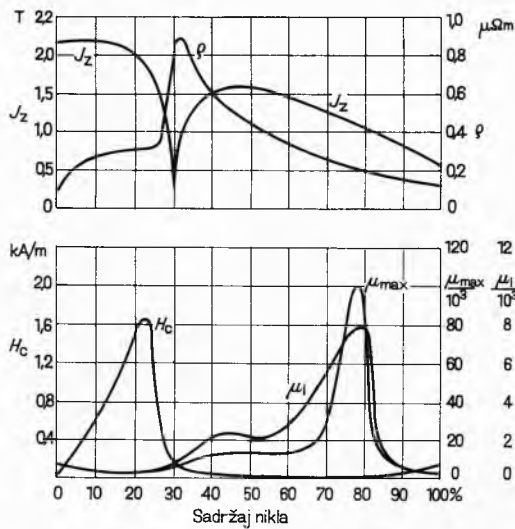


Sl. 14. Ovisnost magnetske polarizacije zasićenja J_z legura željezo-silicij o količini silicija

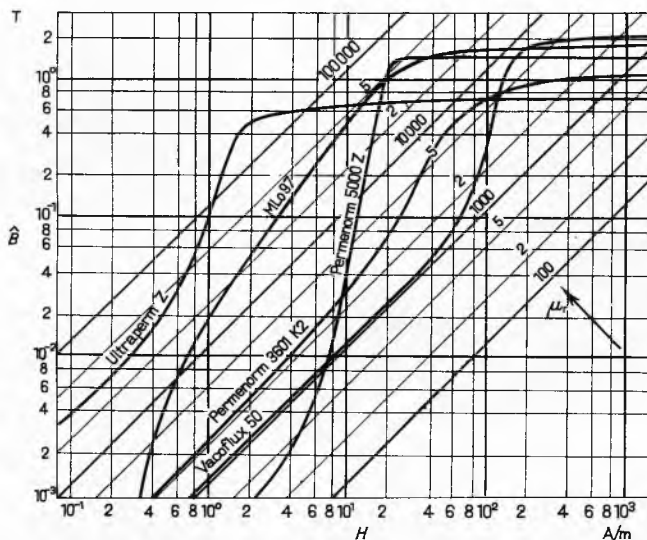
Tablica 1
MAKSIMALNI GUBICI MAGNETIZIRANJA I MINIMALNA MAGNETSKA
INDUKCIJA HLADNO VALJANIH MAGNETSKIH LIMOVA OD LEGURA
ŽELJEZO-SILICIJ

Vrsta	Nazivna debljina mm	Maksimalni gubici magnetiziranja kod 50 Hz W/kg		Minimalna magnetska indukcija T					
		kod 1,0 T	kod 1,5 T	kod 0,5 kA/m	kod 1,0 kA/m	kod 2,5 kA/m	kod 5,0 kA/m	kod 10 kA/m	kod 30 kA/m
MLO 89	0,28	0,42	0,89	1,73	1,79	1,85	1,90	—	—
MLO 97	0,30	0,45	0,97	1,72	1,78	1,85	1,90	—	—
MLO 111	0,35	0,51	1,11	1,71	1,77	1,85	1,90	—	—
MLO 122	0,35	0,56	1,22	1,70	1,76	1,84	1,90	—	—
MLN 330	0,50	1,45	3,30	—	—	1,49	1,58	1,70	1,93
MLN 400	0,50	1,70	4,00	—	—	1,49	1,58	1,70	1,93
MLN 470	0,50	2,00	4,70	—	—	1,51	1,60	1,72	1,95
MLN 540	0,50	2,30	5,40	—	—	1,53	1,63	1,74	1,97
MLN 600	0,50	2,60	6,00	—	—	1,54	1,64	1,76	1,99
MLN 680	0,50	3,00	6,80	—	—	1,55	1,65	1,77	2,00
MLN 810	0,50	3,60	8,10	—	—	1,56	1,66	1,78	2,01

Plohe elementarnih kristala su u dvostruko orijentiranim limovima paralelne s površinom lima tako da je jedan brid usmjeren u smjeru, a drugi okomito na smjer valjanja lima. Magnetska svojstva su izrazito dobra u smjeru valjanja lima i okomito na nj, a u ostalim su smjerovima znatno lošija.



Sl. 15. Ovisnost električnog specifičnog otpora ρ , magnetske polarizacije zasićenja J_z (gornja slika) i koercitivnog polja H_c , početne permeabilnosti μ_i i maksimalne permeabilnosti $\mu_{\max}$ (donja slika) o količini nikla u legurama željezo-nikal



Sl. 16. Ovisnost vršne vrijednosti magnetske indukcije sinusnog valnog oblika B o efektivnoj vrijednosti magnetskog polja H (tzv. krivulje izmjeničnog magnetiziranja) kod frekvencije 50 Hz magnetskih limova debljine 0,3 mm iz nekih magnetskih mekih materijala

Legure sa 70 do 80% nikla (komercijalni nazivi: Ultraperm Z, 78-Permalloy, Mumetall, Supermalloy i dr.) imaju ekstremno visoku početnu, a naročito ekstremno visoku maksimalnu permeabilnost, ali im je specifični električni otpor mali. Dodavanjem molibdena, kroma, kobalta i bakra povećava se specifični električni otpor i permeabilnost, a također se olakšava tehnologija izrade, odnosno, smanjuje se vrlo jaka ovisnost magnetskih svojstava o brzini hlađenja nakon završnog žarenja, koja kod čistih legura željezo-nikal dostiže i 25°C/s za optimalne vrijednosti početne permeabilnosti.

Najpoznatija takva legura je Mumetall (75% nikla, 18% željeza, 5% bakra i 2% kroma) sa početnom permeabilnošću do 20 000, maksimalnom permeabilnošću do 100 000, koercitivnim poljem $\sim 1,2$ A/m, magnetskom polarizacijom zasićenja od 0,9 T i specifičnim električnim otporom $\sim 0,55 \mu\Omega\text{m}$.

Najveću početnu permeabilnost (od 50 000 do 150 000) i najveću maksimalnu permeabilnost (od 600 000 do 1 200 000) te najmanje koercitivno polje (od 0,2 do 0,7 A/m) ima Supermalloy (79% nikla, 15% željeza, 5% molibdena i 0,5% mangana).

Magnetski limovi od ovih legura upotrebljavaju se za impulsne i specijalne transformatore, prigušnice, magnetofonske glave, releje, magnetske zaslone, mjerne transformatore, sisteme mjernih instrumenata, memorije i magnetske preklopke u elektroničkim računalima.

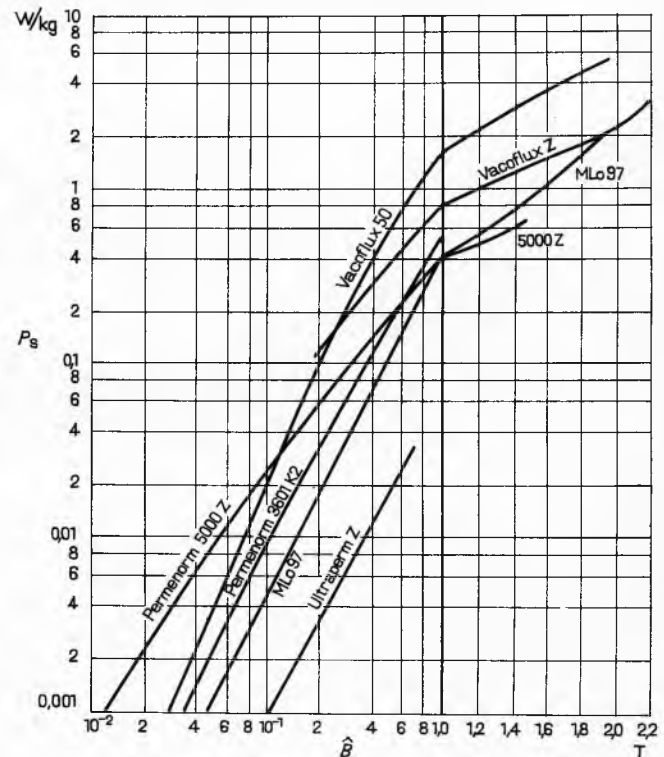
Magnetski meki feriti. U visokofrekvencijskoj elektrotehnici uglavnom se upotrebljavaju tzv. *miješani feriti*. To su spojevi oksida željeza Fe_2O_3 sa dva ili više oksida različitih divovalentnih metala. Proizvode se metodama tzv. metalne keramike ili metalurgije prahova: nakon miješanja i mrvljenja metalni oksidi se peku na temperaturi $\sim 1000^\circ\text{C}$, zatim se melju u fini prah, prešaju u konačan oblik i ponovo peku na $1000\cdots 1400^\circ\text{C}$. Feriti su tvrdi i kruti, te se dalje obrađuju brušenjem. Odlikuju se vrlo visokim produktom μQ (gdje je μ permeabilnost, Q faktor kvaliteta titrajnog kruga, jednak odnosu $\omega L/R$, R je efektivni serijski nadomjesni otpor gubitaka u jezgri, L induktivnost). Iako su gubici vrtložnih struja u feritima zanemarljivo mali zbog vrlo visokog specifičnog električnog otpora ($10^{-1}\cdots 10^8 \Omega\text{m}$), permeabilnost im se ipak na vrlo visokim frekvencijama smanjuje zbog rezonantnih pojava kod kojih dolazi do apsorpiranja energije, tj. povećanja gubitaka magnetiziranja (sl. 18).

Miješanjem različitih oksida, mijenjanjem odnosa pojedinih komponenata, dodavanjem različitih primjesa i variranjem tehnologije proizvodnje (veličine čestica, temperature i trajanja žarenja, žarenja u zaštitnoj atmosferi, vakuumu ili na zraku) moguće je utjecati na početnu permeabilnost, maksimalnu permeabilnost, magnetsku polarizaciju zasićenja i njihovu temperaturnu ovisnost (sl. 19).

Feriti su u današnje vrijeme skoro potpuno istisnuli iz praktične upotrebe tzv. *praškaste materijale* zbog znatno boljih magnetskih svojstava. Produkt μQ je kod ferita do 100 puta veći nego kod praškastih materijala.

Praškasti materijali su mješavina veziva i finih čestica feromagnetskog materijala izoliranih jedne od drugih specijalnim lakom, koja se preša pod pritiskom do $2 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ ($\approx 20 \text{ MP/cm}^2$) u konačan oblik i zatim grije na temperaturi između 100 i 150°C dok se vezivo stvrdne.

Mangan-cink-feriti (komercijalni nazivi: Ferroxcube 3, Hyperox C i dr.) imaju visoku početnu permeabilnost ($6000\cdots 1000$) i dosta visoku magnetsku polarizaciju zasićenja (do 0,5 T na 20°C). Upotrebljavaju se kod relativno nižih frekvencija ($10 \text{ kHz}\cdots 2 \text{ MHz}$) za jezgre izlaznih linijskih transformatora u televizorima,



Sl. 17. Specifični gubici magnetiziranja P_s magnetskih limova debljine 0,30 mm iz nekih magnetski mekih materijala kao funkcija vršne vrijednosti magnetske indukcije sinusnog valnog oblika B kod frekvencije 50 Hz

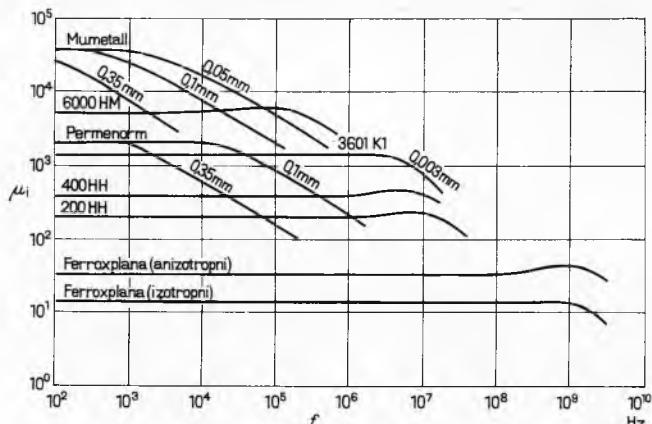
jezgre svitaka titrajnih i filterskih krugova te međufrekvencijskih i impulsnih transformatora, za magnetofonske glave i dr.

Nikal-cink-feriti (komercijalni nazivi: Ferroxcube 4, Hyperox E i dr.) imaju relativno visoku početnu permeabilnost (2000...20) kod visokih frekvencija (100 kHz...100 MHz) i malu polarizaciju zasićenja ($\sim 0,2$ T). Iz nikal-cink-ferita se izrađuju antenski štapovi, lončaste jezgre, jezgre za svitke titrajnih i filterskih krugova i dr.

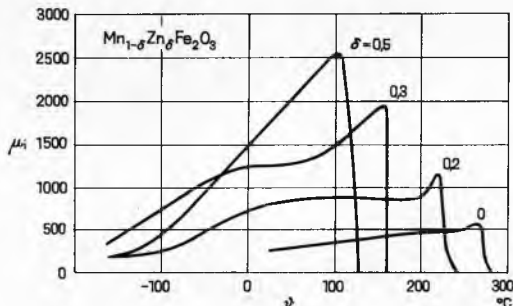
Feriti sa heksagonalnom kristalnom strukturom (npr.: Ferroxpilana: $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$) upotrebljavaju se kod ekstremno visokih frekvencija (> 100 MHz). Početna permeabilnost im je mala: $10\cdots 60$.

Magnezij-mangan-feriti (komercijalni nazivi: Ferroxcube 6, R1 do R6, TT1-390 i dr.) odlikuju se pravokutnom petljom histerize, te se upotrebljavaju za memorije i magnetske preklopke u elektroničkim računalima, za magnetska pojačala i dr.

Kobalt-feriti imaju izraženu magnetostrikciju (relativno skraćanje iznosi $\sim 200 \cdot 10^{-6}$). Upotrebljavaju se u magnetostrikcijskim oscilatorima i filtrima.



Sl. 18. Ovisnost početne relativne permeabilnosti μ_i o frekvenciji f magnetskih limova iz legura nikal-željezo i nekih ferita. Materijal s oznakom 6000 HM je Mn-Zn ferit, a materijal s oznakom 400 HH i 200 HH su Ni-Zn feriti



Sl. 19. Ovisnost početne relativne permeabilnosti μ_i nekih mangan-cink ferita o temperaturi θ . δ Relativni sadržaj ferita u mješavini

Ostali magnetski meki materijali. Čisto željezo ($J_s \approx 2,15$ T, $H_c = 8\cdots 120$ A/m) upotrebljava se za polne nastavke i ramove električnih rotacionih strojeva i magneta, za dijelove releja i magnetske zaslone od jakih magnetskih polja.

Legure željeza sa $\sim 49\%$ kobalta i 2% vanadija (komercijalni nazivi: Vacoflux, Hyperm Co 50, Supermendur i dr.) imaju najveću polarizaciju zasićenja (2,4 T na 20°C). Početna permeabilnost im je $300\cdots 1000$, maksimalna permeabilnost $10\,000\cdots 90\,000$, koercitivno polje $110\cdots 16$ A/m, specifični električni otpor $\sim 0,35 \mu\Omega\text{m}$ i Curieova temperatura od 950 do 980°C . Proizvode se u masivnim komadima i limovima. Upotrebljavaju se za polne nastavke, dijelove releja, telefonske membrane, magnetska pojačala, generatore i servomotore u avionima. Cijena im je vrlo visoka.

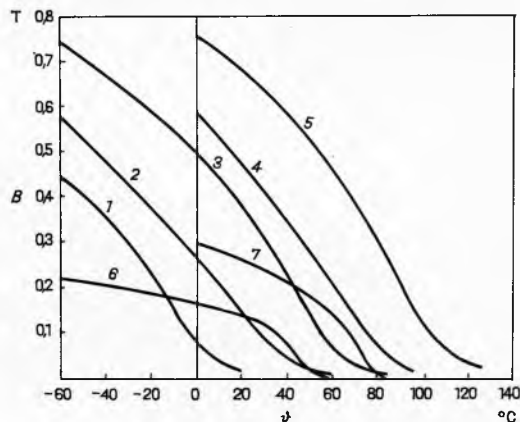
Legure željeza sa $\sim 16\%$ aluminija (komercijalni nazivi: 16-Alfenol, Vacodur 16 i dr.) odlikuju se razmjerno velikom početnom permeabilnošću ($5000\cdots 7000$), velikom maksimalnom

permeabilnošću ($\sim 120\,000$), velikim specifičnim električnim otporom ($\sim 1,5 \mu\Omega\text{m}$) i izrazito velikom tvrdoćom i otpornošću prema habanju. Od njih se izrađuju magnetofonske glave.

Granati, spojevi oksida željeza s oksidima elemenata rijetkih zemalja, primjenjuju se u mikrovalnoj tehnici i za brze memorije u elektroničkim računalima.

Materijali za magnetno-mehaničke pretvarače i rezonatore. Čisti nikal, legure sa 87% željeza i 13% aluminija (npr. 13 Alfer), legure sa 49% kobalta, 49% željeza i 2% vanadija (npr. Vacoflux 50), legure sa 50% željeza i 50% nikla (npr. Permenorm 5000), kobalt-feriti (npr. CoFe_2O_4) i nikal-bakar-feriti (npr. Ferroxcube 7) materijali su s izrazitom magnetostrikcijom (v. sl. 11). Zbog toga se primjenjuju za filterske krugove (do 500 kHz) i ultrazvučne vibratore u napravama za ispitivanje materijala ultrazvukom i u napravama za određivanje dubine, udaljenosti i položaja predmeta u moru (Sonar), u medicinskim uređajima i u uređajima za obradu krutih materijala (npr. ferita i stakla) te čišćenje metalnih i keramičkih dijelova.

Materijali za temperaturnu kompenzaciju magnetskih krugova. Kompenzacija temperaturnih promjena okoline u magnetskim krugovima brojila, releja i mjernih instrumenata vrši se materijalima koji imaju nisku Curieovu temperaturu (između 10 i 120°C). To su legure željeza sa oko 30% nikla (komercijalni nazivi: Thermoflux, Thermoperm, Mutemp i dr.) i legure nikla sa $\sim 30\%$ bakra (npr. Monel-Metall i Thermalloy), te neki mangan-cink-feriti (sl. 20).



Sl. 20. Ovisnost magnetske indukcije B o temperaturi θ ($^\circ\text{C}$) materijala za temperaturnu kompenzaciju magnetskih krugova: 1...5 legure sa oko 30% nikla i 70% željeza, 6 legura sa oko 30% nikla i 70% bakra, 7 mangan-cink ferit (Hyperox C1)

Konstruktivski materijali. Sivi lijev i meki ugljični čelici upotrebljavaju se za dijelove električnih strojeva i aparata koji su izloženi vrlo velikim mehaničkim naprezanjima, a ujedno se od njih traže i dobra feromagnetska svojstva.

U skupinu konstruktivskih materijala ubrajaju se i **nemagnetski čelici**. To su čelici i čelični lijevovi legirani sa kromom, niklom i manganom (np. Prokron 11L — legirani čelični lijev sa 18% kroma, 9% nikla, $1,5\%$ silicija i $0,15\%$ ugljika ili Prokron 20 — valjani čelik sa 34% nikla, 18% kroma, 2% silicija, $1,8\%$ mangana i $0,15\%$ ugljika) imaju odlična mehanička svojstva i postojanost prema koroziji. U njima, međutim, prevladava austenitna struktura (γ -željezo) te su im svojstva djelomično paramagnetska (permeabilnost može pasti do $1,002$). Zbog male permeabilnosti vrlo malo utječu na tok magnetskih silnica, te se upotrebljavaju za dijelove u električnim strojevima i aparatima koji treba da budu »nemagnetski«, za gradnju brodova (minolovaca), za kućišta kompasa i dr.

Magnetski tvrdi materijali

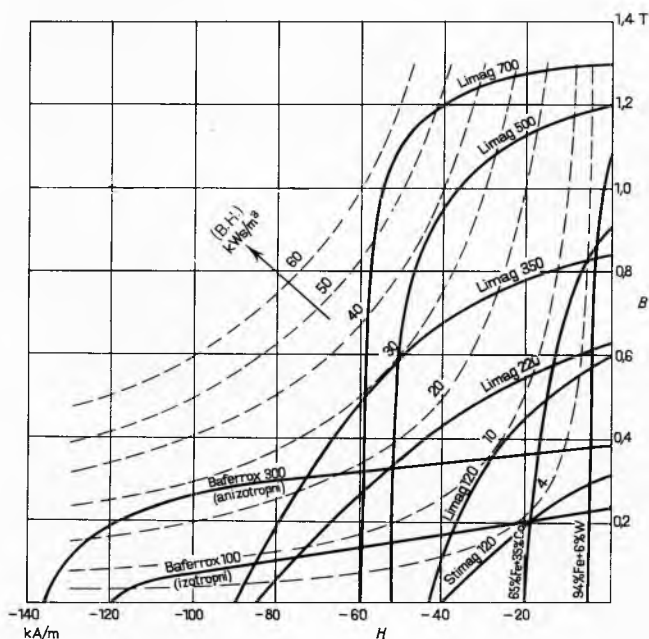
Legure Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe. Permanentni magneti od legura željeza, nikla, aluminija i kobalta odlikuju se vrlo visokim produktom $(B \cdot H)_{\text{max}}$ i odličnom temperaturnom stabilnošću. Upotrebljavaju se za zakretno sisteme u mjernim instrumentima, električne generatore i motore, zvučnike, mikrofone, polarizirane releje i dr.

Promjenom sastava trojne legure u granicama 59...61% željeza, 28...24% nikla i 13...15% aluminija mijenja se koercitivno polje od 44 kA/m do 24 kA/m i remanencija od 0,65 T do 0,73 T, a produkt $(B \cdot H)_{\max}$ za oba granična slučaja iznosi 9,6 kWs/m³. Dodatak kobalta (12...35%) povećava koercitivno polje do 50 kA/m i produkt $(B \cdot H)_{\max}$ do 15 kWs/m³.

Legure Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe najčešće se tale u visokofrekvencijskim pećima i lijevaju u pijesku. Lijevani magneti su vrlo tvrdi, grubozrnati i krti, te se zato mogu obrađivati samo brušenjem.

Manji i složeniji oblici magneta izrađuju se sinterovanjem. Legura zdrobljena u prah oblikuje se prešanjem pod visokim tlakom ($\sim 5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 \approx 5 \text{ Mp/cm}^2$) i zatim sinteruje na temperaturi između 1200 i 1300 °C u atmosferi vodika ili u vakuumu. Magnetska svojstva sinterovanih magneta praktički se ne razlikuju od svojstava lijevanih magneta istog sastava.

Za izradu magneta složenih oblika s malim odstupanjima od nazivnih dimenzija ponekad se primjenjuje ova tehnologija: legura zdrobljena u prah pomiješa se s vezivom (npr. bakelitom ili gumom) i preša u konačan oblik na temperaturi između 100 i 180 °C pod tlakom od $5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Pri tome se mogu uprešati i polni nastavci ili dijelovi za pričvršćenje. Magnetska svojstva prešanih magneta znatno su lošija od magnetskih svojstava lijevanih magneta, jer se remanencija smanjuje za 40...50%, koercitivno polje za 10...15%, a produkt $(B \cdot H)_{\max}$ i do 65%. Dok se lijevani i sinterovani magneti mogu upotrebljavati i na vrlo visokim temperaturama (do 500 °C, jer im je Curieova temperatura ~ 800 °C), dozvoljena maksimalna radna temperatura prešanih magneta je znatno niža, jer je određena vezivom.



Sl. 21. Krivulje razmagnetiziranja nekih magnetski tvrdih materijala

Magnetske karakteristike lijevanih i sinterovanih magneta od legura Al-Ni-Co-Fe mogu se znatnije poboljšati ako se prilikom hlađenja (sa 1200 °C) izlože djelovanju snažnog magnetskog polja ($\sim 100 \text{ kA/m}$). Magnetni proizvedeni ovakvom tehnologijom anizotropni su, s remanencijom $\sim 1,2 \text{ T}$, koercitivnim poljem $\sim 50 \text{ kA/m}$ i produktom $(B \cdot H)_{\max}$ do 45 kWs/m³.

Optimalne magnetske karakteristike lijevanih magneta od legura Al-Ni-Co-Fe postižu se određenim načinom što bržeg odvođenja topline za vrijeme hlađenja magneta, uz istovremeno djelovanje snažnog magnetskog polja. Na pojedinim u laboratoriju proizvedenim magnetima u smjeru orijentacije kristalita izmjerene su ekstremno visoke vrijednosti: remanencija do 1,45 T, koercitivno polje do 160 kA/m, produkt $(B \cdot H)_{\max}$ čak 96 kWs/m³. Što je orijentacija kristalita bolja, to su lošija svojstva u smjeru okomitom na orijentaciju (često se poboljšanjem orijentacije vri-

jednosti magnetskih karakteristika u smjeru okomitom na orijentaciju kristalita smanjuju i za jedan red veličine).

Uz normalni industrijski proces proizvodnje postižu se nešto lošija magnetska svojstva. Na sl. 21 prikazana su svojstva nekoliko karakterističnih izotropnih i anizotropnih magneta. Radi poboljšanja magnetskih svojstava, legurama Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe dodaju se još bakar, titan i niobij. Uz optimalni kemijski sastav i optimalnu tehnologiju izrade postižu se odlični rezultati. Npr. Alnico 8B ima koercitivno polje 150 kA/m, remanenciju 0,78 T i produkt $(B \cdot H)_{\max}$ 70 kWs/m³, a Alnico 9 ima koercitivno polje 124 kA/m, remanenciju 1,05 T i produkt $(B \cdot H)_{\max}$ 84 kWs/m³. Poznatijsi komercijalni nazivi legura Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe jesu: Limag, Simag i Stimag, Permanit, Koerzit, Alnico, Ticonal i Alcomax.

Feritni magneti. Permanentni magneti od barij-ferita ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) upotrebljavaju se za izradu zvučnika, malih motora, električnih satova, mikrofona, tahometara, magnetskih ležajeva, korekcijskih magneta za sliku u televizijskim prijemnicima i dr. Vrlo veliko koercitivno polje ($110 \cdot 220 \text{ kA/m}$) i mala inkrementalna permeabilnost (oko 1,1) omogućuju plosnate konstrukcije sa vrlo kratkim magnetima. Masa feritnih magneta iznosi obično $\sim 4,8 \text{ g/cm}^3$ (kod legura Al-Ni-Co-Fe ona iznosi od 7 do 8 g/cm³), Curieova temperatura je ~ 450 °C, pa im je temperaturni koeficijent remanencije na 20 °C oko deset puta veći ($-0,2\%/^\circ\text{C}$) nego temperaturni koeficijent magnetat od legura Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe.

Izotropni permanentni magneti od barij-ferita proizvode se slično kao magnetski meki feriti, a anizotropni barij-feritni magneti prešaju se uz snažno magnetsko polje (do 1000 kA/m). Time se postiže veća remanencija (v. sl. 21), a s njom i veći produkt $(B \cdot H)_{\max}$ do 30 kWs/m³. Zbog njihove niske cijene, barij-feritni magneti sve se više proizvode i upotrebljavaju (danas oni čine $\sim 25\%$ ukupne proizvodnje permanentnih magneta, a magneti od legura Al-Ni-Fe i Al-Ni-Co-Fe $\sim 70\%$). Poznatijsi komercijalni nazivi jesu: Elveperm, Baferrox, Koerox i Ferroxdure.

Osim barij-feritnih magneta proizvode se također stroncij-feritni i olovo-feritni magneti, ali za sada u manjim količinama. Magnetska se svojstva ovih magneta bitno ne razlikuju od svojstava barij-feritnih magneta.

Ostali magnetski tvrdi materijali. Za permanentne magnetne u obliku tankih limova i žica upotrebljavaju se legure sa $\sim 60\%$ bakra, 20% nikla i 20% željeza (npr. Cuniflex I i Magneto-flex 20). Magnetska svojstva u smjeru valjanja približno su jednaka svojstvima Limaga 120 (v. sl. 21). Nešto lošija mehanička svojstva (manje su meki i manje prikladni za obradu), ali znatno veću remanenciju ($\sim 0,9 \text{ T}$) i nešto veći produkt $(B \cdot H)_{\max}$ imaju legure sa $\sim 52\%$ kobalta, 35% željeza i 13% vanadija (npr. Vicalloy, Magnetoflex 35 i Koerflex). Te se legure često upotrebljavaju za rotore histereznih motora.

Magnetofonske vrpce su načinjene od polivinilklorida na koje je obično nanesen vrlo tanak sloj igličastih kristala oksida trovalentnog željeza ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) pomiješanih s vezivom. Koercitivno polje iznosi 20...40 kA/m, a remanencija $\sim 0,7 \text{ T}$. Odnedavna se umjesto oksida željeza upotrebljava krom-dioksid (CrO_2). Magnetofonske vrpce s krom-dioksidom imaju manji šum i bolju frekvencijsku karakteristiku. U najnovije vrijeme svojstva su magnetofonskih vrpca znatno poboljšana upotrebom vrlo fino dispergirano željeznog oksida ili metalnog željeza kao magnetskog materijala.

Minijaturni magneti izrađuju se od legure sa $\sim 77\%$ platine i 23% kobalta. Legure Pt-Co (npr. Platinax II) izotropne su i odlikuju se ekstremno visokim produktom $(B \cdot H)_{\max}$, 74 kWs/m³, i vrlo velikim koercitivnim poljem od 385 kA/m, a remanencija im iznosi 0,64 T.

Martenzitni čelici sa primjesama vanadija, kroma i kobalta imaju historijski značaj kao prve legure za permanentne magnetne, ali se zbog malog koercitivnog polja i malog produkta $(B \cdot H)_{\max}$ gotovo više ne proizvode.

Istraživanja na području permanentnih magneta posljednjih su godina dosta intenzivna. Intermetalni spojevi kobalta s metalima rijetkih zemalja najviše obećavaju. Izrazito dobra svojstva postignuta su do sada sa spojem SmCo_5 , koji ima produkt

$(B \cdot H)_{\max}$ do 160 kW/m³, koercitivno polje do 720 kA/m i remanenciju do 0,9 T. Kad budu prebrođene neke tehnološke poteškoće, a to će sigurno biti u najskorijoj budućnosti, magneti od ove legure zauzet će vrlo važno mjesto među permanentnim magnetima.

Z. Godec

MATERIJALI ZA VODIČE

Pod vodičem u širem smislu razumijeva se materijal kojomu je specifični električni otpor razmjerno mali (reda veličine 10^{-6} ... 10^{-8} Ωm), odnosno specifična električna vodljivost razmjerno velika (10^6 ... 10^8 S/m). U tako definirane vodiče ubrajaju se, dakle, sve tvari koje dobro vode električnu struju, bez obzira na to da li u njima električni naboj prenose elektroni ili ioni, tj. da li se radi o vodičima prvog ili drugog reda.

Uže značenje pojma vodiča kao elektrotehničkih materijala ne obuhvaća, međutim, vodiče drugog reda (v. *Elektrokemija*, TE 4, str. 364). Zbog toga, kad je u nastavku riječ o vodičima, podrazumijeva se da su to vodiči prvog reda. Osim toga kao elektrotehnički materijali mogu se za određene svrhe upotrijebiti samo oni vodiči koji imaju, osim vodljivosti, i određena druga fizikalna, kemijska i tehnološka svojstva i kojima se upotreba ekonomski može opravdati.

Po svome sastavu takvi su vodiči po pravilu i metali i legure, a ponekad se upotrebljavaju i neki čvrsti spojevi na koje je također primjenljiva teorija vodljivosti metala.

Teorija električne vodljivosti metala. Metali u čvrstom stanju imaju kristalnu strukturu. U pojednostavnjenoj predodžbi klasične teorije električne vodljivosti kristal metala sastavljen je od čvrste rešetke izgrađene od pozitivnih iona i stanovitog broja u rešetki slabo vezanih i zbog toga lako gibljivih (valencijskih) elektrona, koji čine tzv. elektronski plin. Broj takvih valencijskih elektrona vrlo je velik; u jedinici volumena z -valencijskog metala on iznosi $(N_L/M) z e$, gdje je N_L Loschmidtov broj (broj molekula u molu), M molekularna težina, a e gustoća metala. Red veličine mu je 10^{22} ili 10^{23} /cm³. Kad kristal metala nije u električnom polju, elektroni u elektronskom plinu se nesredeno (toplinski) gibaju srednjom brzinom koja je ovisna o temperaturi. Drugi čimilac koji određuje srednju brzinu gibanja elektrona u rešetki jest sudaranje tih elektrona s pozitivnim ionima. Ako se pri tome elektroni gibaju srednjom brzinom v_s i između dva uzastopna sudara pređu (u prosjeku) put l_0 , srednje vrijeme između dva sudara iznosi

$$t = \frac{l_0}{v_s} \quad (1)$$

Ovom toplinskom gibanju elektrona superponira se gibanje uslijed električnog polja, koje izaziva dodatno ubrzanje elektrona

$$a = \frac{eE}{m_e} \quad (2)$$

(gdje su e i m_e naboj i masa elektrona, a E jakost polja), pa je prirast brzine za vrijeme t (iz jedn. 1 i 2):

$$\Delta v = at = \frac{eEl_0}{m_e v_s}$$

Budući da je naboj e elektrona negativan, smjer gibanja elektrona u polju E suprotan je smjeru polja. Može se izvesti da je komponenta brzine u tom smjeru jednaka

$$\vec{\Delta v} = \frac{\Delta v}{2} = \frac{1}{2} \frac{eEl_0}{m_e v_s}$$

Kako je to brzina kojom se u smjeru nasuprot polju gibaju svi elektroni unutar jedinice volumena vodiča, gdje je njihov broj n_0 , gustoća J električne struje koja tada teče određena je izrazom

$$J = n_0 e \vec{\Delta v} = \frac{n_0 e^2 l_0}{2 m_e v_s} E \quad (3)$$

Očito nijedna od veličina u razlomku na desnoj strani jednadžbe (3) ne zavisi od jakosti polja. To znači da je gustoća električne struje kroz vodič na određenoj temperaturi proporcionalna jakosti polja. Koeficijent proporcionalnosti

$$\kappa = \frac{n_0 e^2 l_0}{2 m_e v_s} \quad (4)$$

jest *specifična električna vodljivost* vodiča i predstavlja materijalnu »konstantu« tvari.

Dimenzija specifične vodljivosti, kako se može razabrati iz jedn. (4) uz pomoć jedn. (2) i Ohmova zakona, jest vodljivost kroz duljinu; njezina je jedinica u sistemu SI, prema tome, simens po metru: S/m = S · m/m². Recipročna vrijednost specifične vodljivosti je specifični otpor ρ ; njegova je jedinica u sistemu SI om-metar: Ωm = Ω · m²/m. Električna vodljivost G tijela jednolikog presjeka upravo je razmjerna površini presjeka S tijela i obrnuto razmjerna njegovoj duljini l , odn. električni otpor R upravo je razmjernan duljini l , a obrnuto razmjernan površini presjeka S :

$$G = \kappa \frac{S}{l}, \text{ odn. } R = \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

Koeficijenti proporcionalnosti κ i ρ jesu specifična električna vodljivost, odn. specifični električni otpor. Njihova je numerička vrijednost (u S/m, odn. Ωm), prema tome, jednaka numeričkoj vrijednosti (u S, odn. Ω) vodljivosti, odn. otpora, koće s duljinom brida 1 m.

Budući da se u praksi površina presjeka vodiča obično izražava u kvadratnim milimetrima, specifična se vodljivost izražava često u S/mm², odn. specifični otpor u Ωmm²/m. (1 S/mm² = 10⁶ S/m, 1 Ωmm²/m = 10⁻⁶ Ωm.)

Klasična teorija vodljivosti metala smatra se i danas u biti točnom, jer postojanje elektronskog plina, kao njena temeljna teza, ne samo omogućava tumačenje i drugih pojava (na njoj se npr. zasniva i teorija toplinske vodljivosti i s pomoću nje je objašnjivo zašto su dobri vodiči električne struje ujedno i dobri vodiči topline), već je i potvrđeno pokusima. Ipak rezultati novijih istraživanja strukture materije (v. *Atom*, TE 1, str. 456) zahtijevali su znatnu rafinaciju njenih predodžbi.

Suvremena teorija strukture materije uzima u obzir međusobno djelovanje privlačnih i odbojnih sila u kristalnoj rešetki čvrstih tijela (dakle, i vodiča). Takvo djelovanje može se predstaviti poljem potencijala u okolini iona, proširenim energetske razine (tzv. energetskim vrpčama) u kojima se, već prema privlačnim silama susjednih iona i odbojnim susjednih elektrona nalaze pojedini elektroni s diskretnim, kvantiziranim energetskim razine. (O tome vidi prikaz u članku *Elektronika, sastavni dijelovi*, str. 472, također u članku *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 674, *Čvrsto stanje*, TE 3, str. 134, i *Metali*.)

Utjecaj temperature na električnu vodljivost. Toplinsko gibanje elektrona i titranje iona oko svojih ravnotežnih položaja u rešetki ubrzavaju se pri povišenju, a usporavaju pri sniženju temperature. Uslijed toga se pri povišenju temperature povećava (a pri sniženju temperature smanjuje) broj sudara između samih elektrona i između elektrona i iona rešetke u jedinici vremena, tj. smanjuje se (odn. povećava) vrijeme $t = l_0/v_s$ (jedn. 1) i uslijed toga se, prema jedn. (4), smanjuje (odn. povećava) specifična vodljivost κ . Prema tome, što je temperatura viša to je specifična vodljivost metala manja, tj. specifični otpor veći.

Zbog temperaturne zavisnosti električne vodljivosti, odn. električnog otpora, pri navođenju vrijednosti (specifičnog) otpora ili (specifične) vodljivosti materijala za vodiče treba u načelu navesti i temperaturu za koju ta vrijednost važi. Obično je to temperatura $\vartheta = 20^\circ\text{C}$, pa se električni otpor na toj temperaturi označuje sa R_{20} .

Na nekoj drugoj temperaturi $\vartheta + \Delta\vartheta$ električni je otpor

$$R = R_{20} + \Delta R \quad (6)$$

Ako se slovom α_{20} označi temperaturni koeficijent otpora na temperaturi $\vartheta = 20^\circ\text{C}$:

$$\alpha_{20} = \frac{1}{R_{20}} \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta} \quad (7)$$

jedn. (6) može se pisati u obliku

$$R = R_{20} (1 + \alpha_{20} \Delta\vartheta) \quad (8)$$

ili, s jedn. (5):

$$R = \frac{\rho l}{S} (1 + \alpha_{20} \Delta\vartheta) \quad (9)$$

U dosta širokom području temperatura na kojima se gotovo isključivo radi u praksi, temperaturni koeficijent α_{20} vodiča važnih kao elektrotehnički materijali, približno je konstantan, tj. u tom području ovisnost otpora o temperaturi prikazan je pravcem, kako je to npr. za bakar prikazano na sl. 22. Koeficijent smjera tan β' tog pravca određen je prema jedn. (7) jednadžbom

$$\tan \beta' = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta} = R_{20} \alpha_{20}$$

U tabl. 2 navedene su za najvažnije vodiče približne vrijed-

nosti specifičnog električnog otpora, specifične električne vodljivosti i temperaturnog koeficijenta otpora na temperaturi 20 °C.

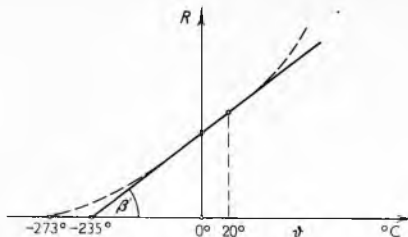
Tablica 2
SPECIFIČNI OTPOR, SPECIFIČNA VODLJIVOST I TEMPERATURNI KOEFICIJENT OTPORA MATERIJALA ZA VODIČE

Materijal	Specifični električni otpor $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Specifična električna vodljivost Sm/mm^2	Temperaturni koeficijent otpora $1/^\circ\text{C}$
Srebro	0,016 4	61	0,004 1
Bakar	0,017 2	58	0,003 9
Aluminijum	0,028 3	34	0,003 7
Natrijum	0,048 8	20,5	0,005 5
Mjcd	0,075	13,3	0,001 6
Željezo	0,098	10	0,005 5

Kako se vidi na sl. 22, u područjima izvan područja praktički važnih temperatura ne vrijedi pretpostavka o konstantnosti temperaturnog koeficijenta otpora. U tim područjima temperaturâ može se temperaturna zavisnost električnog otpora prikazati redom potencija:

$$R = R_0 (1 + \alpha \theta + \beta \theta^2 + \dots),$$

gdje je R_0 otpor vodiča na 0 °C, a koeficijenti $\alpha, \beta, \dots$ veličine koje se određuju mjerenjima za svaku pojedinu vrstu vodiča.



Sl. 22. Ovisnost otpora R bakrenog vodiča o temperaturi

Opisano djelovanje temperature na vodljivost općenito je vrlo značajno za primjenu vodiča. Tako npr. u području temperature od 20 do 500 °C otpor vodiča od srebra naraste 2,52, zlata 2,71, bakra 2,9, aluminijuma 3,82, nikla 10 puta.

Supravodljivost. Pojavu supravodljivosti prvi je primijetio H. Kamerlingh Onnes. Nakon toga (1911) uspio je u prstenu od žive, čiju je temperaturu održavao na nekoliko stupnjeva apsolutne temperature s pomoću tekućeg helijuma, proizvesti električnu struju koja je po isključenju njenog izvora tekla dvije godine. (Prestala je teći zbog štrajkom izazvanog prekida isporuke tekućeg helijuma.) Od tada je nađeno to svojstvo u velikom broju metala i legura. Tvari koje imaju to svojstvo nazivaju se supravodičima. Zanimljivo je da se među njima ne nalaze tvari koje su na običnoj temperaturi najbolji vodiči.

Supravodljivim tvarima na vrlo niskim temperaturama više ili manje naglo se mijenja karakter ovisnosti električnog otpora o temperaturi. Pri postepenom snižavanju temperature, na određenoj, tzv. kritičnoj temperaturi T_c električni otpor, umjesto da se, kao dotada, polako smanjuje, manje ili više naglo pada praktički na nulu (sl. 23). Ako je taj pad sasvim skokovit, govori se o supravodiču tipa S 1, ako je blaži, o supravodiču tipa S 2. Supravodič tipa S 1 ima dva stabilna stanja: normalno vodljivo i supravodljivo; supravodič tipa S 2 ima u odsutnosti magnetskog polja tri stabilna stanja: normalno vodljivo — iznad »gornje» kritične temperature — supravodljivo — ispod »donje» kritične temperature — i miješano — između obiju kritičnih temperatura. (Redovito se supravodič tipa S 2 karakterizira samo jednom kritičnom temperaturom, srednjom između gornje i donje.)

Kritične temperature supravodljivog stanja nekih (čistih) metalnih elemenata nalaze se vrlo blizu apsolutne nule (npr. za volfram $T_c = 0,01 \text{ K}$). Za većinu drugih supravodiča iz te skupine tvari one iznose nekoliko kelvina. Samo neke od tih tvari imaju vrijednosti T_c u blizini 10 K (npr. niobijum $T_c = 9,5 \text{ K}$). Kritične temperature supravodiča iz skupine legura

redovito su više od 10 K (npr. za neke ternarne legure u sustavu niobijum-aluminijum-germanijum, $T_c = 20,7 \text{ K}$).

Magnetsko polje snižava kritičnu temperaturu, i to s tim više što je polje jače. Kad se prekorači određena, tzv. *kritična jakost polja* (H_c) na nekoj temperaturi (T_c) supravodljivost sasvim nestaje, i tvar postaje normalno vodljiva. Ta ovisnost temperature nestanka supravodljivosti o magnetskom polju određena je izrazom

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^2 \right], \quad (9)$$

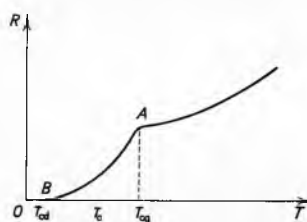
gdje je H_0 kritično magnetsko polje na apsolutnoj nuli temperature, a T_0 kritična temperatura uz magnetsko polje $H_c = 0$. Funkcija $H_c = f(T_c)$ prikazana je krivuljom na sl. 24, a za neke supravodiče iz skupine elemenata ovisnost H_c o T_c , određena po jednadžbi (9), prikazana je u dijagramu na sl. 25.

T_0 i H_0 predstavljaju karakteristične materijalne konstante supravodiča tipa S 1 a krivulje na sl. 25 mogu se smatrati granicama faza, jer je iznad njih tvar stabilna u stanju normalne vodljivosti, a ispod njih u stanju supravodljivosti (v. sl. 24).

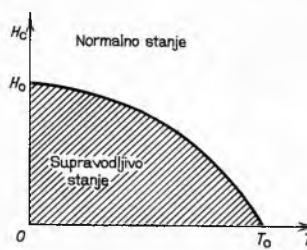
Zbog ovisnosti supravodljivosti o magnetskom polju, jakost električne struje koja može teći supravodičima ograničena je jakošću magnetskog polja koje te struje stvaraju. (Supravodljivo stanje supravodiča tipa S 1 održava se samo dotle dok ta jakost magnetskog polja ne prekorači vrijednost H_{c1} .)

Supravodič tipa S 2 ima dvije kritične jakosti magnetskog polja: donju H_{c1} , pri kojoj supravodič prelazi u miješano stanje vodljivosti, i gornju H_{c2} , pri kojoj postaje normalno vodljiv.

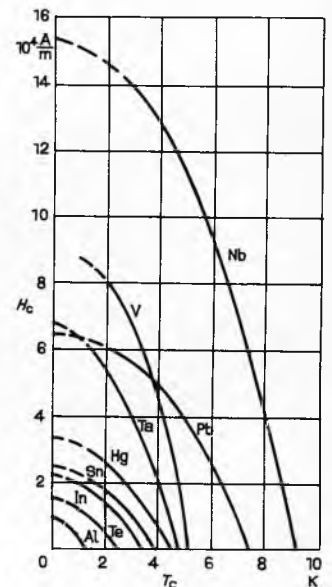
W. Meissner i R. Ochsenfeld pokazali su eksperimentalno 1933 da supravodič, ako se najprije izloži magnetskom polju a onda ohladi, na temperaturama ispod T_c istiskuje iz sebe magnetsko polje. Supravodiči tipa S 1 na oštro određenoj vrijednosti jakosti polja H_c potpuno istisnu magnetsko polje (magnetska indukcija B u njima skokovito padne na nulu), u supravodičima tipa S 2 magnetsko se polje može između vrijednosti H_{c2} i H_{c1} djelomice održati u obliku pojedinačnih lokaliziranih i pravilno raspoređenih cijevi (niti), nosilaca magnetskog toka, koje su okružene supravodljivim područjem. Supravodiči tipa S 1 imaju znatno manje karakteristične vrijednosti H_0 nego supravodiči S 2.



Sl. 23. Ovisnost otpora R supravodiča o temperaturi. U području između A i B pojavljuje se supravodljivost. Širina područja ovisi o čistoti metala



Sl. 24. Ovisnost supravodljivosti o temperaturi T_c i jakosti magnetskog polja $H_c \cdot H_0$. Kritično magnetsko polje pri $T_c = 0$, T_0 kritična temperatura pri $H_c = 0$



Sl. 25. Ovisnost između kritične temperature T_c i kritične jakosti magnetskog polja H_c za neke supravodljive metale

U supravodičima tipa S 2, dok su u stanju miješane vodljivosti, nemoguć je prijenos naboja, jer struja okomita na magnetsko polje izaziva Lorentzovu silu koja stavlja u gibanje rešetku niti magnetskog toka. Tehnološkim mjerama uspjelo je u nekim supravodljivim legurama blokirati gibanje niti magnetskog toka i

time omogućiti veće gustoće struje. Takav materijal naziva se supravodičem tipa S3.

Supravodiči S1 i S2, tzv. meki, prelaze iz jednog u drugo stanje vodljivosti potpuno reverzibilno a u odsutnosti magnetskog polja to se odvija bez toplinskog učinka (izotermno). Pod utjecajem magnetskog polja prijelaz je iz supravodljivog stanja u stanje normalne vodljivosti endoterman (odvija se uz vezanje topline), a prijelaz u suprotnom smjeru egzoterman (odvija se uz razvijanje topline). Uslijed Meissner-Ochsenfeldova efekta električnu struju u supravodičima vodi samo vrlo tanki površinski sloj (debljine približno 10^{-7} m).

Supravodiči tipa S3, tzv. tvrdi, razlikuju se od supravodiča tipa S1 i S2 po djelomičnoj ireverzibilnosti njihovih indukcijskih karakteristika, uslijed čega se u njima pojavljuje magnetska histereza slično kao u feromagnetskim materijalima. Ovi supravodiči imaju veću kritičnu gustoću električne struje i veću kritičnu jakost magnetskog polja nego supravodiči tipa S1 i S2.

Sl. 26 prikazuje karakteristike supravodiča svih triju tipova, tj. ovisnost magnetske indukcije B u njima o jakosti polja H .

Utjecaj stranih tvari na vodljivost. Prisutnost stranih tvari u nekom vodiču ima za posljedicu promjene strukture njegove kristalne rešetke, što se mora odraziti i na vodljivost. To se već očituje u binarnim legurama (npr. legurama iz sustava nikal-željezo), kod kojih s porastom sadržaja jednog sastojka (i smanjivanjem sadržaja drugoga) raste specifični električni otpor dok postigne neki maksimum, a zatim opet opada. Zanimljivo je da je zavisnost temperaturnog koeficijenta otpora tih tvari od sastava obrnuta, tako da binarne legure s maksimalnim specifičnim električnim otporom često imaju minimalan temperaturni koeficijent otpora. Pri tome ovaj može poprimiti čak i negativne vrijednosti, tako da električni otpor tih vodiča može i da opada s porastom temperature, i obrnuto.

Treba očekivati da će vrlo čisti (tzv. supračisti) metali imati znatno manji specifični električni otpor nego manje čisti. To se doista i primjećuje, posebno na niskim temperaturama.

Ostala svojstva vodiča. Od mehaničkih svojstava materijala koji se primjenjuju kao vodiči u elektrotehnici najvažnija je njihova čvrstoća na vlak, tlak i savijanje (σ_v , σ_t i σ_s), njihova rastezljivost i modul elastičnosti E . Važno mehaničko svojstvo vodiča osim toga je i njihova tvrdoća određivana obično po Brinellu, a ponekad i njihova udarna žilavost.

Od ostalih fizikalnih svojstava za primjenu vodiča u elektrotehnici važna su njihova gustoća (specifična masa), specifična toplota i toplinska vodljivost, te toplinsko rastezanje (obično mjereno toplinskim koeficijentom rastezanja).

Od tehnoloških svojstava vodiča potrebnih za izradu pojedinih elektrotehničkih proizvoda važna su ona koja utječu na izvedivost procesa kovanja, lijevanja, izvlačenja, spajanja, strojne obrade itd. Od kemijskih svojstava vodiča u elektrotehnici važna su ona koja određuju njihovu postojanost (npr. otpornost prema djelovanju atmosferilija, kiselina, lužina, sastojaka izolacijskih i impregnacijskih sredstava itd.).

Utjecaj je temperature i na sva ova svojstva vodiča znan, pa ona i tu predstavlja ograničavajući faktor upotrebe. Preko- račenje dopuštene temperature može, npr., izazvati gubit akpotrebnih mehaničkih svojstava vodiča, nedozvoljeno ubrzanje kemijskih reakcija s tvarima iz njihove okoline, taljenje.

Podjela vodiča u elektrotehnici. Kao elektrotehnički materijali vodiči se obično dijele na one koji služe za izradu vodova (materijali za vodove), za izradu otpornika (otporski materijali) i za izradu kontaktnih uređaja (materijali za kontakte). Ostale

vrste vodiča, kao što su supravodiči i supračisti vodiči, mogu se smatrati specijalnim vrstama vodiča.

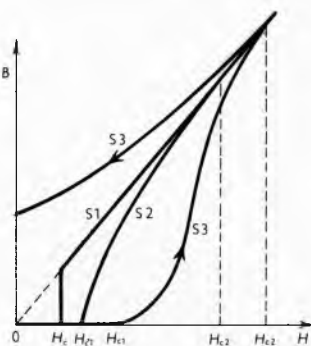
Materijali za vodove

Među ovim materijalima (v. str. 61) najvažniji su bakar, aluminijum, željezo i njihove legure. Najbolji vodič, srebro, odviše je skup da bi se mogao upotrijebiti kao materijal za vodove, osim kao dodatak drugim materijalima za poboljšanje njihovih upotrebnih svojstava. Najnovija vrsta materijala za vodove jest natrijum.

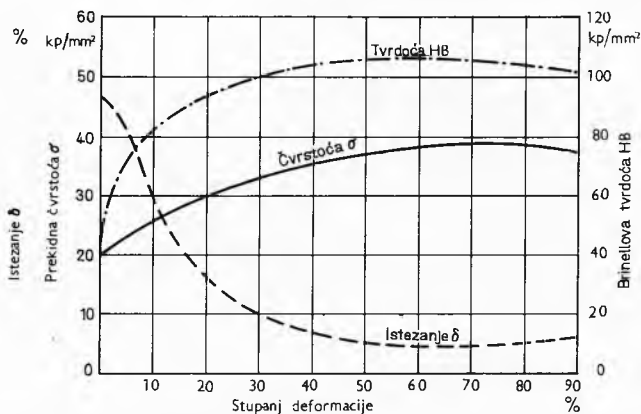
Bakar i njegove legure. Izuzevši vrlo skupo srebro, od svih materijala za vodiče bakar (v. *Bakar*, TE I, str. 651) ima za elektrotehniku najpovoljniju kombinaciju električnih i mehaničkih svojstava, što ga zajedno s njegovom, za veći dio primjena prihvatljivom cijenom čini još uvijek najvažnijim materijalom za vodiče, i time za elektrotehniku uopće.

Od svih svojstava bakra i njegovih legura (v. *Bakar*, TE I, str. 657) svakako je najvažnije njihova specifična vodljivost. Utjecaj postupka deformiranja upotrijebljenog za dobivanje elektrotehničkih proizvoda od tih materijala na specifičnu vodljivost brojčano je neznatan. Međutim, mehanička svojstva proizvoda od bakra dobivenih postupcima hladne i vruće deformacije znatno se razlikuju.

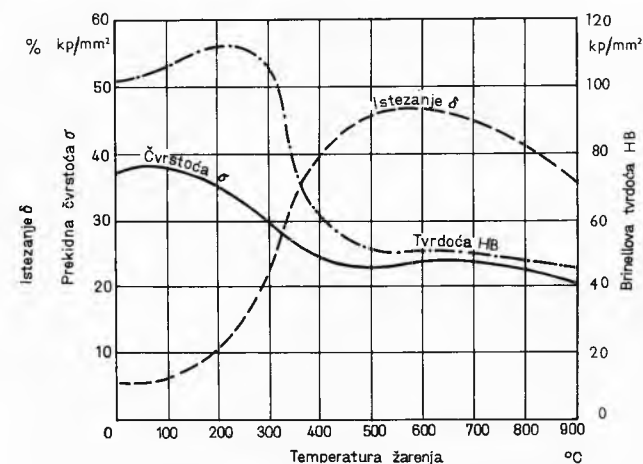
Pri hladnoj obradi bakra, npr. pri izvlačenju tankih žica, njegova se kristalna struktura prisilno usmjerava, u većoj ili manjoj mjeri, ovisno o stupnju deformacije, uslijed čega poraste mehanička čvrstoća i tvrdoća materijala, a smanjuje se postotno istezanje pri kidanju (δ). Te promjene prikazane su dijagramima na sl. 27. One su povoljne kad se radi o vodičima



Sl. 26. Ovisnost magnetske indukcije B u supravodičima triju tipova S1, S2, i S3 o jakosti magnetskog polja H . H_{c1} Kritična jakost magnetskog polja, H_{c2} donja kritična jakost magnetskog polja, H_{c2} gornja kritična jakost magnetskog polja



Sl. 27. Ovisnost mehaničkih svojstava bakra o stupnju deformacije u hladnom stanju



Sl. 28. Ovisnost mehaničkih svojstava bakra o temperaturi žarenja

za vodove koji služe za prijenos električne energije, ali tamo gdje su potrebna mehanička svojstva mekog bakra, kao i izoliranim vodičima (npr. u lakiranim žicama, instalacijskim vodo-

vima i kabelima), proizvodi dobiveni hladnim postupkom moraju se odžariti. Kako se mehanička svojstva bakra mijenjaju u ovisnosti o temperaturi žarenja prikazano je dijagramima na sl. 28. Odatle se vidi da se bakar mora odžariti u području oko 400 °C (zavisno od stupnja prethodne deformacije, mase i debljine ili promjera proizvoda, sadržaju primjesa, vrsti peći itd.). Vrijeme potrebno za prekristalizaciju, koja dovodi do traženog omekšanja, traje oko 3 sata. Zbog osjetljivosti bakra prema kisiku iz zraka, atmosfera u pećima za odžarivanje održava se inertnom (obično s pomoću vodene pare ili nekog inertnog plina).

Osim hladnim postupcima, bakar se može obrađivati i postupcima vruće obrade. Međutim, kako nije polimorfan, ne može se oplemenjivati postupcima toplinske obrade.

Za kvalitet elektrotehničkog bakra električna vodljivost je ipak njegovo najvažnije svojstvo. Ona nije ovisna samo o čistoći bakra izražene sadržajem Cu u tehničkom proizvodu, već i o vrsti primjesa. Npr., dok nju sadržaj kadmijuma, cinka ili srebra od 0,05% neznatno smanjuje, sadržaj je željeza ili fosfora smanjuje vrlo jako (za 30, odnosno više od 40%). Dakle, i vrlo mali sadržaj primjesa u elektrotehničkom bakru može biti vrlo štetan. Zbog toga se pri njegovoj proizvodnji poduzimaju mjere da se taj sadržaj što više smanji. Koristi se vrlo slaba topljivost oksida bakra i primjesa u rastaljenom bakru: primjese se oksidiraju kisikom; pri tom se, radi sigurnosti, oksidacija nastavlja dok se oksidira i nešto bakra. Obično se održava vrlo mali sadržaj kisika (0,01 do 0,05%, vjerojatno u obliku bakar (I)-oksida), u rafiniranom bakru, unatoč što to također smanjuje njegovu vodljivost i uzrokuje sklonost vodikovoj bolesti (v. *Bakar*, TE 1, str. 651). Temeljna oznaka elektrotehničkog bakra s malim sadržajem kisika u standardima jest E-Cu.

Najvažnija svojstva nekih od tih materijala prikazana su u tablici 3.

Tablica 3
SVOJSTVA ELEKTROTEHNIČKOG BAKRA

Oznaka	Čvrstoća na vlak kp/mm ²	Tvrdoća HB kp/mm ²	Produženje pri kidanju %	Specifična električna vodljivost, Sm/mm ²	
				Okrugli profili, žice,	Plosnati profili, lim
Meki, E-Cu F 20	20...25	40...65	30...40	57	56
Polutvrdi, E-Cu F 25	25...30	60...80	6...15		
Tvrdi, E-Cu F 30	30...37	75...95	2...8		
E-Cu F 37	37...45	85	2...4	55...56*	54...55*
Perotvrdi, E-Cu F 45	45				

* Za proizvode s debljinama (promjerima) manjim od 1 mm vrijede niže, a za proizvode s debljinama većim od 1 mm više vrijednosti

Primjena pojedinih vrsta elektrotehničkog bakra za izradu pojedinih vrsta električnih vodova određena je, već prema njihovom presjeku i konstrukciji, posebnim propisima. Propisima je određena i primjena pojedinih vrsta elektrotehničkog bakra za konstrukciju električnih strojeva i aparata i nadzemnih vodova.

Osim za vodove i namote električnih strojeva i aparata, u novije vrijeme važna je i sve veća potrošnja bakra u proizvodnji vrlo tankih folija (debljine 35 i 70 μm) za štampane i integrirane sklopove. Zbog toga što im debljina mora biti jednolična, te folije se proizvode elektrolitičkim postupcima.

Iznad 150 °C bakar na zraku sve intenzivnije oksidira, pri čemu oksid ne nastaje samo na površini vodiča, već postepeno napreduje i u njegovu unutrašnjost. Na kraju može doći do potpunog razaranja materijala oksidacijom. Proces oksidacije bakra prati ne samo rast električnog otpora vodiča već i smanjivanje njegove čvrstoće i rastezljivosti. Oksidacija bakrenog vodiča ubrzava se protjecanjem struje kroz njega jer se uslijed povećanja otpora razvija sve više topline i, uslijed toga, povišuje temperatura. Zbog tih je pojava primjena golih vodiča od bakra ograničena, već prema njihovim dimenzijama, na područja temperatura ispod najviše dopuštene temperature (npr. za bakrenu

užad i tanke žice do 150 °C, za masivne vodiče do 180 °C). Ako, pak, radne temperature moraju biti više, upotrebljavaju se vodiči od bakra prevučeni slojevima drugih metala. Npr. na temperaturama između 200 i 250 °C upotrebljavaju se posrebrjeni vodiči od bakra. (Njihova srebrna prevlaka ne smije biti porozna ni tanja od 1 μm.) Za temperature iznad 250 °C upotrebljavaju se vodiči od bakra prevučeni slojem nikla. Prevlake od

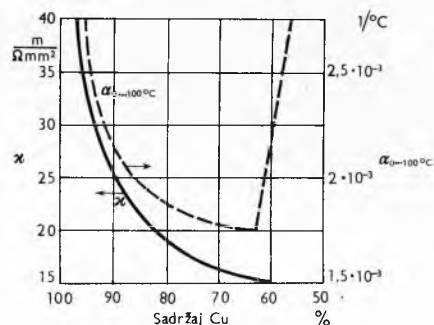
Tablica 4
OVISNOST KOEFICIJENTA k O TEMPERATURI ZRAKA

t , °C	250	400	600	800	1000
k	$1,02 \cdot 10^{-13}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$

kositra uobičajene debljine (0,5 μm) ne mogu dovoljno ograničiti koroziju vodiča od bakra na višim temperaturama. Zbog toga su dopuštene temperature njihove primjene jednake kao i za gole vodiče od bakra. (Kositreni sloj štiti vodiče od bakra od nekih drugih vrsta korozije, na kojima sloj patine (v. *Bakar*, TE 1, str. 651) ne predstavlja dovoljnu zaštitu.)

Kad mehanička svojstva bakra ne zadovoljavaju, a potreban je dobro vodljiv materijal, pribjegava se upotrebi niskolegiranih legura bakra (uglavnom s malim količinama srebra i/ili kadmijuma), mjedi i bronzi, na uštrb, dakako, električne vodljivosti vodova. Niskolegirane legure bakra sa srebrom, poznate i pod nazivom srebrni bakar (v. *Bakar*, TE 1, str. 658), predstavljaju elektrotehničke materijale s kojima se postiže razmjerno vrlo povoljan kompromis između zahtjeva za većom čvrstoćom i zahtjeva za što većom vodljivošću. Srebro, naime, dodano bakru u količini do 1% razmjerno mu malo (do 2%) smanjuje vodljivost, a u velikoj mjeri ograničava njegovu oksidaciju na višoj temperaturi. Zbog toga se takve legure upotrebljavaju za konstrukciju vodljivih dijelova električnih strojeva koji rade na visokim pogonskim temperaturama. Legure bakra s malo kadmijuma, poznate i kao kadmijum-bronce (jako s pravim bronzama nemaju mnogo zajedničkog) još su važnije za upotrebu u ovakvim slučajevima. Njihov sadržaj kadmijuma (do ~1%) također razmjerno malo utječe na električnu vodljivost, a jako povećava mehaničku čvrstoću. Vodiči od ovih materijala imaju do 50% veću čvrstoću nego vodiči izrađeni od bakra. Zbog toga se naročito mnogo upotrebljavaju za jako napregnute nadzemne vodove, kao što su npr. vodovi kontaktne mreže električnih željeznica. I takvim je vodičima otpornost prema habanju i vibracijskim naprezanjima veća nego vodičima od bakra, a da im pri svemu tome krutost nije veća. Zbog toga se upotrebljavaju za izradu dijelova električnih strojeva izloženih trošenju (npr. kolektora) i savitljivih vodova.

Mjedi (*mesinzi*). Od mehaničkih svojstava tih legura bakra (v. *Bakar*, TE 1, str. 658, 659) za elektrotehniku su najzanimljivija mehanička čvrstoća i rastezljivost, koje su im veće nego



Sl. 29. Ovisnost električne vodljivosti α i temperaturnog koeficijenta α_0 specifičnog električnog otpora mjedi o sadržaju bakra

vodičima od bakra. Ovisnost električne vodljivosti i temperaturnog koeficijenta specifičnog električnog otpora mjedi o njihovom sastavu prikazana je dijagramima na sl. 29. Oznaka mjedi u standardima je Ms i jedan dvoznamenkasti broj, koji predstavlja njihov približni sadržaj bakra (npr. Ms 60 je mjed sa sadržajem

od 59,5 do 62,0% bakra). Mjedi se u elektrotehnici najviše upotrebljavaju u obliku limova od Ms 60, Ms 63 i ponegdje od Ms 67 i (za dijelove izložene jačoj koroziji, npr. djelovanju atmosfere) Ms 85, nadalje za izradu proizvoda koji se dobivaju štancanjem (npr. vodljivih dijelova grla, utikača, osigurača), u obliku profila (obično od Ms 58) za izradu proizvoda koji se dobivaju strojnom obradom (npr. stezaljki, priključnica, dijelova utikača) i u obliku žice (od svih vrsti mjedi, od Ms 58 do Ms 90), koja se ponekad — u specijalnim slučajevima — upotrebljava i za namote električnih strojeva.

Osim ovih binarnih legura bakra i cinka u ovu skupinu elektrotehničkih materijala ubrajaju se i tzv. specijalne mjedi (v. *Bakar*, TE 1, str. 659) koje sadrže i manje količine drugih metala, npr. mangana i kositra (za poboljšanje otpornosti prema koroziji, npr. u dodiru s morskom vodom), nikla, aluminijuma i željeza (za povećanje mehaničke čvrstoće).

Bronce. Pod oznakom bronca obično se razumijevaju skoro sve legure bakra koje, za razliku od mjedi i tzv. novog srebra, ne sadrže cink kao drugi glavni sastojak. Različite bronce često se nazivaju po glavnim legurnim metalima. Za elektrotehniku su od ovih materijala najvažnije tzv. vodljive bronce, pa kositrane i aluminijumske bronce. Osim njih se u elektrotehnici upotrebljavaju i manganske, olovne, kositrano-olovne i berilijumske bronce.

Sa stajališta elektrotehnike vodljive bronce su, kao i već opisane legure bakra, materijali koji imaju bolja mehanička svojstva nego bakar, uz dopustivo manju električnu vodljivost. Među njima najpoznatije su Bz I (legura bakra s vrlo malo magnezijuma), Bz II (legura bakra s malo magnezijuma ili kositra i kadmijuma), Bz III (legura bakra s malim količinama kositra ili kositra i cinka) i tzv. srebrena bronca (legura bakra sa 2...6% srebra i do 1,5% kadmijuma). Upotrebljavaju se za izradu vodiča nadzemnih vodova za prijenos električne energije. Iz sličnih razloga zanimljive su kao elektrotehnički materijali i kositrane bronce (koje se obično nazivaju naprosto bronzama) a među njima su za elektrotehniku najvažnije legure za gnječenje, tzv. fosforne bronce (v. *Bakar*, TE 1, str. 659). Osim toga one su zanimljive i zbog svoje elastičnosti i razmjerno velike otpornosti prema koroziji i kliznom trenju. Zbog tih svojstava upotrebljavaju se kao materijali za izradu kontaktnih i drugih opruga, membrana, žičanih pletiva, konstrukcijskih dijelova kliznih ležaja, zupčanika, pužnika i armatura.

Od aluminijumskih bronci (v. *Bakar*, TE 1, str. 659) za elektrotehniku su važne binarne legure sa sadržajem aluminijuma do 9% i neke s dodacima željeza (ispod 4%), nikla (ispod 5%), mangana, bizmuta, kositra. Svojstva su im slična svojstvima kositranih bronci, a kako im je glavna odlika da su razmjerno jeftine, poglavito se upotrebljavaju kao nadomjestak za njih.

Ostale navedene bronce služe u elektrotehnici za specijalne svrhe, npr. kao materijali za spajanje u izradi elektroniki (manganske bronce s niskim sadržajem mangana), jako opterećene klizne ležaje i armature otporne prema djelovanju kiselina (olovne i kositrano-olovne bronce), specijalne kontaktne opruge, posebno opruge izložene jakom djelovanju korozije (berilijumske bronce).

Bakar je do nedavna poslije željeza bio za tehniku uopće najvažniji metal. Danas se po općoj tehničkoj važnosti nalazi na trećem mjestu. (Drugo mjesto zauzeo je aluminijum.) Najvažnija je njegova primjena u elektrotehnici, gdje i dalje ostaje najviše upotrebljavani materijal uopće. (Ne samo što se ~50% njegove ukupne proizvodnje izravno troši za izradu vodiča, već i znatan dio njegovih legura, za koje se troši daljih 40% te proizvodnje, služi za različite elektrotehničke svrhe.) Zbog toga se potrošnja bakra u ovom stoljeću jako povećala (ona je na početku stoljeća iznosila samo ~0,5 Mt, a koncem pedesetih godina kretala se oko 4 Mt). Posljedica je tako naglog razvoja potrošnje bakra u svijetu već osjetno iscrpljivanje njegovih prirodnih izvora. To, zajedno s ponekad nepovoljnim ekonomskim uvjetima njegove upotrebe, ima za posljedicu da se sve više traže mogućnosti njegove zamjene drugim materijalima čije su prirodne rezerve izdašnije, a primjena ekonomičnija. Najvažniji je među takvim materijalima aluminijum.

Aluminijum i njegove legure. Glavna tehnička svojstva aluminijuma (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 223), koja ga, uz navedene ekonomske razloge, čine najboljim suvremenim nadomjestkom za bakar u elektrotehnici, jesu njegov razmjerno mali specifični električni otpor, mala specifična masa, dobra otpornost prema koroziji, dobra obradljivost većinom postupaka koji dolaze u obzir (npr. valjanjem, prešanjem, vučenjem, lijevanjem) i neke specifične osobine (npr. otpornost prema električnom luku). S gledišta elektrotehnike njegovi su glavni nedostaci, u usporedbi

s bakrom, lošija mehanička svojstva i teže spajanje dijelova (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 236).

Za usporedbu rezultatnog ekonomskog djelovanja navedenih upotrebnih svojstava aluminijuma u usporedbi s bakrom kao materijalom za vodove, mogu poslužiti podaci navedeni u članku *Aluminijum*, TE 1, str. 235, a još bolje tablica 5. Odatle se može

Tablica 5

OMJER IZMEĐU PROMJERA, PRESJEKÁ, POVRŠINÁ, VOLUMENÁ I MASÁ VODIČÁ JEDNAKE DULJINE I JEDNAKOG ELEKTRIČNOG OTPORA NA 20 °C OD ALUMINIJUMA I BAKRA

Veličina N	Omjer N_{Al}/N_{Cu}	
	Čisti aluminijum $\kappa = 35 \text{ Sm/mm}^2$	Aldrey $\kappa = 30 \text{ Sm/mm}^2$
Presjek, volumen	1,6	1,86
Promjer, površina	1,27	1,37
Masa	0,5	0,57

zaključiti da je na običnim temperaturama zamjena bakra aluminijumom u izradi vodova električne struje ekonomičnija ako cijena aluminijuma po jedinici težine nije dvostruko veća od cijene bakra (najčešći slučaj). Ipak, za točniju ocjenu ekonomičnosti zamjene bakra aluminijumom treba uzeti u obzir i druge činioce (npr. posebne razloge nacionalne privrede, veći temperaturni koeficijent električnog otpora aluminijuma ($0,0637^\circ\text{C}^{-1}$) veće dimenzije aluminijumskih vodova).

Kao bakar, i aluminijum se može preradivati postupcima i hladne i vruće obrade (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 234). Hladna obrada aluminijuma ima slične posljedice, u pogledu mehaničkih i električnih svojstava materijala, kao hladna obrada bakra, samo što je njegova električna vodljivost manje ovisna o tvrdoći. I žarenjem aluminijuma nakon deformacije (u području temperatura od 300 do 400 °C) postiže se, kao i kod bakra, omekšavanje materijala potrebno za izradu savitljivih vodova, a jednako, zbog odsustva polimorfije, proizvodi od nelegiranog aluminijuma ne mogu se oplemenjivati postupcima toplinske obrade.

Kao i elektrotehnički bakar sa sadržajem kisika, tako se i elektrotehnički aluminijum u standardima označava oznakom E-Al. Pod tim se razumijevaju materijali kojima je sadržaj aluminijuma najmanje 99,5%, s time da ukupni sadržaj metalâ koji najviše smanjuju vodljivost (titana, kroma, vanadijuma, mangana) ne prelazi 0,03%; ostatak od 0,41% mogu činiti metali čiji utjecaj na vodljivost nije toliko štetan (npr. željeza, silicijuma, bakra). Najvažnija mehanička i električna svojstva tih materijala različite tvrdoće prikazana su u tablici 6.

Tablica 6

NAJVAŽNIJA SVOJSTVA ELEKTROTEHNIČKOG ALUMINIJUMA

Oznaka	Čvrstoća na vlak kp/mm ²	Tvrdoća HB kp/mm ²	Specifična električna vodljivost, Sm/mm ²	
			žica	profila
E-Al F 7	7... 9	18	36	35,4
E-Al F 9	9...13	28	35,4	34,8
E-Al F 13	13...17	35	35,1	34,5
E-Al F 17	17	35	34,8	34,2

Ovi materijali najviše se upotrebljavaju u izradi vodova za prijenos električne energije. Pri tome se u kabelima upotrebljava (za žile i plašteve) čisti aluminijum, rjeđe, za vodiče malog presjeka, legirani aluminijum. U izradi nadzemnih vodova upotrebljava se, pak, užad od aluminijuma i alučela ili užad od Aldreya, ili užad od Aldreya i čelika.

Prednost je kabela s plaštem od aluminijuma u prvom redu što je jeftiniji od kabela s olovnim plaštem, zatim što je lakši, što se s njega bolje odvodi toplina, što je otporniji prema vibracijama i što mu se plašt može upotrijebiti kao povratni vod. Plašt od aluminijuma mora biti zaštićen specijalnom oblogom, dodatno ako se polaže u lužnato tlo.

Zbog nedovoljne čvrstoće aluminijuma, njegova upotreba u izradi nadzemnih vodova ograničena je na slučajeve kad rasponi među stupovima mogu biti mali. Pa i tada se upotrebljava samo aluminijumska žica od najčvršćih i najtvrdih materijala (E-Al 17). Za nadzemne vodove s većim rasponima među stupovima upotrebljavaju se vodiči od Aldreya ili kombinirani vodiči aluminijum-čelik (alučel) i Aldrey-čelik. O tome vidi *Aluminijum* TE 1, str. 235 i *Dalekovodi*, TE 3, str. 137, 138.

Aldrey (aldrej), niskolegirana legura aluminijuma s magnezijumom i silicijumom (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 235), ima slična mehanička svojstva kao bakar, pa od nje izrađena užad služi za zamjenu bakrenih vodiča u nadzemnim vodovima sa sličnim rasponima među stupovima. Naravno, budući da Aldrey ima manju električnu vodljivost nego materijali E-Al, dimenzije vodiča od te legure i njihova masa moraju biti veće (v. tabl. 5). Od aldreya se također proizvodi užad s čeličnom jezgrom.

Druge aluminijumske legure, kao što su duralumin, aludur, silumin, konstruktal (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 233) najviše se upotrebljavaju u elektrotehnici kao konstrukcijski materijali.

Zbog male specifične mase aluminijuma i njegovih legura, ti materijali zanimljivi su u tehnici jake struje i za druge svrhe. Npr. žice od materijala E-Al upotrebljavaju za namote transformatora i elektromagnetâ u uređajima za prijenos tereta u željezarama, pa čak i za namote nekih rotacijskih strojeva, kad im primjenu ne ograničavaju veće dimenzije namota od aluminijuma u odnosu prema dimenzijama namota od bakra. U ovom je području važna i primjena lijevanih proizvoda od aluminijuma i njegovih legura sa silicijumom (npr. za izradu kaveza rotora asinhronih motora, kao konstrukcijskih materijala kućišta manjih izmjeničnih motora).

Upotreba aluminijuma i njegovih legura u mjernoj tehnici i tehnici slabe struje također je vrlo široka i važna. Od aluminijumskih limova, folija, mrežica, cijevi i žica izrađuje se u tom području mnoštvo proizvoda, npr. šasije, kazaljke, zavojnice titrajnih krugova, antene, membrane, kućišta, kondenzatori. U specijalnim slučajevima izrade kondenzatorâ (npr. elektrodâ elektrolitskih kondenzatora) upotrebljava se najčišći, vrlo skupi aluminijum (tzv. rafinal, sa sadržajem aluminijuma od 99,99%), koji se dobiva elektrolitičkom rafinacijom.

Općenito je u elektrotehnici za primjenu aluminijuma i njegovih legura važna njihova *otpornost prema koroziji* (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 240) čak i na vrlo visokim temperaturama (npr. kabeli s vodičima i plaštom od aluminijuma i mineralnom izolacijom mogu trajno služiti na temperaturama do 450 °C). Ta otpornost posljedica je nastajanja tankog sloja aluminijum-oksida (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 224) na površini proizvoda izrađenih od aluminijuma, pa je otpornost prema koroziji dobra u svakoj sredini u kojoj je taj film otporan (npr. prema oksidnim kiselinama i oksidansima), a loša u sredinama koje taj film otapaju (npr. prema halogenovodičnim kiselinama, lužinama, slanoj vodi). U uvjetima slabe otpornosti aluminijuma prema koroziji, npr. već u slanoj atmosferi, razaranje materijala napreduje smanjujući presjek vodiča i povećavajući njegov otpor slično kao i kod vodiča od bakra, pa o tome u primjeni treba voditi računa.

Lako nastajanje aluminijum-oksida na aluminijumu pogoduje samogašenju električnog luka. Taj oksid, naime, nije vodič (npr. probojni napon vrlo tankog sloja tog materijala od 2 µm iznosi već 200 V). To svojstvo aluminijum-oksida čini aluminijum materijalom prikladnim za izradu sabirnica u tehnici jake struje.

Deblji oksidni film na aluminijumu često se umjetno stvara postupcima kemijske i anodne oksidacije (v. *Aluminijum*, TE 1, str. 241).

U primjeni opterećenih vodiča od aluminijuma potrebno je voditi računa i o sklonosti tog materijala k tzv. puzanju (plastičnom deformiranju pri statičkom opterećenju), naročito pri tlačnom naprezanju na povišenim temperaturama. Zbog toga su u takvim slučajevima dopuštene temperature ograničene na područja niža od inače dozvoljenih za upotrebu aluminijuma u elektrotehnici. Osjetljivost aluminijuma posebno je velika kad je materijal, osim statičkom opterećenju, izložen i vibracijama.

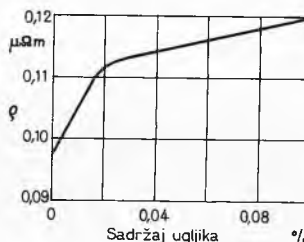
Iako je aluminijum u novije vrijeme zauzeo po tehničkoj važnosti u svijetu drugo mjesto među metalima ispred bakra, u elektrotehnici on nije još ni izda-

leka dosegao važnost koju ima bakar. Koncem pedesetih ili početkom šezdesetih godina ovog stoljeća svjetska potrošnja aluminijuma dosegla je 4,5 Mt i time već tada premašila ukupnu potrošnju bakra. Međutim, potrošnja aluminijuma u elektrotehnici predstavljala je u to doba svega ~ 10% od ukupne potrošnje. Ipak, očekuje se da će potrošnja aluminijuma u elektrotehnici stalno rasti.

Željezo. Čisto se željezo ne upotrebljava kao elektrotehnički materijal, već isključivo čelici (v. *Čelik*, TE 3, str. 43), posebno tzv. kvalitetni i plemeniti konstrukcijski čelici (v. *Čelik*, TE 3, str. 104), i među njima osobito tzv. čelici za žicu.

Za elektrotehniku najzanimljivija tehnička svojstva tih materijala jesu njihova mehanička čvrstoća i tvrdoća, a s ekonomskog stanovišta važna je i njihova niska cijena i vrlo velike raspoložive količine. Temeljni nedostatak koji ograničava upotrebu čelika u tom području jest njihov razmjerno veliki specifični električni otpor, a i okolnost da on ovisi o sadržaju primjesa u čeliku.

Ovisnost specifičnog otpora čelika o sadržaju ugljika u niskougljičnim čelicima prikazana je dijagramom na sl. 30. Odatle se vidi da već pri razmjerno vrlo malim sadržajima ugljika specifični električni otpor čelika dosiže prilično visoke vrijednosti. Kako u tim materijalima dolazi od izražaja skin-efekt, stvarni im je specifični električni otpor izmjeničnoj struji još veći. Dalje sa stanovišta elektrotehnike nepovoljno svoj-



Sl. 30. Ovisnost specifičnog električnog otpora ρ niskougljičnog čelika o sadržaju ugljika

stvo ovih materijala jest njihov razmjerno vrlo velik temperaturni koeficijent specifičnog električnog otpora. Rezultantno djelovanje za elektrotehniku povoljnih i nepovoljnih svojstava ovih materijala može se grubo prikazati podacima u tablici 7.

Tablica 7
NAJVAŽNIJA ELEKTROTEHNIČKA SVOJSTVA ČELIKA ZA ŽICU

Svojstvo	Skupina čelika za žicu			
	Če I	Če II	Če III	Če IV
Čvrstoća pri kidanju, kp/mm ²	42...50	70...85	120...140	150...170
Istezanje pri kidanju, %	~ 20	~ 10	~ 6	~ 6
Tvrdoća HB, kp/mm ²	~110	~195	~350	
Specifična električna vodljivost, Sm/mm ²	7...9	~6,7	~6,5	~6,3
Temperaturni koeficijent elektr. otpora, °C ⁻¹	~0,005	~0,005	~0,005	~0,005

Visokom specifičnom električnom otporu čelika pridružuje se kao nedostatak za primjenu u elektrotehnici i njihova mala otpornost prema koroziji. Čak i na običnim temperaturama oni u prisustvu vlage na zraku brzo rdaju, a brzina tog procesa naglo raste s temperaturom. (U procesu ubrzavanja korozije čeličnih vodiča sudjeluje i vlastito ugrijavanje kao posljedica povećavanja otpora uslijed smanjivanja presjeka korozijom, što pospješuje i veliki temperaturni koeficijent otpora.) Zbog toga se čelični materijali za vodove redovito površinski zaštićuju. Obično za to služi cink, pa čelični materijali za vodove spadaju u skupinu tzv. pocinčanih materijala.

U već opisanim kombiniranim vodičima (alučelu, Aldrey-čeliku) nosilac njihove vodljivosti je aluminijum (ili Aldrey), a njihove čvrstoće čelik. Zbog toga za izbor vrste čelika za izradu tih vodiča njegova vodljivost ima sekundarno značenje, pa se zato upotrebljavaju čelici za žicu kakvoće Če III i Če IV. Ti isti čelici ranije su se mnogo upotrebljavali za telegrafске i telefonske vodove, jer je, zbog malih jakosti struja koje su pri tome kroz njih tekle, njihov električni otpor imao beznačajnu ulogu u usporedbi s njihovom niskom cijenom i dobrim mehaničkim svojstvima. Zbog razvoja bežične telekomunikacijske tehnike i novih materijala, primjena čelika u te svrhe, bez drugih materijala, danas je beznačajna.

Među netom spomenutim materijalima za elektrotehniku najvažnija su užeta izrađena od bakarnih i čeličnih žica (na sličan način kao što su izrađeni vodovi od alučela) i tzv. bimetalni vodiči, sastavljeni od čelične jezgre i bakarne obloge, koja čini bar polovicu ukupne mase vodiča. Proizvode se ili izvlačenjem od prstenastog bakarnog trupca u koji je uljeven čelik, ili kontinualnim elektrolitskim postupkom, pri čemu čelična žica neprekidno prolazi kroz elektrolitsku kupku. Elektrolitskim postupkom dobiveni bimetalni vodiči imaju jednoličniju debljinu bakarne obloge, ali je njen spoj s čeličnom jezgrom slabiji. Specifična električna vodljivost bimetalnih vodiča jest 20 Sm/mm^2 . Vlačna čvrstoća iznosi od 55 do 70 kp/mm^2 . Proizvode se s promjerima do 4 mm. Upotrebljavaju se i u tehnici jake struje. U najnovije vrijeme pojavile su se bimetalne žice sa specifičnom električkom vodljivošću od $38,3 \text{ Sm/mm}^2$. Razvoj tih materijala tek je u začetku, ali uslijed ekonomskih prednosti koje se od primjene takvih materijala očekuje u elektrotehnici, može se pretpostaviti da će se njihova primjena u budućnosti širiti.

Općenito se čelik razmjerno rijetko upotrebljava kao samostalni materijal za električne vodove, uglavnom kad se prenose male električne snage na male udaljenosti, ili kad bi, zbog nedovoljne čvrstoće bakra, aluminijuma i njihovih legura, vodovi izrađeni od njih morali imati tolike dimenzije da bi iskorišćenje električnih svojstava tih materijala bilo odviše slabo. U tim slučajevima, kao npr. u privremenim instalacijama na gradilištima, barakama, različitim priključcima i mrežama niskog napon, prvenstveno dolazi za žicu u obzir primjena čelika s boljom vodljivošću (npr. Če I, Če II). (Kao magnetski materijali v. str. 56.)

Natrijum. Odavna su elektrotehnička svojstva natrijuma kao potencijalnog materijala za električne vodove privlačila pažnju. Naime, iako je njegova specifična električna vodljivost na običnim temperaturama svega $20,5 \text{ Sm/mm}^2$, dakle jedva 36% vodljivosti bakra, uslijed njegove izvanredno male specifične mase ($0,971 \text{ g/cm}^3$ na 20°C) vodič od natrijuma ima samo 30% težine bakarnog vodiča iste duljine i istog otpora. Toj velikoj tehničkoj prednosti pridružuju se i jednako velike ekonomske, jer su prirodni izvori natrijuma praktički neiscrpni, a već danas mu je cijena (po težini) manja od polovice cijene bakra.

Međutim, vrlo nepovoljna kemijska svojstva natrijuma i njegova vrlo mala čvrstoća još su uvijek glavna prepreka njegovoj širokoj primjeni u elektrotehnici. Njegov je kemijski afinitet prema kisiku i vodi velik; s kisikom natrijum snažno reagira već kad je izložen djelovanju zraka na običnoj temperaturi, a na 120°C ta je reakcija već toliko burna da se natrijum zapali; vrlo egzotermnom reakcijom natrijuma s vodom nastaje vodik i natrijum-hidroksid (koji je, kao i natrijum-oksidi, vrlo agresivan) i razvija se toliko topline da se vodik već na običnoj temperaturi zapali. Praskavi plin koji pri tome nastaje miješanjem vodika sa zrakom lako eksplodira.

Zbog nepovoljnih mehaničkih svojstava, natrijum kao materijal za vodove dolazi u obzir samo u izradi kabela, a zbog nepovoljnih kemijskih svojstava vodiči u vodovima moraju biti potpuno izolirani od svakog dodira s okolišnim zrakom. Za tu izolaciju upotrebljavaju se danas metalne ili polietilenske cijevi. Ali time se ne mogu izbjeći problemi koji su zbog reaktivnosti natrijuma uvijek povezani sa spajanjem tih kabela i održavanjem izvedenih priključaka. Razmjerno vrlo nisko talište natrijuma ($97,83^\circ\text{C}$) i dovoljno velika njegova latentna toplina taljenja ($27,2 \text{ cal/g}$) povoljni su u slučaju kratkog spoja u vodu, jer se toplina koja se pri tom razvija troši na taljenje natrijuma, te se porast temperature kroz stanovito vrijeme zaustavi u području tako niske temperature da se ne oštećuje izolacija. Dalje je povoljno svojstvo vodiča od natrijuma osobito dobar spoj između natrijuma i izolacije, zbog čega oni nisu skloni nastajanju korone (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 684); posebna zaštita od korone stoga nije potrebna.

Primjena natrijuma kao materijala za vodove danas je još uvijek ograničena na specijalne slučajeve (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 235).

Otporski materijali

Općenito se pod otporskim materijalima u elektrotehnici razumijevaju tvari sa specifičnim električnim otporom između 0.2

i $1,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Kako je specifični električni otpor metalnih elemenata manji od toga, kao metalni su otporski materijali prvenstveno zanimljive legure. (Neki metalni elementi dolaze u obzir za upotrebu kao otporski materijali u specijalnim slučajevima gdje je primjena legura s visokim specifičnim otporom iz nekih razloga nemoguća. U drugim specijalnim slučajevima za otporske materijale upotrebljavaju se i neke nemetalne tvari s karakterom poluvodiča.)

Da bi se što uspješnije mogli upotrijebiti za otpornike, od otporskih materijala traži se, uz veliki specifični električni otpor, još i niz drugih svojstava. Najvažnija od njih su mali temperaturni koeficijent specifičnog električnog otpora, mala termo-elektromotorna sila (TEMS) prema bakru, postojanost bitnih svojstava u uvjetima rada, uključivši i kemijsku postojanost na radnim temperaturama, te tehnološka svojstva koja dolaze do izražaja u obradi. Osim tih svojstava, za elektrotehniku važni su također koeficijent toplinskog rastezanja, najviša dopuštena radna temperatura, specifična masa, čvrstoća i rastezljivost otporskih materijala.

Specifični električni otpor otporskih materijala i njegov temperaturni koeficijent ovisni su o sastavu. Već mali dodaci legirajućih elemenata osnovnom metalu povećavaju specifični otpor, i, po pravilu, smanjuju njegov temperaturni koeficijent. To vrijedi osobito za homogene legure, u kojima njihovi sastojci tvore kristale mješance. Kad legure, uslijed odvojene kristalizacije njihovih sastojaka, predstavljaju heterogene sustave, ta je pojava manje izrazita.

Otporski materijali mogu se dijeliti prema njihovim svojstvima, ali u elektrotehnici više je uobičajena njihova podjela na temelju područja upotrebe, tj. na materijale za opće i regulacijske otpornike, za precizne otpornike i za žarne elemente.

Materijali za opće i regulacijske otpornike. Među ovim materijalima najvažnije su neke legure kojima je temeljni sastojak bakar. Neke legure srebra specijalni su materijali u ovoj skupini.

Legure bakra koje pripadaju ovoj skupini dijele se obično na legure s niklom kao glavnim legirajućim sastojkom i neke od legura iz skupine tzv. novog srebra (v. *Bakar*, TE 1, str. 660). Među prvim najpoznatiji jest *konstantan*, sa sastavom: 54% Cu, 45% Ni i 1% Mn. Njegov specifični električni otpor na 20°C je $0,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, a temperaturni koeficijent otpora $-3 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$. Osim tih svojstava, za primjenu konstantana važna su i njegova razmjerno velika čvrstoća ($40 \dots 50 \text{ kp/mm}^2$), rastezljivost (istezanje pri kidanju mu je $30 \dots 50\%$) i kemijska postojanost na temperaturama do 400°C . Sve ga to čini materijalom prikladnim za otpornike za temperaturnu kompenzaciju bakarnih otpornika, za izradu predotpornika i otpornika tehničkih mjernih i starter-skih uređaja. Zbog njegove razmjerno velike TEMS ($40 \mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$), neprikladan je za precizne otpornike. (To se njegovo svojstvo iskorištava, međutim, u izradi termoelemenata.)

S povećanjem temperature iznad navedene, konstantan se sve brže oksidira. Ipak, do tog područja temperature tanki sloj oksida na površini žica od konstantana je koristan, jer djeluje kao izolator, te omogućava gusto namatanje kadgod radni napon ne prelazi 1 V po zavoju. Zbog toga se žice od konstantana umjetno oksidiraju izlaganjem kratkotrajnom djelovanju zraka na temperaturama od 900°C , koje se postižu grijanjem strujom.

Sastav legura iz skupine *novog srebra* iznosi u granicama od 54 do 60% Cu, 17 do 26% Ni i 20 do 23% Zn. Nekima od njih nadijevaju se posebna imena (npr. nikelin, argantan). One su, dakako, jeftinije od konstantana. Međutim, elektro-tehnička svojstva su im slabija: specifični im je električni otpor u granicama od 0,3 do $0,4 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, a temperaturni koeficijent njihova specifičnog otpora oko $0,3 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$. Zbog toga se upotrebljavaju kad se ne postavljaju veliki zahtjevi u pogledu kvaliteta.

Glavni legirajući sastojak *legura srebra* iz ove skupine jest mangan. Većina njih sadrži uz to i kositar. Za elektrotehniku najzanimljivije je svojstvo većine ovih legura njihov negativni temperaturni koeficijent električnog otpora, zbog čega se upotrebljavaju za kompenzaciju djelovanja temperature na otpornike regulacijskih i mjernih instrumenata. U nekim drugim slučajevima zanimljiva je njihova otpornost prema korozijskom djelovanju, npr. kiselina, amonijaka, slane vode.

Materijali za precizne otpornike. I ovu skupinu elektrotehničkih otporskih materijala čine određene legure bakra. Nji-

hov je glavni legirajući element mangan. Uz to one sadrže i male količine nikla ili aluminijuma, ili aluminijuma i željeza. Najvažniji od tih materijala je *manganin* sa sastavom 86% Cu, 12% Mn i 2% Ni. Njegov specifični električni otpor je $0,43 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$, a maksimalna dopuštena radna temperatura 400°C . Međutim, njegova za elektrotehniku najzanimljivija svojstva su vrlo mali temperaturni koeficijent električnog otpora od $1 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ i vrlo mala TEMS od $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Ostali važni materijali iz ove skupine su *izabelin* i *novokonstantan*. Sastav izabelina je 84% Cu, 13% Mn i 3% Al, njegov specifični električni otpor je $0,5 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$, temperaturni koeficijent električnog otpora $2 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$, TEMS $0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, a maksimalno dopuštena radna temperatura 400°C . Sastav novokonstantana je sličan, samo što sadrži još i željeza i aluminijuma (82,5% Cu, 13,5% Mn, 1% Fe, 3% Al). Svojstva su mu također slična svojstvima izabelina.

Ovakva svojstva materijala za precizne otpornike čine ih prikladnima za izradu šantova, predotpornika i točnih otpornika mjernih i regulacijskih uređaja. Zbog svog izvanredno malog koeficijenta električnog otpora manganin je glavni materijal za standarde otpora u metrologiji.

Materijali za žarne elemente. Visoke radne temperature žarnih elemenata (u prvom redu za električne peći) ubrzavaju ne samo kemijske procese na njihovoj površini, već i procese pri kojima se mijenja unutrašnja struktura materijala od kojeg su građeni. Ti se procesi, osim toga, ubrzavaju i mehaničkim naprezanjima koja nastaju uslijed toga što su ti elementi gotovo uvijek izloženi promjenama temperature. Zbog toga se uz veliki specifični električni otpor od ovih materijala traži i velika otpornost prema koroziji, mala sklonost rekristalizaciji i što manji toplinski koeficijent rastezanja. Međutim, čak ni metalni materijali koji imaju ta svojstva u najvećoj mjeri ne mogu zadovoljiti na krajnje visokim temperaturama koje dolaze u obzir u praksi. (U krajnjem slučaju primjena im je ograničena njihovim talištem, ali redovito je najviša dopuštena radna temperatura, iznad koje oni gube upotrebna svojstva, znatno niža od tališta.) Tada se pribjegava upotrebi metalnih materijala za žarne elemente, koji se izdvajaju kao posebna podskupina.

Metalni materijali za žarne elemente. Od različitih kemijskih agensa koji, već prema radnoj temperaturi žarnih elemenata, mogu biti manje ili više agresivni prema materijalu najčešći je svakako kisik iz zraka. On već na razmjerno niskim temperaturama oksidira sve metale koji dolaze u obzir za izradu žarnih elemenata. Izuzetak čine samo neki plemeniti metali, prvenstveno platina. Ona je, međutim, vrlo skupa, pa dolazi u obzir za primjenu samo u vrlo specijalnim slučajevima (v. dalje). Zbog toga se pitanja otpornosti metalnih materijala iz ove skupine svode na svojstva oksida koji nastaju na njihovoj površini. Prvenstveno je pri tome važno da su ti spojevi dovoljno neisparljivi i da je njihov specifični volumen u usporedbi sa specifičnim volumenom metala takav da na površini elementa nastaje neprekinut sloj oksida. Metali čiji su oksidi isparljivi očito ne dolaze u obzir za primjenu kao materijali za žarne elemente, jer se na radnim temperaturama elemenata na njima ne može održati zaštitni sloj. Iz sličnih razloga za žarne elemente ne mogu se upotrijebiti metali kojima oksidi, iako neisparljivi na radnim temperaturama, imaju manji ili mnogo veći specifični volumen nego metal od koga su nastali, pa stoga ne mogu stvarati gust površinski sloj koji sprečava u dovoljnoj mjeri dodir atmosfere s površinom još neoksidiranog metala. Važan je i omjer između koeficijenta toplinskog rastezanja oksida materijala za žarne elemente i metala od kojeg je oksid nastao. Naročito kod materijala za elemente koji se često uklapaju i isklapaju taj omjer mora biti malen da zaštitni sloj ne bi pucao uslijed promjene temperature.

Da se zaštitni uređaji električnih instalacija u koje su uključeni žarni elementi ne bi suviše naprezali u početku rada, kad se ti elementi još nisu dovoljno ugrijali te imaju manji otpor, od materijala iz ove skupine traži se još i da im se specifični električni otpor što manje mijenja s temperaturom.

U proizvodnji žarnih elemenata za normalne svrhe, gdje je uz električna, mehanička i kemijska svojstva važna još i cijena, ti zahtjevi ograničavaju izbor na mali broj materijala. U stvari, uz aluminijum (v. dalje) samo još nikal i krom stvaraju okside

sa zadovoljavajućim svojstvima. Zbog toga su ti metali glavni sastojci legura za žarne elemente. Osim njih, sastojak tih legura često je još i željezo, po pravilu radi povećanja specifičnog električnog otpora.

Općenito se te legure dijele na *legure kroma i nikla* i *legure željeza s kromom i aluminijumom*. Prve se opet dijele na tri podskupine: legure kroma i nikla bez željeza, s malim sadržajem željeza i s velikim sadržajem željeza. Među legurama s malim sadržajem željeza ponekad se posebno izdvajaju legure s malim sadržajem kroma. Sastav i najvažnija svojstva nekih od ovih legura prikazani su u tablici 8.

Tablica 8
SASTAV I NAJVAŽNIJA SVOJSTVA LEGURA ZA ŽARNE ELEMENTE

Sastav	Maksimalna dopuštena radna temperatura °C	Talište °C	Linearni koeficijent topl. rastezanja, $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ na temperaturi, °C			Specifični električni otpor $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ na temperaturi, °C		
			400	600	1000	20	400	1000
80% Ni 20% Cr	1 150		15	16	17	1,05	1,13	1,13
60% Ni 15% Cr ostat. Fe	1 075	1 390	15	16	17	1,11	1,18	1,25
30% Ni 25% Cr ostat. Fe	1 100	1 390	16	17	19	1,04	1,17	1,30
20% Ni 25% Cr ostat. Fe	1 050	1 380	17	18	18	0,82	1,11	1,26
30% Cr 5% Al ostat. Fe	1 250	1 500	12	13	13	1,44	1,45	1,46
20% Cr 5% Al ostat. Fe	1 150	1 500	12	13	13	1,37	1,39	1,43
8% Cr 5% Al ostat. Fe	950	1 500	13	14	14	1,25	1,31	1,44

Već prema tome da li im je sadržaj željeza manji ili veći, struktura ovih legura može biti austenitna ili feritna (v. Čelik, TE 3, str. 49, 52, 55). Neke od njih sadrže i manje količine drugih metala koji im se dodaju za poboljšanje svojstava (npr. 1...2% Mn ili do 7% Mo slitinama kroma i nikla za povećanje otpora). Pojavljuju se pod nizom komercijalnih naziva, među kojima su najčešći Cekas (različite legure kroma i nikla), Megapor (neke legure željeza s kromom i aluminijumom), Kantal (slične legure kojima je dodano još do 3% kobalta).

U specijalnim slučajevima, kad radne temperature prelaze najviše dopuštene, za izradu žarnih elemenata upotrebljavaju se i neki *čisti metali* s visokim talištem (koji se inače zbog svog malog specifičnog električnog otpora prema definiciji ne ubrajaju u otporske materijale). Međutim, ni jedan od njih, osim platine, ne može se upotrijebiti u oksidirajućoj sredini, već se mora zaštititi vakuumom ili reducirajućom atmosferom, kao što je npr. atmosfera vodika ili rasvjetnog plina.

Od ovih materijala najvažniji su volfram i molibden. Prvi je najvažniji materijal za izradu žarnih niti električnih žarulja. Oba su najvažniji materijali vakuumske tehnike. U tom području upotrebljavaju se za izradu elektroda, žarnih niti i drugih konstrukcijskih dijelova elektronike. Za slične svrhe upotrebljava se i tantal, a još i neki drugi metalni elementi (npr. renijum, niobijum) i neke legure ovih metala.

Zbog njenog izvanredno malog afiniteta prema kisiku, metalna platina kao materijal za žarne elemente dolazi u obzir u rijetkim slučajevima gdje su u trajnom pogonu i u snažno oksidirajućoj atmosferi potrebne vrlo visoke radne temperature. Za takve svrhe upotrebljava se i legura platine s rodijumom (platin-rodijum sa 30% Rh).

Nemetalni materijali za žarne elemente. Glavni materijali u izradi žarnih elemenata za krajnje visoke temperature jesu silicijum-karbid i ugljik. Za tu svrhu najzanimljivija svojstva prvoga

su njegova otpornost u različitim sredinama i, u usporedbi s drugim poluvodičima, razmjerno mali specifični električni otpor na visokim temperaturama. (To je posljedica pojave da njegov temperaturni koeficijent električnog otpora poprima pozitivne vrijednosti na vrlo visokim temperaturama i da je ispod tih temperatura negativan.)

Od ugljičnih materijala koji se upotrebljavaju u izradi žarnih elemenata najvažniji je antracit. Međutim, kako se on tokom izrade tih proizvoda pretvara u grafit, u ovom području važna su zapravo (bolja) svojstva grafita: otpornost prema kemijskim utjecajima i razmjerno mali električni otpor uslijed negativnog koeficijenta otpora do prilično visokih temperatura.

Noviji materijal iz skupine nemetalnih materijala za žarne elemente jest molibden-silicid. Osim toga u izradi ovih elemenata upotrebljavaju se i druge tvari (npr. silicijum, veziva). Ta izrada obuhvaća obično miješanje sastojaka s vezivom, oblikovanje presanjem (obično su proizvodi šipke, štapovi), pečenje i posrebrivanje krajeva. Pri tome nastali materijali nazivaju se najčešće silitom, globarom, kvarcilitom, elektrografitom, već prema sastavu smjese. Zajednički veliki nedostatak svih tih materijala jesu njihova vrlo loša mehanička svojstva. *Silit* je smjesa silicijuma, grafita i silicijum-karbida. Specifični mu električni otpor iznosi od 1000 do 6000 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Temperaturni koeficijent otpora mu je negativan sve do 900 °C. Maksimalna dopuštena radna temperatura za silit je 1450 °C. Iznad toga on oksidira. *Globar* je sličnog sastava. Specifični električni otpor mu je 1000 do 2000 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Njegov temperaturni koeficijent električnog otpora stalan je do 500 °C. Najviša dopuštena trajna radna temperatura globara je 1500 °C, ali kroz kratko vrijeme može podnijeti i 1650 °C. *Kvarcilit* se sastoji samo od silicijum-karbida. Specifični električni otpor mu je od 1100 do 1500 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, a najviša dopuštena radna temperatura 1450 °C. Postojan je prema djelovanju alkalija, ugljika, dušika, vodika, sumpornih spojeva, ali na zraku brzo se oksidira. *Elektrografit* se dobiva žarenjem smjese od 60 dijelova pijeska i 40 dijelova antracita samljevenog u prah na temperaturi od 2700 °C. Specifični mu električni otpor iznosi od 6 do 12 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Njegov temperaturni koeficijent električnog otpora negativan je ispod 500 °C, a najviša dopuštena radna temperatura mu je 2500 °C. *Molibden-silicid* je danas najperspektivniji materijal za izradu žarnih elemenata. Smije se upotrijebiti do radnih temperatura od 1600 °C.

Materijali za kontakte

Pod ovim nazivom razumijevaju se u elektrotehnici materijali koji služe za izradu onih dijelova električnih sklopnih aparata kojima se neposredno uspostavlja, održava i prekida električni kontakt (v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 115). Na svojstva ovih materijala postavljaju se, dakako, zahtjevi usko povezani sa zahtjevima koji se postavljaju na svojstva kontakata (v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 116).

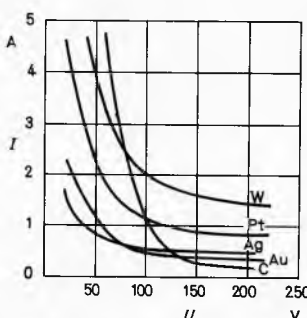
Kontakata ima mnogo različitih vrsta i svaka od njih zahtijeva neka posebna svojstva materijala od kojeg se pravi. Nema materijala koji bi u svakom pojedinom slučaju zadovoljavali sve zahtjeve, stoga se redovito pribjegava prihvatljivim kompromisnim rješenjima upotrebom materijala s prikladnim važnijim svojstvima na račun drugih manje važnih. Obično je pri tome najvažnije da se osigura mali kontaktni (prijelazni) otpor, otpornost prema posljedicama djelovanja kontaktnog napona i struje te utjecajima okoline, i da se zadovolje stanoviti mehanički zahtjevi.

Za zadovoljenje prvoga od tih zahtjeva najvažnije je mjerodavno svojstvo materijala za kontakte njihov specifični električni otpor. Ne samo što on mora biti prikladno malen, već mora takav i ostati, ili se razmjerno vrlo malo mijenjati, pod utjecajem okoline.

Najštetnije posljedice utjecaja radnih napona i struja na materijale za kontakte su elektroerozijski učinci. Pri tome djelovanje elektroerozije na materijale električnih kontakata za vrijeme dok održavaju kontinuitet električnih krugova nije odviše znatno, pa ni u nekim slučajevima kad teče istosmjerna struja, pri čemu se mogu odvijati i elektrokemijski procesi. Zbog toga su za izbor materijala za kontakte s gledišta njihove otpornosti prema djelovanju kontaktnog napona i struje mjerodavni procesi pri uspo-

stavljanju i prekidanju električnih krugova čiji su sastavni dijelovi (v. *Procesi uklapanja i prekidanja struje u članku Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 119). Najopasnije su pojave pri tom električni luk i iskrenje.

Naponi i jakosti struje pri kojima se električni luk pali (gasi) na kontaktima od nekih materijala prikazani su tzv. graničnim krivuljama električnog luka (sl. 31). Očito je s gledišta otpornosti



Sl. 31. Granične krivulje struje i napona električnog luka na kontaktima

nekoj kontakta najpovoljnije da se za njega odabere onaj materijal čija je granična krivulja električnog luka iznad točke u dijagramu koja prikazuje radni napon i jakost struje sklopnog aparata čiji je dio, ili, obrnuto, da se te veličine odaberu tako da točka koja ih prikazuje leži ispod granične krivulje. Osim toga, treba voditi računa o tome da dodirne površine u uvjetima rada ne mogu biti sasvim glatke i čiste, pa se stvarni kontaktni napon i struje razlikuju od idealnih.

Veće lokalne gustoće struje kao posljedica veće hrapavosti dodirnih površina kontakata općenito pospešuju elektroeroziju. Pri isklapanju one su uzrokom visokim temperaturama pri kojima nastupa isparavanje i izgaranje, dakle gubitak materijala, a pri uklapanju mogu izazvati svarivanje. Vjerojatnost svarivanja je to veća što su specifični električni otpor i tvrdoća materijala kontakata veći i što im je talište niže.

Zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava materijala kontakata različiti su prema vrsti sklopnih aparata čiji su dijelovi. Pri tome od slučaja do slučaja prevladavaju zahtjevi u pogledu čvrstoće pri tlačnim, kliznim, udarnim i drugim naprezanjima ili, posebno kod kliznih kontakata, u pogledu tvrdoće. Važno mehaničko svojstvo materijala za kontakte u nekim je slučajevima i otpornost prema djelovanju čimilaca koji uzrokuju deformacije kontakata.

Od utjecaja okoline štetnih za materijale kontakata najčešće je djelovanje atmosfere. Na prvom mjestu su to oksidacijsko djelovanje kisika iz zraka i reakcije materijala kontakata sa sumporovodikom, prisutnim u atmosferi u malim količinama. Ti procesi ne samo što povećavaju kontaktni otpor stvaranjem površinskih filmova s velikim specifičnim električnim otporom, već uzrokuju i koroziju. Vlažnost atmosfere pospešuje ove procese to više što je veća. I pare organskih tvari u atmosferi uzrokuju trošenje materijala kontakata. One se, naime, adsorbiraju na dodirnim površinama i na njima se rastvaraju pod utjecajem električnog izbijanja; nastali ugljik smanjuje graničnu struju isklapanja. Zbog toga se utjecajnost atmosfere na električne kontakte stupnjuje s obzirom na sadržaj tih tvari od 0 (atmosfera bez utjecaja) do 4 (s vrlo jakim utjecajem).

Za termička naprezanja materijala kontakata (v. u navedenom članku, str. 118) od njihovih svojstava najvažnija je toplinska vodljivost. Ona mora biti što veća.

Ponekad se kao materijali za kontakte mogu uspješno upotrijebiti neki čisti metalni elementi, u prvom redu plemeniti metali (srebro i platinski metali, a i zlato), zatim oni koji se odlikuju velikom tvrdoćom, poglavito volfram, molibden i nikal, a za određene svrhe i bakar. Međutim, najčešće se prikladna svojstva materijala za kontakte mogu postići samo kombiniranjem svojstava metalnih elemenata, pa i njihovih spojeva, obično izradom legura ili njima srodnih proizvoda. To su sinterovani materijali, bilo kompaktni bilo porozni i natopljeni bakrom ili srebrom. Osim toga, među ove materijale mogu se ubrojiti i platirani i bimetalni materijali, izrađeni od dvaju slojeva s različitim svojstvima.

U elektrotehnici se ovi materijali klasificiraju prema vrsti opterećenja kontakata čijoj su izradi namijenjeni. Obično se pri tome razlikuju materijali za mala, srednja i velika opterećenja. Nemetalni materijali koji se upotrebljavaju za izradu kliznih kontakata električnih strojeva, tzv. četkice, izdvajaju se kao posebna skupina.

Materijali za kontakte za mala opterećenja. Materijali iz ove skupine služe za izradu kontakata u tehnici slabe struje (npr. mjernih i regulacijskih instrumenata, releja telekomunikacijskih aparata i uređaja). Njihovi radni naponi redovito su manji od naponâ pri kojima može nastati električni luk (ispod tzv. najmanjeg napona luka, koji za različite materijale leži u području od 12 do 22 V; v. sl. 31), a kontaktni tlak im doseže veličine od svega 20 p. Pod običnim prilikama za te svrhe zadovoljava srebro. Njegov glavni nedostatak u ovoj primjeni jest njegova sklonost stvaranju površinskih filmova (naročito od sulfida) koji povećavaju kontaktni otpor i čine ga to manje postojećim što je frekvencija sklapanja veća. Tamo gdje to smeta mogu se često uspješno upotrijebiti pozlaćeno, platinirano ili kojim drugim platinskim metalom platinirano srebro (pa čak i bakar). Tamo, pak, gdje se traži potpuna kemijska postojanost za materijale kontakata ovih uređaja, dolaze u obzir samo platina i platinski metali, zlato (rijetko samostalno, jer su mu mehanička svojstva loša) i njihove legure, koje mogu sadržavati i druge metale, npr. nikal i volfram. Legure platine s volframom prikladni su materijal i za one klizne kontakte iz ove skupine koji uz zahtjeve u pogledu kemijske postojanosti moraju zadovoljavati i zahtjeve u pogledu tvrdoće. Za tu svrhu također se upotrebljavaju i drugi materijali, npr. rodijum, srebro, srebro-grafit.

Materijali za kontakte za srednja opterećenja. Materijali iz ove skupine služe za izradu kontakata i uređaja koji rade pod još uvijek umjerenim uvjetima (u području nazivnih struja do 20 A, nazivnih napona, već prema jakosti struje, do 660 V, i radnim tlakovima do 50 p), kao što su npr. motorske sklopke, zaštitni uređaji. U nekim slučajevima zahtjeve u ovom području zadovoljavaju fino srebro ili posrebrjeni tvrdi materijali. Najviše se, međutim, upotrebljavaju legure srebra s kadmijumom, bakrom, niklom, ili silicijumom. Najkvalitetniji su materijali iz ove skupine legure srebra s volframom ili molibdenom, pa legure srebra s paladijumom, niklom i sinterovani ili platinirani materijali od tih komponenata. Neki od tih materijala sadrže i bakar. Ovaj se ponekad (npr. u kliznim kontaktima koji rade pri jačim strujama) upotrebljava i samostalno.

Materijali za kontakte za velika opterećenja. U ove materijale ubrajaju se oni koji su namijenjeni izradi kontakata za rad pod visokim naponima, sa strujama jačim od 20 A i radnim tlakovima do 10 kp, npr. u uljnim sklopkama. Pod tim uvjetima primjenljivi su samo teško svarljivi metali s visokim talištima i vrelitima, otporni prema naganjanju. Najprikladniji su za to sinterovani materijali. Većina njih sadrži srebro kao glavni sastojak (legure srebra) ili bar u velikoj količini. Legure srebra sadrže kao legirajuće elemente nikal ili grafit, ili okside (kadmijuma ili kositra). Takvi materijali mogu se proizvesti i oksidacijom legura srebra s kadmijumom ili kositrom. Legure sa srebrom kao legirajućim elementom jesu legure volframa (70...90% W). Jednako su važne u ovoj skupini i legure volframa s bakrom. Volfram je također materijal skeleta koji se za te svrhe izrađuje sinterovanjem i natapa rastaljenim metalima. Sastav na taj način izrađenih materijala jednak je sastavu ostalih sinterovanih proizvoda od volframa i srebra ili bakra.

Materijali za četkice najvažniji su materijali za klizne kontakte. Od njih izrađeni proizvodi upotrebljavaju se kao klizni dio kolektorskih električnih strojeva koji klize po bakru ili nekoj njegovoj leguri. Ovi materijali izrađuju se najčešće od ugljika. On je za to naročito pogodan jer sklapa bez luka pod nižim naponima, njegovi su oksidi plinovi, pa stoga na površinama od njega izrađenih kontakata ne nastaju izolirajući oksidni slojevi, vrlo je postojan prema kemijskim utjecajima i promjenama temperature, ima veliku toplinsku vodljivost i, zbog tzv. samopodmazivanja, dobra klizna svojstva.

Najpoznatiji materijali na bazi ugljika od kojih su građeni klizni kontakti su ugljen, grafit, elektrografit i metalografit. Ugljene i elektrografitne četkice izrađuju se od prirodnih amorfnih ugljičnih materijala različite tvrdoće. Nakon oblikovanja, radi dobivanja elektrografitnih četkica materijal se još i na visokoj temperaturi pretvara u grafit. Elektrografitne se četkice najviše upotrebljavaju u istosmjernim električnim strojevima i uzbudnicima turbogeneratorâ. Grafitne četkice izrađuju se od prirodnog

grafita i mekše su od ugljenih. Prirodni grafit temeljna je tvar i metalografitnih četkica; drugi njihov sastojak je prah elektrolitske mjedi. Najvažnija upotrebna svojstva ovih četkica prikazana su u tablici 9.

Tablica 9
NAJVAŽNIJA SVOJSTVA ČETKICA KLIZNIH KONTAKATA

Vrsta četkica	Dopuštena gustoća struje A/cm ²	Dopuštena obodna brzina m/s	Specifični električni otpor Ω mm ² /m	Koeficijent trenja	Pad napona V
Ugljene	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
Elektrografitne	8...12	40...60	10...65	0,15...0,25	2,0...3,0
Metalografitne	10...25	20...40	0,05...12	0,015...0,15	0,3...1,0

U određenom kolektorskom stroju sve četkice moraju biti iste vrste i istih dimenzija. Pri radu četkica treba voditi računa i o njihovoj temperaturi, jer im s njome raste vodljivost. Ta pojava može uzrokovati poremećaje daljim zagrijavanjem i zbog toga razaranje materijala.

IZOLACIJSKI MATERIJALI

Elektrotehnički izolacijski materijali su tvari male električne vodljivosti koje služe za izradu električnih izolacija i izolacijskih konstrukcijskih elemenata električnih uređaja. Njima je svrha da održe električnu struju unutar granica vodiča te time spriječe gubitak električne energije iz njih i zaštite ljude u njihovoj okolini. Pojam električnog izolacijskog materijala uži je od pojma *nevodniča* ili *izolatora* utoliko što se svi nevodiči ili izolatori ne upotrebljavaju za izradu izolacija.

Riječi «izolacija» i «izolator» upotrebljavaju se i s drukčijim značenjima od upravo navedenih: npr. prva riječ za «proces izoliranja» i «stanje izoliranosti» nekog izolacijskog sistema a druga za konstrukcijski element električnog stroja, uređaja ili voda na koji se učvršćuje vodič.

Izolacijski materijali se nazivaju i *dielektrici*. Strogo uzevši, pojam izolatora ne pokriva se potpuno s pojmom dielektrika. I nesposobnost vođenja struje (karakteristična za izolatore) i sposobnost održavanja električnog polja s minimalnim gubicima snage (karakteristična za dielektrike) obje su u vezi s odsutnošću slobodnih elektrona, pa su stoga po pravilu izolatori istodobno i dielektrici, i obrnuto, ali ima (nenormalnih) situacija u kojima ta identičnost ne postoji. Najpravičnije će biti da se govori o dielektriku samo kad je riječ o djelovanju izolatora pri održanju električne energije, npr. u kondenzatoru.

Idealni izolator ima beskonačno velik električni otpor, odn. vodljivost jednaku nuli. Budući da svaka tvar sadrži makar i vrlo mali broj slobodnih elektrona, svaki realni izolator ima makar vrlo malu vodljivost, a pogotovo to vrijedi za tehničke izolacijske materijale u kojima su mala onečišćenja i poremećenja strukture uzrok prisutnosti slobodnih elektrona. Prijelaz je od izolatora k poluvodičima i vodičima stoga postepen; praktički se običavaju nazivati izolatorima tvari kojima specifična vodljivost nije veća od 10^{-6} S/m (10^{-12} Sm/mm²). Najbolji izolatori imaju vodljivost oko 10^{-16} S/m.

Za tumačenje ponašanja izolacijskih materijala pod utjecajem električnog polja obično je dovoljno pretpostaviti da su to tvari koje sadrže elementarne električne dipole, bilo uslijed toga što im je molekula nesimetrična (polarne tvari) bilo da takva nesimetrija nastaje u prvobitno simetričnim molekulama (nepolarne tvari, v. *Elektricitet, statički*, TE 3, str. 581).

Nade li se neki nepolarni nevodič u električnom polju jakosti E , ono na unutarnje naboje $\pm q$ njegovih strukturnih elemenata djeluje silom koja se u najjednostavnijem slučaju može prikazati jednakžbom

$$F = \pm q E \quad (10)$$

i time uzrokuje pomicanje njihovih težišta iz ranijeg položaja u suprotnim smjerovima (pozitivnog elementa u smjeru polja, a negativnog u suprotnom smjeru). Time i u nepolarnim izolatorima nastaju dipoli (*polarizacija elektrona*). Na dipole polarnih nevodiča

vanjsko električno polje djeluje osim toga zakretnim momentom

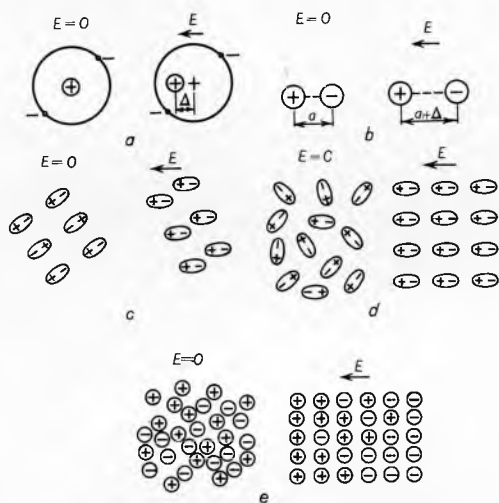
$$m = p E, \quad (11)$$

gdje je p dipolni moment permanentnih elementarnih dipola, tj. umnožak razmaka između težišta suprotnih naboja i iznosa tih naboja. (Ovaj izraz također vrijedi u jednostavnim slučajevima, ali ne u svima.) Moment m teži da dipole orijentira tako da im se pozitivni pol usmjeri u smjeru električnog polja, a negativni u suprotnom smjeru (*dipolna polarizacija*). Pojave polarizacije razlikuju se prema tome da li je polje koje ih uzrokuje statičko ili izmjenično.

Ponašanje izolatora u statičkom električnom polju.

Mehanizam polarizacije ovisan je o silama koje djeluju unutar atoma i molekula i između njih. Već prema jakosti tih sila (a zbog toga i u ovisnosti o temperaturi), konačni učinci polarizacije mogu ili nastupiti vrlo brzo kad se vanjsko električno polje uspostavi i isto tako brzo nestati kad ono prestane djelovati (*trenutna polarizacija*), ili, pak, može biti potrebno stanovito vrijeme, ponekad više sati, da bi ti učinci nastupili i nestali (*relaksacijska polarizacija*). Trenutna polarizacija odvija se kvazielastično, bez utroška energije i zbog toga bez razvijanja topline. Za relaksacijsku polarizaciju, naprotiv, potrebna je energija, i za vrijeme njenog odvijanja razvija se toplina. Posebni su slučajevi trenutne polarizacije nevodila elektronska (atomska) i ionska polarizacija.

Pri *elektronskoj polarizaciji* (sl. 32 a) pomiču se težišta naboja te nastaje vrlo brzo ($\sim 10^{-15}$ s) kvazielastična deformacija elektronske ljuske, a kako na tu pojavu međumolekularne sile nemaju utjecaja, ona se odvija bez gubitaka energije.



Sl. 32. Različiti oblici polarizacije: a elektronska, b ionska, c ionsko-relaksacijska, d dipolno-relaksacijska, e elektronsko-relaksacijska

Ionska polarizacija (sl. 32 b) svojstvena je čvrstim tvarima s ionskom kristalnom rešetkom. Pri tome se također kvazielastično pomiču ioni u molekulama. Ova vrsta polarizacije s porastom temperature postaje intenzivnija, jer pri tome unutarmolekularne sile koje joj se suprotstavljaju postaju sve slabije.

Kod relaksacijske polarizacije dielektrika najčešće se radi o *orijentacijskoj polarizaciji*. Za tu vrstu polarizacije karakteristična je stanovitost tromost dipola u procesima orijentiranja i deorijentiranja pod utjecajem električnog polja i po prestanku njegova djelovanja. Općenito je ta tromost manja pri orijentaciji nego pri deorijentaciji. Omjer između vremena deorijentiranja i vremena orijentiranja pri relaksacijskoj polarizaciji naziva se *vremenom relaksacije*. Najvažniji oblici relaksacijske polarizacije jesu dipolno-relaksacijska, ionsko-relaksacijska i elektronsko-relaksacijska polarizacija. Posebne vrste relaksacijske polarizacije su strukturna i spontana polarizacija.

Ionsko-relaksacijska polarizacija (sl. 32 c) pojavljuje se u tvarima s ionskom rešetkom i slabim međuionskim vezama. Pod utjecajem vanjskog električnog polja premještaju se njihovi ioni u čvorovima rešetke.

Dipolno-relaksacijska polarizacija (sl. 32 d) nastupa orijentiranjem postojećih dipola pod utjecajem električnog polja u polarnim tvarima, čiji su se permanentni dipoli u normalnom, neuzbuđenom stanju prije toga nalazili u kaotičnom toplinskom gibanju i statistički neorijentirani.

Uslijed slabljenja međumolekularnih sila, s porastom temperature i ova vrsta polarizacije postaje intenzivnija, ali samo do stanovite temperature na kojoj, uslijed sve jačeg toplinskog gibanja, polarizacija počinje slabiti s daljim porastom temperature. Dipolno-relaksacijska polarizacija pojavljuje se u čvrstim polarnim organskim tvarima, pa i takvim čije molekule sadrže polarne radikale (npr. hidroksilnu skupinu — *dipolno-radikalna polarizacija*).

Elektronsko-relaksacijska polarizacija (sl. 32 e) pojavljuje se u tvarima s defektima (poremećajima strukture rešetke) uzrokovanim primjesama, koje pod utjecajem topline postaju izvori slobodnih elektrona ili šupljina. (To su zapravo poluvodiči s električnom vodljivošću manjom od one koja je konvencijom određena kao granica prema izolatorima.) U električnom polju se slobodni nosioci naboja u ovim tvarima pravilno raspoređuju.

Strukturna polarizacija je pojava orijentiranja slobodnih elektrona i iona vodljivih i poluvodljivih primjesa koje uzrokuju nehomogenost dielektrika. Na granicama slojeva slojevitih materijala mogu se pri tome nakupiti naboji od slabo pokretljivih iona. Tada se govori o međuslojnoj ili visokonaponskoj strukturnoj polarizaciji.

Prema jednadžbama (10) i (11) sile i momenti koji uzrokuju polarizaciju jednoznačno i linearno ovise o jakosti vanjskog električnog polja. Međutim, postoje vrste relaksacijske polarizacije za koje te jednadžbe ne vrijede. U nekim tvarima, naime, postoje stanovit područja (domene) koja se u cijelosti ponašaju kao električni dipoli. Iako se, zbog statističkog rasporeda dipolnih momenata tih područja, te tvari vladaju kao električno neutralni sustavi, one su ipak spontano polarizirane (*spontana polarizacija*). Kada te tvari dospiju u električno polje, one se kao cjelina naročito snažno polariziraju, ali samo do određene granice, polarizacije zasićenja. Ovisnost te polarizacije o jakosti vanjskog električnog polja nije ni linearna ni jednoznačna, već ima više karakter histereze. Pri tome se, analogno magnetskoj remanenciji permanentnih magneta, pojavljuje električna remanencija, i za poništenje remanencijske električne indukcije potrebno je vanjsko električno koercitivno polje suprotnog smjera. Zbog analogije ove pojave s feromagnetizmom, ona se naziva *feroelektricitetom*, a tvari u kojima prevladava, feroelektričnim (*feroelektrici*). Kao i feromagnetizam tako se i feroelektricitet pojavljuje samo ispod nekih, za određene tvari karakterističnih temperatura, koje se zbog toga nazivaju feroelektričnim Curieovim temperaturama. (Obično se također označavaju sa T_c .)

Prvi put je feroelektricitet zapažen u kalijum-natrijum-tartaratu, tzv. Seignetteovoj soli, zbog čega se ponekad feroelektrici nazivaju i senjetelektrici. Kasnije je feroelektricitet zamijećen i u primarnom kalijum-fosfatu i arsenatu i nizu drugih tvari. Najvažniji feroelektrični materijali su danas keramičke mase na bazi titanata (v. dalje).

Dielektričnost feroelektrika, analogno magnetskom permeabilitetu feromagnetika, može poprimiti vrlo visoke vrijednosti (do $\epsilon_r = 10^4$). I temperaturna ovisnost dielektričnosti feroelektrika izražena je jednadžbom sličnom Curie-Weisssovoj za feromagnetike: $\epsilon_r = k(T - T_c)$.

Analogija feroelektriciteta s feromagnetizmom očituje se još i jakim piezoelektričnim efektom u feroelektricima, slično kao što je magnetostrikcija svojstvena feromagnetima. Kao što pri magnetostrikciji postoji uzročna veza magnetskih i mehaničkih pojava, tako se i u kristalima feroelektrika pojavljuje električna polarizacija pod utjecajem mehaničkih naprezanja i, obrnuto, deformacije kristala pri njihovoj polarizaciji. Pri tome vrsta naboja ovisi o smjeru naprezanja, odnosno, način deformacije o vrsti polarizacijskog naboja.

Stvarni mehanizam polarizacije u nekom izolacijskom materijalu vrlo je složen, jer se u većini nevodila istodobno pojavljuje više oblika polarizacije. Predoče li se pojedine vrste dielektrične polarizacije kapacitetima (v. *Elektricitet, statički*, TE 3, str. 582), a gubici energije koji nastaju uslijed pojava orijentacijske polarizacije otporima, stanje koje u izolacijskim materijalima uzrokuje složena polarizacija može se prikazati nadomjesnom shemom na sl. 33. Ona se zasniva na činjenici da, pri jednakoj jakosti vanjskog

električnog polja koje djeluje u nekom kondenzatoru, polarizacija dielektrika u prostoru među elektrodama povećava električnu indukciju D (gustoću električnog pomaka) u usporedbi s indukcijom D_0 koja bi na tom mjestu vladala kad bi tu umjesto materije bio vakuum.

Prema jedn. (7) i (8) u članku *Elektricitet, statički*, TE 3, str. 581, električna indukcija je

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

[gdje je E jakost polja, ϵ (apsolutna) dielektričnost, ϵ_r relativna dielektričnost, ϵ_0 električna konstanta tj. dielektričnost vakuum], a prema jedn. (12) i (13) istog članka indukcija je

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_0 E + (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E = \\ &= \epsilon_0 E + \xi \epsilon_0 E = \epsilon_0 E + a E = \\ &= \epsilon_0 E + P. \end{aligned}$$

Indukcija D je, prema tome, proporcionalna jakosti polja (koeficijent proporcionalnosti je dielektričnost ϵ), a sastoji se od jednog dijela $D_0 = \epsilon_0 E$, koji predstavlja indukciju između elektroda kondenzatora među kojima je vakuum, i jednog dijela $P = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E = \xi \epsilon_0 E = a E$, koji predstavlja povećanje indukcije uzrokovano polarizacijom dielektrika među elektrodama (pa se i naziva *polarizacijom* P). Veličina $\xi = \epsilon_r - 1$, koja kaže koliko je polarizacija P veća od električne indukcije u vakuumu, zove se *električna susceptibilnost* (susceptibilitet). I polarizacija P upravo je razmjerna jakosti polja E ; koeficijent proporcionalnosti a zove se *polarizabilnost* ili *konstanta polarizacije*.

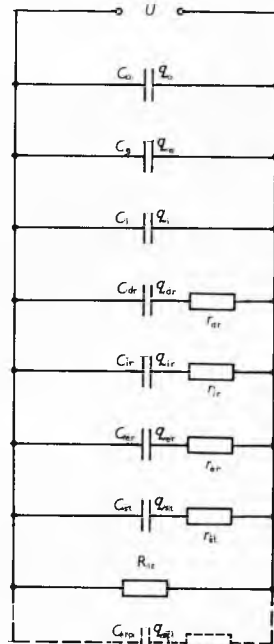
Relativna dielektričnost ϵ_r , električna susceptibilnost ξ i polarizabilnost a materijalne su konstante koje karakteriziraju određeni izolacijski materijal. Ako je poznata jedna od njih, ostale se dvije mogu iz nje izračunati, jer je

$$\begin{aligned} a &= \xi \epsilon_0 = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1), & \xi &= \frac{a}{\epsilon_0} = \epsilon_r - 1, \\ \epsilon_r &= 1 + \xi = 1 + \frac{a}{\epsilon_0}. \end{aligned}$$

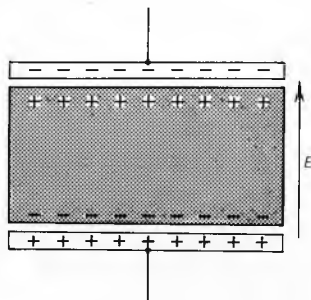
Makroskopski gledani, i polarni i nepolarni izolacijski materijali u odsutnosti djelovanja vanjskog polja električno su uravnoteženi sistemi, jer se utjecaji nabojâ elementarnih čestica poništavaju. Djelovanje električnog polja na izolacijski materijal, npr. kad je on dielektrik u kondenzatoru shematski prikazanom na sl. 34, ima za posljedicu da se on u homogenom polju, makroskopski promatran, ponaša kao električni dipol. Pozitivni naboj tog dipola (ako je S površina presjeka dielektrika okomito na smjer polja) iznosi $+PS$ [usp. u navedenom članku, TE 3, str. 681, jedn. (6)], a negativni naboj $-PS$. Ako je udaljenost među nabojima d , moment tog dipola iznosi

$$\begin{aligned} M &= PS \cdot d = \\ &= S(\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E d = \\ &= (S \epsilon_r \epsilon_0 E - S \epsilon_0 E) d = \\ &= S \epsilon_r \epsilon_0 E \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) d, \end{aligned}$$

ili, budući da je $S \epsilon_r \epsilon_0 E = SD = Q$ (v. na navedenom mjestu):



Sl. 33. Nadomjesna shema djelovanja polarizacije u dielektriku. U Izvor napona, C , q kapacitet i naboj s indeksima: o kada se koristi vakuum kao dielektrikum, e elektronska, i ionska, dr dipolno-relaksacijska, ir ionsko-relaksacijska, er elektronsko-relaksacijska, st strukturna, sp spontana polarizacija; r otpor koji odgovara gubicima kod relaksacijskih polarizacija, R_{12} otpor izolacije



Sl. 34. Raspored naboja u polariziranom dielektriku

$$M = \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) Q d.$$

S obzirom na to da je $Sd = V$, volumen dielektrika, može se polarizacija $P = M/V$ smatrati dipolnim momentom dielektrika po jedinici volumena. Taj se, opet, može smatrati zbrojem efektivnih električnih momenata elementarnih električnih dipola u jedinici volumena. Ako je n_i broj dipola vrste i u jedinici volumena, a m_i efektivni električni moment dipola te vrste, i ako se u materijalu nalazi k vrsta dipola (k oblika polarizacije), bit će

$$P = \sum_{i=1}^k n_i m_i.$$

Efektivni elementarni moment m_i dipola u sklopu dielektrika kao cjeline uzrokovan je vanjskim poljem jakosti E (ovisnim o razlici potencijala i razmaka između ploča kondenzatora) kojemu se superponiraju polje jakosti E_1 koje nastaje polarizacijom okolnih molekula i vlastito polje polarnih molekula, jakosti E_2 . Veličina $E' = E + E_1 + E_2$ zove se *djelujuće polje*, uzrokovano polarizacijom (vlastitom i okolnih molekula) i njoj proporcionalno: $E_u = \gamma P$. Koeficijent proporcionalnosti γ ovisi o kristalnoj strukturi izolatora. Prema H. Lorentzu za kubne je rešetke $\gamma = 1/3 \epsilon_0$; ta se vrijednost običava upotrebljavati za izračunavanje jakosti unutrašnjeg polja svih čvrstih izolatora.

Radi izračunavanja polarizacije prema jednadžbi $P = a E$ može se konstanta polarizacije a smatrati zbrojem konstanti za različite vrste polarizacije:

$$a = a_e + a_i + a_o,$$

gdje indeksi e, i, o znače elektronsku, ionsku i orijentacijsku polarizaciju. Za određivanje tih pojedinačnih konstanti polarizacije predložene su od različitih autora različite jednadžbe. Tako se na osnovi Clausius-Masottijeve jednadžbe za molarnu polarizaciju $P_m = (\epsilon - 1)/(\epsilon + 2) V$ (V je molarni volumen) može izvesti ova jednadžba za konstantu a_e :

$$a_e = \frac{3 \epsilon_0}{N} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2},$$

u kojoj je N Loschmidtov broj (broj molekula u molu tvari).

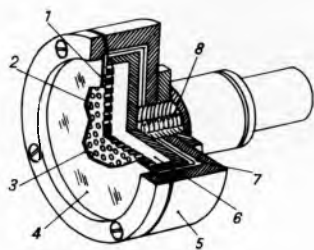
Permanentna polarizacija nevodiča i elektreti. Još potkraj prošlog stoljeća O. Heaviside je, proučavajući piezoelektricitet, zaključio da mogu postojati permanentno električno polarizirani nevodiči, kojima je zbog analogije s magnetima nadjenao naziv elektreti.

Gotovo 30 godina kasnije, Japanac M. Eguchi, ne znajući za Heavisideovu publikaciju, došao je na ideju da za proizvodnju takvih tvari iskoristi razliku koja postoji između polarizabilnosti nevodiča u čvrstom i tekućem stanju zbog veće gibljivosti nosilaca naboja u tekućinama. Konačno je u tome i uspio time što je pustio da taline nekih smola i voskova očvrstnu u snažnom električnom polju. Tako dobivene tvari izvan polja dugo su zadržavale mnoštvo površinskih polarnih naboja bez promjene jakosti ne samo pod normalnim uvjetima već skoro jednako i pod uvjetima koji pogoduju izbijanju, kao što su grijanje plamenom Bunsenovog plamenika, izvrgnuće djelovanju otapala, ozračivanje rendgenskim zrakama, struganje na površini. Što više, tako proizvedeni materijali vladali su se slično kao magneti: komadi dobiveni odsijecanjem od njih pokazivali su jednaku jakost naboja. Eguchi je zaključio da je otkrio novi volumenski efekt i on je te tvari analogne magnetima također nazvao elektretima.

Znanstveno zanimanje za ove Eguchijeve radove pobudeno je tek sredinom tridesetih godina. Od tog vremena do danas proizveden je niz elektreta na bazi prirodnih voskova (npr. pčelinjeg voska, karnauba-voska i njihovih smjesa s kolofonijumom) ili umjetnih organskih tvari. Među posljednjima najzanimljivije su tanke folije od poliuretana i naročito od fluorougljika. S takvim folijama postižu se jakosti polarizacijskog polja do 10kV/cm. Pokazalo se da je trajnost elektreta od fluorougljika praktički neograničena, naročito kada su oni zaslonjeni na površini položenim

elektrodama od metala i kad se čuvaju od vlage i viših temperatura. Unutar prve godine nakon proizvodnje njihov površinski naboj smanjuje se doduše slično kao i površinski naboj drugih elektreta, npr. načinjenih od poliestera, ali, za razliku od ovih, kad istече to vrijeme naboj fluorougličnih elektreta ostaje gotovo konstantan. (Na temelju promatranja tih promjena procijenjena je njihova trajnost na 50 godina.)

Ta svojstva fluorougličnih elektreta učinila su dugo traženu primjenu elektretâ u tehnici ostvarljivom. (Do u suvremeno doba bilo je mnogo prijedloga za upotrebu elektretâ kao izvora napona, npr. za elektrostatičke naprave i naprave za mjerenje zračenja, filtre za zrak, za elektrofotografske sustave.) To je postignuto na području proizvodnje mikrofonskih membrana. Jedna japanska tvrtka već je stavila na tržište mikrofona s membranama od tih materijala. U USA i Kanadi također se mnogo eksperimentira na tom području. Konstrukcija jednog takvog mikrofona prikazana je na sl. 35.



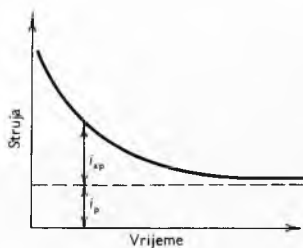
Sl. 35. Elektretski kondenzatorski mikrofoni s fluorougličnom folijom. 1 Sloj zraka, 2 metalna protuelektroda s rupama, 3 metalni sloj na foliji, 4 elektretska folija, 5 metalno kućište, 6 zračni kavitet, 7 električna izolacija, 8 opruženi kontakt

Navedi se da su, uz nezavisnost od vanjskog izvora napona, prednosti ovakvih mikrofona: jednostavna konstrukcija u različitim oblicima i s različitim dimenzijama, niska cijena, mala podložnost smetnjama, neosjetljivost prema vanjskim električnim i magnetskim poljima, vibracijama i trešnji, veći kapacitet i time veća sloboda u iz-

boru pojačala. U praksi su našli primjenu i elektreti od keramike, npr. barijum-titanata dobiveni sličnim postupkom.

Polarizacija i električna vodljivost čvrstih izolacijskih materijala. Pri opisanim pojavama polarizacije čvrstih nevodica troši se energija i ova se stoga pri tom nužno mora apsorbirati izvana. Kako su u procesu polarizacije nosioci energije samo naboji izvana, privođenje te energije materijalu moguće je samo dotjecanjem stanovit električne struje, koja se zbog toga naziva *apsorpcijskom* ili *pomačnom*, a superponira se električnoj ili provodnoj struji koja je posljedica postojanja slobodnih nosilaca naboja i koja se, zbog poprečnog smjera u odnosu prema izolaciji, naziva *poprečnom*.

Zbog opadanja apsorpcijske struje s napredovanjem polarizacije, ukupna struja koja teče kroz neki čvrsti nevodič također opada s vremenom. Karakter te promjene ovisan je prvenstveno o prirodi polarizacije koja se u izolatoru odvija. Pri izrazito dielektričnoj polarizaciji ona se, u skladu s pojavama trenutne polarizacije, također odvija trenutno. Pri pojavama relaksacijske polarizacije, pak, te promjene odvijaju se usporano. U odmaklim fazama takve polarizacije krivulje koje prikazuju taj proces asimptotski teže vrijednosti poprečne struje kao graničnoj vrijednosti (sl. 36).



Sl. 36. Ovisnost jakosti električne struje u izolacijskom materijalu o vremenu. i_{ap} Apsorpcijska struja uslijed polarizacije, i_p poprečna struja

Jakost poprečne struje ovisna je o mehanizmu vodljivosti i o vanjskim uvjetima. Npr. na običnim temperaturama i pod utjecajem vrlo jakih električnih polja ili, obrnuto, na višim temperaturama i pod utjecajem slabijih električnih polja prevladava elektronska vodljivost. Češća je ionska vodljivost izolacijskih materijala; njoj pogoduju, dakako, više temperature. Ako su prisutni ioni slabo vezani za kristalnu rešetku, može se pojaviti znatna ionska vodljivost i na nižim temperaturama i pod utjecajem slabijih vanjskih električnih polja. Jakost apsorpcijske struje u materijalima s dipolnom polarizacijom može biti razmjerno vrlo velika. Općenito, dakle, za razliku od vodljivosti vodiča, električna vodljivost nevodica raste s temperaturom.

Opisane pojave otežavaju definiciju vodljivosti, odnosno poprečnog otpora (R_p) izolacije. Uobičajeno je da se za to uzima vrijednost koja se uspostavlja kad istече jedna minuta od trenutka kad je izolacija dospjela pod napon. Međutim, kako se homogeno

električno polje u izolaciji vrlo sporo uspostavlja, za izračunavanje njenog unutrašnjeg otpora polazi se od formule

$$I = \frac{U - U_p}{R_p},$$

gdje je U pad napona kroz izolaciju, I jakost struje koja kroz nju teče, U_p elektromotorni napon polarizacije, koji se može iz izmjerene jakosti struje i napona u dva različita stanja (1 i 2) izračunati s pomoću jednadžbe

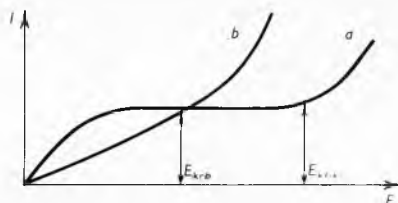
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1 - U_p}{U_2 - U_p}.$$

Zbog bitno različitog mehanizma vođenja električne struje u nevodima, njihov površinski otpor nema direktno fizikalno značenje jer je ovisan osim o svojstvima površine (gustoća, higrofnost i sl.) i o utjecajima okoline (vlaga, nečistoća). Pri mjerenju otpora izolacije «među čepovima», dobivene vrijednosti poprečnog otpora sadrže i površinski otpor.

Otpor izolacije među čepovima (nekad zvan i «otpor u unutrašnjosti») mjeri se između dva metalna čepa umetnuta na udaljenosti od 15 mm u provrte na paralelepipednom uzorku izolacijskog materijala.

Električna vodljivost plinovitih i tekućih nevodica.

Zbog bitno različitog mehanizma nastajanja slobodnih nosilaca električnih naboja i toka električne struje u plinovima (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 672) i tekućinama, utjecaj polarizacije za njihovu vodljivost nema tako važnu ulogu kao u čvrstim vodičima. Ovisnost tog njihovog svojstva o



Sl. 37. Ovisnost jakosti električne struje u plinovitim i tekućim nevodima o jakosti polja a u plinovima, b u tekućinama. I Jakost struje, E jakost polja, E_{kr} kritična jakost polja u plinovima, E_{kr} kritična jakost polja u tekućinama

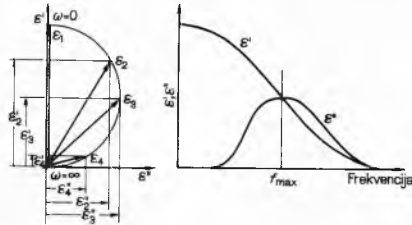
jakosti polja prikazana je u dijagramu na sl. 37 u obliku funkcije $I = f(E)$.

Pri djelovanju slabih električnih polja prijenos nosilaca naboja predstavlja nesamostalno izbijanje, što se očituje u proporcionalnosti između jakosti struje i jakosti polja. Pri daljem jačanju polja jakost struje postaje konstantna zbog toga što se uspostavlja dinamička ravnoteža između povećanja količine naboja predatih u jedinici vremena elektrodama i smanjenja količine naboja koja u plinu nestaje uslijed rekombinacije. Kad jakost električnog polja pređe određenu vrijednost E_{kr} , jakost struje opet počinje rasti s porastom jakosti polja jer se pojavljuje samostalno izbijanje uslijed udarne ionizacije molekula nosiocima naboja, koji u tako jakom polju imaju za to dovoljno veliku energiju.

Vodljivost tekućina koje su nevodici posljedica je ionizacije ili nastajanja drugih vrsta električki nabijenih čestica (kao pri elektroforezi, v. *Elektrokinetičke operacije*, TE 4, str. 398), bilo iz molekula njihove temeljne tvari, bilo iz njihovih primjesa. U područjima jakosti električnog polja ispod njegove kritične vrijednosti E_{kr} , gdje prevladava nesamostalna vodljivost, ovisnost jakosti električne struje u tekućinama linearnog je karaktera (pokorava se Ohmovom zakonu). Iznad te jačine vanjskog polja ona prestaje biti linearna uslijed pojave samostalne vodljivosti uzrokovane ionizacijom.

Polarizacija i ponašanje nevodica u izmjeničnom električnom polju. Kako naboji imaju masu, pri njihovom kvazielastičnom gibanju u dielektriciima u izmjeničnom električnom polju pojavljuju se vlastite mehaničke oscilacije koje se pokoravaju zakonima prinudnog titranja, tj. oscilacije čije amplitude ovise o pobudnoj frekvenciji. Prema P. Debyeu usmjeravanje dipola može se opisati zakonima gibanja čvrstog tijela u viskoznom tekućinama pod utjecajem zakretnog momenta, pa se ne odvija bez efekata tromosti. Iz tih razloga u dielektriciima treba očekivati ovisnost stupnja polarizacije (i time dielektričnosti) o frekvenciji polja koje ju uzrokuje.

Zbog vrlo slabog djelovanja tromosti naboja u nevodičima koji su izloženi djelovanju izmjeničnog električnog polja niske frekvencije, polarizacija slijedi promjene tog polja također bez primjetnog zaostajanja, tj. u fazi je s poljem. Međutim, s porastom frekvencije ta tromost sve više ometa polarizaciju, pa ona sve više zaostaje za poljem. Kvantitativno se to izražava s pomoću kompleksne dielektričnosti (ϵ), koja ima jednu djelatnu (ϵ') i jednu imaginarnu (ϵ'') komponentu, kako je to prikazano dijagramima na sl. 38. Pri tome se djelatna komponenta smanjuje



Sl. 38. Kompleksna dielektričnost kao funkcija frekvencije. ϵ' Djelatna (realna), ϵ'' imaginarna komponenta kompleksne dielektričnosti. Indeksi 1, 2, 3, 4 označavaju vrijednosti tih veličina pri različitim frekvencijama; ω kutna frekvencija, $f_{\max}$ frekvencija pri kojoj nastupa maksimum imaginarne komponente ϵ'' za određeni slučaj polarizacije

sa smanjivanjem stupnja polarizacije, tj. s povećavanjem frekvencije djelujućeg polja. Imaginarna komponenta, koja ne sudjeluje u stvaranju dielektričnosti, ima fazni kut od 90° prema jakosti polja, pa se može pisati

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''.$$

Veličine komponenata ϵ' i ϵ'' ovise o kružnoj frekvenciji ω . Kako pri nekoj vrlo velikoj frekvenciji djelujućeg polja tromost pomicanja naboja u nevodičima potpuno onemogućava polarizaciju, djelatna se komponenta kompleksne dielektričnosti mijenja u ovisnosti o frekvenciji počevši od neke maksimalne vrijednosti (u elektrostatičkom polju) do nule. Imaginarna komponenta kompleksne dielektričnosti, pak, mijenja se između dviju nultih vrijednosti te na nekoj frekvenciji $f_{\max}$, već prema obliku polarizacije i njezinoj veličini, doseže maksimum. Imaginarna komponenta kompleksne dielektričnosti predstavlja stanovitu mjeru za apsorpciju energije koja je potrebna da bi se savladala tromost pomicanja naboja (otpora polarizacije) u unutrašnjosti izolacije.

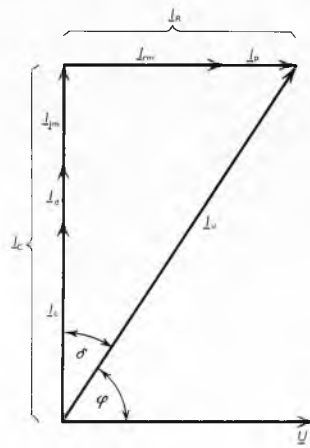
Zbog ovisnosti stupnja polarizacije o temperaturi, djelatna i imaginarna komponenta kompleksne dielektričnosti također su ovisne, dakako, o temperaturi.

Dielektrični gubici. Kod idealnih izolacijskih materijala kod kojih je provodna struja $I_p = 0$, kao mjera za apsorpciju energije koja je potrebna da bi se savladao otpor polarizacije, upotrebljava se kvocijent imaginarne i djelatne komponente kompleksne dielektričnosti:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'},$$

jer se može izraziti s pomoću veličina koje su pristupačnije mjerenju.

Značenje tog kvocijenta zorno je predloženo izravno radnom strujom (I_R) i jalovom strujom (I_C) koje u izmjeničnom polju teku kroz izolaciju, a mogu se rastaviti na komponente apsorpcijske i poprečne struje, kako je prikazano u dijagramu na sl. 39. (Isto se može izvesti i s pomoću tzv. teorije



Sl. 39. Vektorski dijagram struja u polarnom dielektriku u izmjeničnom električnom polju. I_R Radna struja, I_C jalova struja, I_p kapacitativna struja nabijanja izolacije kao kondenzatora, I_d struja elektronske polarizacije, I_m i I_{rm} kapacitivna i djelatna struja orijentacijske polarizacije, I_p provodna (poprečna) struja, I_u ukupna struja, U narinuti napon, φ fazni kut struje prema naponu, δ kut gubitaka

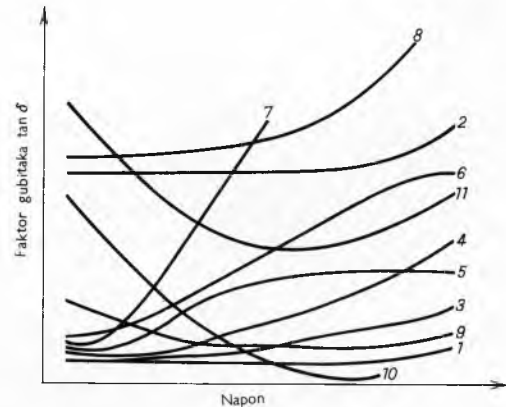
inhomogeniteta, nastale iz predodžbi J. C. Maxwella i K. W. Wagnera o električnom polju u unutrašnjosti nevodiča.) Odatle je

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{I_{rm} + I_p}{I_c + I_d + I_{jm}},$$

a iz tog se može izvesti za praksu prikladan oblik

$$\tan \delta = \frac{\kappa}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r},$$

gdje je κ specifična električna vodljivost izolacije, a f frekvencija djelujućeg polja. Kut δ naziva se kutom *dielektričnih gubitaka*. Kako je kut δ mali i zbog toga $\delta \approx \tan \delta$, tako se često naziva i veličina $\tan \delta$, koja se inače pravilnije naziva *faktor gubitaka*. Kao karakteristika izolacijskih materijala ova veličina treba biti što manja. (Red veličine za najbolje materijale je 10^{-4} .)



Sl. 40. Ovisnost faktora gubitaka različitih izolacijskih materijala o naponu. 1 Kompaktni materijal bez vodljivih sastojina i plinskih uključaka, 2 materijal s velikom vodljivošću uzrokovano primjesama ili vlagom, 3 dopustivo nehomogeni materijal, 4 materijal u kojemu se pojavljuje tinjavo izbijanje uzrokovano uključcima i poljem, 5 materijal u kojemu dolazi do unutrašnjih probioja uzrokovanih plinskim uključcima, 6 materijal u lošem stanju, 7 materijal s poluvodljivim uključcima i karboniziranim dijelovima, 8 vrlo vlažna izolacija (velika vodljivost), 9 složena izolacija s nekim od slojeva izvan utjecaja (i promijenom kapaciteta), 10 izolacija s poluvodljivim uključcima i djelomičnom unutrašnjom karbonizacijom, 11 izolacija slična izolaciji pod 10 nakon starenja

Ponekad se faktor dielektričnih gubitaka izražava kao postotak ($100\% \equiv 1$).

Zbog ovisnosti stupnja polarizacije o jakosti djelujućeg polja i temperature, o tim veličinama također je ovisan i dielektrični kut gubitaka. Ta za praksu važna ovisnost kvalitativno je prikazana krivuljom koje predstavljaju funkcije $\tan \delta = f(U)$ i $\tan \delta = f(T)$ na stalnoj temperaturi, odn. stalnom naponu (sl. 40 i 41).

Struja koja teče izolacijom uzrokuje gubitke električne snage u izoliranim dijelovima. S obzirom na to da je izolacija u cijelosti predloživa kondenzatorom, ti su gubici (dielektrični gubici P_R) određeni izrazom

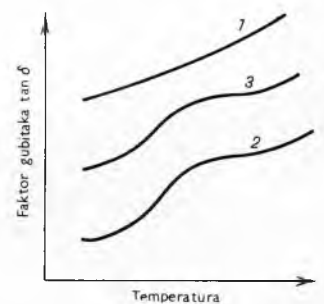
$$\dot{P}_R = P_r + P_p = U^2 G, \quad (12)$$

gdje su P_r gubici uzrokovani relaksacijskim procesima, P_p gubici uzrokovani vođenjem struje, a G tzv. odvod kondenzatora određen jednačbom

$$G = \omega C \tan \delta = \omega \epsilon \frac{A}{d} \tan \delta. \quad (13)$$

Time su onda određeni i specifični gubici snage (gubici u jediničnom volumenu izolacije):

$$\frac{P_R}{V} = p_R = \omega \epsilon \tan \delta \cdot \frac{U^2}{d},$$



Sl. 41. Ovisnost faktora gubitaka različitih izolacijskih materijala o temperaturi. 1 Nepolarni materijali, 2 polarni materijali, 3 materijali s vlastitom vodljivošću i orijentacijskom polarizacijom

kao karakteristika materijala od kojeg je napravljena izolacija. $[V]$ je volumen izolacije, a ϵ apsolutna dielektričnost ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$), U napon između elektroda, d razmak elektroda, a A površina izolatora.]

Umnožak $\epsilon \tan \delta$ koji, prema tome, predstavlja mjeru dielektričkih gubitaka, naziva se *efektivnim faktorom gubitaka*. Budući da se gubici uzrokovani višim harmonijskim članovima ne smiju zanemariti, za proračun izolacije uzima se nadomjesna shema kondenzatora s frekvencijom temeljnog harmonijskog člana. Pri tome treba voditi računa i o tome da se mora ograničiti zagrijavanje izolacije koje uzrokuje djelatna komponenta struje, kako ne bi došlo do toplinskog proboja (v. dalje).

Probojni napon i dielektrična čvrstoća. Granični napon na dielektriku koji je dovoljan da u dielektriku prouzroči električni proboj uslijed naglog gubljenja izolacijskih svojstava naziva se *probojni napon*. Jakost polja pri kojoj to nastupa naziva se *dielektrična čvrstoća*. Obje te veličine važne su karakteristik izolacijskih materijala.

Fizikalno se razlikuju proboji u čvrstim i proboji u tekućim i plinovitim izolacijskim materijalima.

Proboj plinova. Mehanizam električnog izbijanja u plinovima, kojim se objašnjavaju i proboj i sve njegove manifestacije, posebno su opisani u članku *Električno pražnjenje u plinovima* (TE 3, str. 672).

Vrijeme potrebno da se uspostavi proboj plinova vrlo je kratko i to kraće što je veća jakost električnog polja koje uzrokuje proboj. Praktički se proboj uspostavlja trenutno. Međutim, sa skraćivanjem vremena djelovanja polja na plinove povećavaju se njihovi probojni naponi. Za mjeru tog povećavanja služi tzv. *faktor impulsa*

$$k_1 = \frac{U_{pri}}{U_{pro}}$$

gdje je U_{pri} probojni napon u kratko djelujućem polju, a U_{pro} probojni napon u izmjeničnom polju standardne frekvencije (u Evropi 50 Hz).

Probojni napon i način nastupanja proboja plina ovise i o tome da li je djelujuće polje homogeno ili nije. Kad među ravnim pločama kondenzatora, koje su jedna od druge izolirane plinom, jakost homogenog električnog polja dosegne vrijednost temperaturom i tlakom određene dielektrične čvrstoće izolacije, proboj nastupa trenutno. U nehomogenom polju, koje vlada između zakrivljenih ploča kondenzatora (pri čemu je nehomogenost polja to veća, što je radijus zakrivljenosti manji) probojno iskrom prethodi tinjavo izbijanje (korona).

Probojni napon plina ovisan je i o razmaku među elektrodama koje su plinom jedna od druge izolirane. Kako je prikazano dijagramima na sl. 42, pri malim razmacima među elektrodama on je gotovo jednak naponu tinjavog izbijanja. Pri većim razmacima tinjavo izbijanje prethodi probouju.

Opadanje dielektričke čvrstoće plinova s tlakom do stanoovitog minimuma (sl. 43) treba pripisati mehanizmu procesa nastajanja strimera (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 681). Porast dielektrične čvrstoće plinova s daljim opadanjem njihovog tlaka po dosezanju minimuma objašnjiv je olakšavanjem emisije elektrona s površine izoliranih dijelova, pa su dielektrične čvrstoće, osim o veličini podtlaka, ovisne još i o materijalima tih dijelova.

Proboj tekućih nevodiča. Zajedničko svojstvo plinova i tekućina koje ima važnu ulogu u mehanizmu proboja jest gibljivost nosilaca njihovih naboja. Zbog toga, iako je ta gibljivost u tekućinama manja nego u plinovima i u vezi s time (uslijed manjeg slobodnog puta elektrona) probojni napon veći, mehanizam proboja i u jednim i u drugim umnogome je sličan. Ipak, teorije proboja tekućih izolacijskih materijala zapravo nema, jer, s jedne strane, njihova unutrašnja struktura još nije dovoljno poznata, i, s druge strane, te se stvari ne mogu dobiti u dovoljno čistom stanju, pa to jako otežava promatranja. Praktički su u njima uvijek prisutne makar male količine vode, plinova i drugih tvari, koje jako snizuju dielektričnu čvrstoću. Najčešće se te primjese razmjerno lako ioniziraju i time pospešuju procese slične onim procesima ionizacije plinova koji dovode do proboja.

Osim sudjelovanja u ionizacijskom probouju, primjese tekućih izolacijskih materijala mogu biti i uzrokom toplinskog proboja na temperaturama iznad vrelišta, kad stvaraju mjehuriće para, posredstvom kojih se može uspostaviti tzv. plinski most među izoliranim dijelovima. Tada se probojni napon izolacije snizuje na vrijednosti probojnih napona plinova.

Čisti električni proboj tekućih izolacijskih materijala nastupa, kao i kod plinovitih, emisijom elektrona s površine izoliranih dijelova, pri čemu dolazi do razaranja molekula sredstva.

Proboj čvrstih izolacijskih materijala uvijek je povezan s razaranjem njihove molekularne strukture ili samih molekula. Pri tome se najčešće radi o tzv. toplinskom ili elektrotoplinskom probouju. Pod time se razumijeva proboj uzrokovan posljedicama zagrijavanja izolacijskih materijala kao što su taljenje, izgaranje, karbonizacija, deformiranje, nastajanje pukotina.

Toplinski proboj čvrstih izolacijskih materijala u elektrostatičkom polju objašnjava se djelovanjem Jouleove topline koja se razvija pri protjecanju struje kroz izolaciju: ta toplina povisuje temperaturu, što ima za posljedicu povećavanje vodljivosti i protjecanje jače struje, a to opet dalje povisuje temperaturu itd., dok temperatura ne naraste toliko da nastaju promjene izolacijskog materijala koje dovode do proboja. Zbog neravnomjerne raspodjele slobodnih nosilaca naboja u čvrstim izolacijskim materijalima, taj se proces odvija u pojedinim kanalima. Da u kanalu ne bi nastupio toplinski proboj, treba proces međusobnog povećavanja temperature i vodljivosti konačno zaustaviti u nekom stacionarnom stanju u kojem temperatura ne prekoračuje vrijednost određenu postojanošću materijala prema navedenim promjenama. Zato je potrebno da sva toplina koja se u kanalu razvija u stacionarnom stanju prolazi kroz stijenku kanala na okolišni materijal i s njega na okolinu izolacije. Dinamička ravnoteža koja u takvom stacionarnom stanju postoji može se prikazati izrazom

$$Q_R = Q_H, \quad (14)$$

gdje je Q_R količina topline koja se u izolaciji razvija, a Q_H ona koja s nje prelazi u okolinu na graničnoj plohi.

Količina topline koja prolazi kroz graničnu plohu razmjerna je njezinoj površini i razlici između temperaturâ obiju sredina:

$$Q_H = k_1 S(\theta_1 - \theta_0), \quad (15)$$

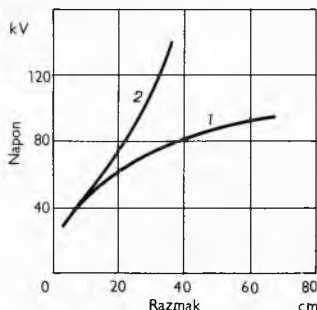
gdje je k_1 koeficijent prolaza topline kroz graničnu plohu, S površina te plohe, θ_0 temperatura okoline, a θ_1 radna temperatura izolacije.

U izmjeničnom električnom polju toplina se u izolaciji razvija još i procesima relaksacijske polarizacije, a kako je ekvivalentna dielektričkim gubicima, uvjet (14) može se, s pomoću jednadžbi (12), (13) i (15), općenito pisati ovako:

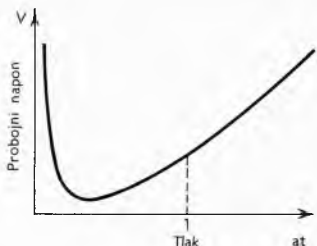
$$U^2 \omega C \tan \delta = k_1 S(\theta_1 - \theta_0).$$

Ako taj uvjet nije ispunjen, temperatura izolacije raste neograničeno, što ima za konačnu posljedicu toplinsko razaranje izolacijskog materijala i toplinski proboj.

Grafički se taj uvjet može predočiti dijagramom na sl. 44. U njemu je toplina koja prelazi s izolacije na okolinu prikazana kao pravac koji ima koeficijent smjera $\tan \alpha = k_1 S$, a siječe os apscisa u točki θ_0 . Taj pravac predstavlja geometrijsko mjesto vrijednosti Q_H na različitim radnim temperaturama izolacije. Temperaturna zavisnost topline razvite u izolaciji, za različite jakosti vanjskog električnog polja, prikazana je krivuljama. Da bi uvjet (14) mogao biti ispunjen, pravac Q_H mora sjeći krivulju Q_R , a sječište se mora nalaziti ispod temperature θ_k na kojoj počinje razaranje tvari.



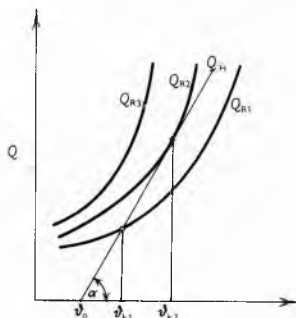
Sl. 42. Ovisnost tinjavog i probojnog napona o razmaku među paralelnim ravnim elektrodama. 1 Tinjavi, 2 probojni napon



Sl. 43. Ovisnost promjene probojnog napona o tlaku plina pri stalnom razmaku elektroda

U protivnom slučaju, npr. kad pravac Q_H samo dodiruje krivulju Q_R ili kad se ona nalazi nad njim, mora se, da bi se ostvarilo stacionarno stanje, izmijeniti neki od faktora radnog režima izolacije

Sl. 44. Uvjet za toplinski proboj čvrstog izolacijskog materijala u homogenom električnom polju. Q Toplina; Q_{R1} , Q_{R2} , Q_{R3} toplina razvijena pri različitim jakostima polja uslijed poprečne struje i uslijed dielektričnih gubitaka; Q_H toplina odvedena hlađenjem, ϑ temperatura, ϑ_0 temperatura okoline (rashladnog medija), ϑ_{K1} i ϑ_{K2} stabilizirana temperatura pri stalnom radu. Dok je mogućnost odvođenja topline veća od topline koja se stvara u izolatoru pri radu (Q_{R1}) ne dolazi do toplinskog proboja, čim je ona manja proboj može nastupiti (Q_{R3})



(npr. napon, frekvencija struje, način hlađenja). Kako su temperature u kanalima više od prosječne radne temperature izolacije, a u praksi nastaju i prekoračenja napona pod kojim se izolacija nalazi, temperature ϑ_K određene iskustvom općenito su niže od onih do kojih bi se moglo doći računom. Dopuslene temperature ugrijavanja izolacije, na osnovi kojih se izolacijski materijali klasificiraju u toplinske klase (v. dalje), još su niže.

Probojni napon čvrstih izolacijskih materijala ovisi, dakle, pri toplinskom probouju o toplinskoj postojanosti tih tvari: što su te tvari osjetljivije prema povišenoj temperaturi to je probojni napon niži, i obrnuto. Zbog toga su probojni naponi anorganskih čvrstih izolacijskih materijala općenito znatno viši od probojnih napona organskih izolatora.

Osim njihove toplinske postojanosti, frekvencije polja, vodljivosti, dielektričnih gubitaka i temperature okoline, na probojni napon čvrstih izolacijskih materijala pri toplinskom probouju utječe i niz drugih čimbenika; on ovisi npr. i o tome da li se izolirani dijelovi nalaze pod naponom trajno ili s prekidima, da li su ciklusi ugrijavanja i hlađenja kraći ili duži, kakvi su uvjeti za vlaženje i hlađenje izolacije, kakav je oblik njene površine, da li je više ili manje porozna i kakav je raspored pora.

Da bi nastao *električni proboj* čvrstih izolacijskih materijala u električnom polju dovoljno jakom za to, potrebno je, općenito, stanovito vrijeme, ali, kao i kod plinova, to vrijeme može biti i vrlo kratko (od 10^{-8} do 10^{-7} s). Teoretski se to objašnjava mehanizmom sličnim mehanizmu električnog proboja plinova. Prema tim tumačenjima udarnu ionizaciju uzrokuju slobodni elektroni koji su pod utjecajem polja postigli stanovitu kritičnu brzinu dovoljnu za otcjepljivanje drugih elektrona pri sudarima s elementarnim česticama kristalne rešetke (teorija udarne ionizacije); osim toga polje uzrokuje unutrašnju emisiju elektrona i bez sudara (teorija unutrašnje emisije). Pri tome se homogeni i nehomogeni izolacijski materijali ponašaju različito.

Općenito su probojni naponi pri električnom probouju homogenih čvrstih izolacijskih materijala jako ovisni o homogenitetu polja. U homogenom polju njihova električna čvrstoća može doseći vrlo visoke vrijednosti (iznad 10^3 kV/mm), a u nehomogenom električnom polju njene su vrijednosti mnogo manje. Osim toga probojni napon izolacije od ovih materijala (kao što su kristali od baznih halogenskih spojeva, neki organski polimeri) mogu se u homogenom polju višestruko povećati povećanjem njene debljine; u nehomogenom polju to je moguće samo u neusporedivo manjoj mjeri (sl. 45).

Budući da je prisustvo uzročnika nehomogenosti, prvenstveno uključaka zraka, u izolacijskim materijalima gotovo neizbježno, ti su materijali najčešće nehomogeni. Takvim izolacijskim nehomogenim materijalima električni je probojni napon daleko manje ovisan o homogenitetu polja nego homogenim (usp. sl. 46 i 45). Što više, postoje materijali kojima je probojni napon u nehomogenom električnom polju viši nego u homogenom.

Osim toplinskog i električnog proboja, u izolaciji može s vremenom nastupiti i *elektrokemijski proboj*. Pri tome se radi o elektrolitskim procesima koji se odvijaju u materijalu pod utjecajem topline, vode, istosmjernje ili izmjenične struje niske frekvencije. Zbog kvalitativnih promjena materijala koje prethode elek-

trokemijskom probouju, te se pojave ponekad nazivaju *starenjem* izolacije. Kako su organski materijali općenito podložni ovim procesima, a u njima su gotovo uvijek prisutni mjehurići plina u kojima se s vremenom nakupljaju vodljive tvari (npr. ozon, dušična kiselina, klorovodična kiselina), kod mnogih izolacija izrađenih od takvog materijala treba računati s mogućnošću da će prije ili kasnije nastati elektrokemijski proboj. Zbog veće otpornosti anorganskih izolacijskih materijala prema ovim utjecajima, elektrokemijski proboj izolacija koje su izrađene od njih mnogo je rjeđa pojava. Uzrokom elektrokemijskog proboja izolacije od čvrstih izolacijskih materijala može biti difuzija materijala izoliranih dijelova u izolacijski materijal.

Toplinska, mehanička i ostala fizikalna svojstva izolacijskih materijala. Osim toplinske postojanosti izolacijskih materijala, za njihovu primjenu važan je i čitav niz drugih njihovih toplinskih svojstva. To su toplinska postojanost oblika od njih izrađenih proizvoda, koeficijent toplinskog istezanja, specifična toplina, toplinska vodljivost, talište, vrelište, kapljište, stinište, plamište i temperatura omekšavanja.

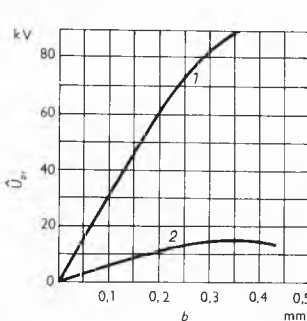
Baza za klasifikaciju izolacijskih materijala prema njihovim *toplinskim svojstvima* jest dopuštena temperatura upotrebe. Na toj bazi izrađena je, na temelju iskustava i ispitivanja, klasifikacija IEC prikazana u tablici 10, koja predstavlja propis. Podaci iz te tablice mjerodavni su za izolaciju električnih strojeva i aparata do maksimalne temperature okoline od 40°C . Maksimalne dopuštene temperature toplinske klase iz prvog stupca tablice 10 ne smiju biti prekoračene na najtoplijem mjestu izolacije.

Za upotrebu izolacijskih materijala važna su ista *mehanička svojstva* koja su važna i za vodiče. Osim toga je za slojevite izolacijske materijale važna još i njihova otpornost prema kalanju, a za vlaknaste još i njihova prekidna duljina (duljina vlakna pri kojoj se ono prekida vlastitom težinom).

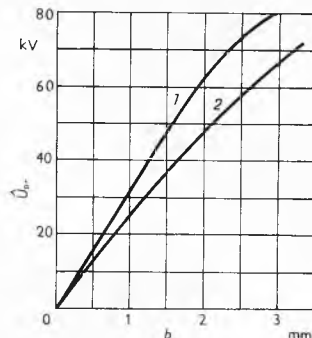
Od *električnih svojstava* izolacijskih materijala (osim već spomenutih) važna je otpornost prema električnom luku i stvaranju kliznih strujnih staza, tj. vodljivih staza na površini među elektrodama pod naponom. (Otpornost prema stvaranju takvih staza kao fizikalno svojstvo nije egzaktno definirana jer klizne strujne staze nastaju potpuno sporadično.)

Od *ostalih fizikalnih svojstava* za upotrebu izolacijskih materijala važan je njihov specifični volumen, porozitet, higroskopnost, dubina prodiranja tekućina, viskozitet, itd.

Kemijska svojstva izolacijskih materijala moraju biti takva da su oni ne samo dovoljno otporni već i da kemijski ne djeluju štetno na dijelove koje izoliraju. Da bi bio zadovoljen prvi od ta dva zahtjeva, izolacijski materijali moraju u prvom redu biti otporni prema promjenama koje nastupaju bez vanjskih utjecaja, starenju izolacije, a očituju se postepenim gubljenjem za izolaciju važnih svojstava. (Naročito to dolazi do izražaja kod umjetnih smola.) Oni moraju također biti dovoljno otporni u uvjetima koji pospješuju starenje, kao što su električno polje, rad na povišenim temperaturama u vlažnoj sredini. Mjera za otpornost izolacijskih materijala prema starenju jest njihova trajnost, određena promjenom dielektrične čvrstoće i mehaničkih svojstava unutar stanovitog vremena.



Sl. 45. Ovisnost probojnog napona homogenog izolacijskog materijala (molibdenskog stakla) o debljini pri električnom probouju na frekvenciji 50 Hz: 1 u homogenom polju, 2 u jako nehomogenom polju; U_{pr} tjemena vrijednost probojnog napona, b debljina izolacije



Sl. 46. Ovisnost probojnog napona nehomogenog izolacijskog materijala o debljini pri električnom probouju na frekvenciji od 50 Hz: 1 u homogenom polju, 2 u jako nehomogenom polju; U_{pr} tjemena vrijednost probojnog napona, b debljina izolacije

Da bi otpornost izolacijskih materijala zadovoljila, oni osim toga moraju u dovoljnoj mjeri odolijevati vanjskim kemijskim utjecajima, kao što su oksidacijsko djelovanje atmosfere, djelovanje različitih tvari kojima ona može biti kontaminirana (npr. djelovanje kiselih para, lužina, soli, otapala, oksidacijskih sredstava). U ovu skupinu utjecaja mogu se ubrojiti i oni kojima izolacija mora odolijevati u određenim specifičnim okolnostima, kao što su posebni klimatski ili pogonski uvjeti. Od izolacijskih materijala zahtijeva se toliki kemijski inaktivitet prema materijalu dijelova koje treba izolirati da na njima ne nastaju promjene (npr. korozija vodiča, razaranje drugih izolacija).

Tablica 10
TOPLINSKA KLASIFIKACIJA IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Toplinska klasa	Izolacijski materijal	Impregnanti i veziva u izolacijama od materijala u koloni 2
1	2	3
Y max. 90 °C	Pamuk, svila, papir, prešana ljepenka, fiber, drvo, prirodna guma, prešani materijali sa celuloznim punilima, polivinilklorid, polistiren, polietilen, poliakrilati	Anilinske, karbamidne i fenolformaldehidne smole
A max. 105 °C	Impregnirani pamuk, svila, papir, prešana ljepenka, fiber, drvo, umjetna guma, prešani materijali sa celuloznim punilima, celulozni acetat i poliesterske folije	Lakovi s vezvom od sušivih ulja i prirodnih i/ili umjetnih smola, fenolformaldehidne i poliesterske smole
E max. 120 °C	Impregnirani pamuk, svila, papir, folije od triacetata celuloze i od poliestera, tvrdi papir i tkivo, prešani materijali sa celuloznim punilima, umjetna guma	Lakovi s vezivom od modificiranih sušivih ulja i umjetnih smola, fenol- i melaminformaldehidne, epoksidne i poliesterske smole, poliuretani
B max. 130 °C	Tinjac u svim oblicima na papiru, letoroidu ili staklenom platnu kao nosiocu, impregnirano i neimpregnirano stakleno i azbestno platno i predivo, prešani materijali s punilima od azbesta, staklastih i drugih mineralnih tvari	Lakovi s vezivom od šelaka, asfalta i kompaundni bitumenski, te s vezivima od modificiranih sušivih ulja i umjetnih smola, alkidne, poliesterske, fenolne, melaminformaldehidne i epoksidne smole, poliuretani
F max. 155 °C	Tinjac u svim oblicima na staklenom ili azbestnom nosiocu, impregnirano i neimpregnirano stakleno i azbestno platno i predivo, prešani materijali sa azbestnim, staklenim i drugim mineralnim punilima	Alkidne, epoksidne i poliesterske smole, poliuretani, silikon-alkidne smole
H max. 180 °C	Tinjac u svim oblicima na staklenom ili azbestnom nosiocu, impregnirano i neimpregnirano stakleno i azbestno platno i predivo, prešani materijal kao za klasu F, silikonska guma (elastomer)	Silikonske smole i lakovi, silikon-elastomer (nevulkaniziran)
C iznad 180 °C	Tinjac u svim oblicima na staklenom ili azbestnom nosiocu s anorganskim vezivima, porculan, steatit, staklo, različni oblici silicijum-dioksida, neimpregnirano ili teflonom impregnirano stakleno i azbestno platno i predivo, teflonski prešani materijali sa staklenim ili azbestnim punilima	Teflon do 250 °C

Da bi se, već prema specifičnim zahtjevima u pojedinim slučajevima, od izolacijskih materijala mogle izradivati izolacije, oni se moraju dati obradivati određenim postupcima. Ti obuhvaćaju postupke hladne i vruće strojne obrade i obrade brizganjem, prešanjem, prosijecanjem, kompaktiziranjem i drugim.

Podjela izolacijskih materijala nailazi na poteškoće zbog njihove fizikalne i kemijske raznorodnosti i zbog raznoličnosti njihove primjene. Kao baza za njihovu klasifikaciju može služiti npr. porijeklo, agregatno stanje, primjena ili toplinska postojanost izolacijskih materijala. Na temelju porijekla oni se dijele na pri-

rodne i umjetne, a na temelju agregatnog stanja na plinovite, tekuće i čvrste. Na temelju primjene izolacijski se materijali dijele na čvrste (one od kojih se izrađuju čvrsti, npr. keramički izolatori), materijale za omatanje (u koje se ubrajaju papir, vlakna, folije, prešani materijali, lakovi) i materijale za ispunjenje prostora među dijelovima koji se izoliraju (kao što su plinovi, ulja, zalivne mase, opet lakovi). I klasifikacija izolacijskih materijala na temelju toplinske otpornosti važna je za njihovu primjenu.

Za opće opisivanje izolacijskih materijala ipak je najprikladnija njihova klasifikacija na temelju kemijskog sastava, pa se ona i ovdje primjenjuje. Prema toj podjeli oni se najprije dijele na anorganske i organske materijale. Pri tome je vrlo teško povući ostru granicu između jednih i drugih, pa se često u anorganske izolacijske materijale klasificiraju i oni koji sadrže također organske sastojke, i obrnuto. Posebno se susreću poteškoće u klasifikaciji organskih izolacijskih materijala, jer su oni često složene smjese. Zbog toga se tome pristupa s različitih stajališta (npr. često na bazi primjene). Čini se da je za tu svrhu najprihvatljivije smatrati organskim izolacijskim materijalima samo temeljne organske izolacijske tvari (v. dalje), a sve ostale svrstati u posebnu skupinu složenih izolacijskih materijala.

Anorganski izolacijski materijali

Broj temeljnih anorganskih izolacijskih materijala razmjerno je vrlo malen. Svi se oni mogu svrstati u svega nekoliko skupina. To su tinjci i azbest (zajedno s nekim njihovim preradevinama), stakla, keramički, oksidni i ostali anorganski izolacijski materijali. Zajednička su im povoljna izolacijska svojstva, velika kemijska otpornost, postojanost prema djelovanju topline i mala higroskopnost. U anorganske izolacijske materijale mogu se ubrojiti i neki plinovi.

Tinjci (liskuni, mika) i njihove preradevine. Za elektrotehniku daleko najvažniji tinjci jesu muskovit (kalijum-aluminijum-hidrosilikat sastava koji odgovara formuli $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ i zbog toga se naziva i kalijumskim tinjcem) i flogopit (kalijum-aluminijum-magnezijum-hidrosilikat sastava koji odgovara formuli $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 12MgO \cdot 12SiO_2 \cdot 2H_2O$ i zato se naziva i magnezijumskim tinjcem). U prirodi su ti minerali manje ili više onečišćeni različitim primjesama, među kojima su najčešće kvarc i glinenci. Te primjese znatno im pogoršavaju elektrotehnička svojstva. Zbog toga se kvalitet tinjaca klasificira prema sadržaju tih primjesa. IEC predviđa 10 razreda kvaliteta na toj bazi. Najčišće vrste tinjaca nalaze se u Indiji; indijska nalazišta tinjaca ujedno su i najvažniji izvori tih sirovina u svijetu. Važna su nalazišta tinjaca također afrička i američka (naročito u USA, Argentini, Peru, Braziliji). Znatna nalazišta tinjaca su i u azijskom dijelu SSSR. Zbog lošeg kvaliteta tinjci iz evropskih nalazišta među kojima i balkanskih, predstavljali su vrijedne sirovine samo za vrijeme rata, kad je uvoz bio otežan.

Za dobivanje i prerađivanje vrlo su važna svojstva tinjaca da kristaliziraju u pločama (sl. 47) i da se lako kalaju. To njihovo svojstvo (posljedica slabih međumolekularnih sila na graničnim površinama kristala) omogućava da se od njih lako proizvedu razmjerno tanke ploče, pa i vrlo tanki listići (s debljinom od 0,01 do 0,03 mm, a ponekad i 0,005 mm). Materijal koji se sastoji od takvih ploča, tzv. blok-tinjc, lako se mehanički čiste. Kako su onečišćenja i defektna mjesta na tim pločama akumulirana na rubovima, postupak čišćenja obično obuhvaća obrezivanje rubova.

Čišćenje tinjaca od inkludiranih primjesa nemoguće je bez razaranja njihove kristalne strukture, koja uvjetuje mnoga od njihovih za elektrotehniku važnih svojstava. Kako se čistoća tinjca očituje bojom ploča, i po ovoj se ocjenjuje njihov kvalitet. Čisti muskovit najvišeg kvaliteta bezbojan je i proziran, ali može biti i bijele, blijedozelene i srebrenaste boje. Flogopit je obično obojen smeđe, zelenkasto ili crvenkasto. Pri gradiranju tinjaca na temelju



Sl. 47. Tinjac

njihove čistoće (boje) razlikuju se, osim »prozirnih«, još tri uzastopno sve lošija kvaliteta tinjaca (»obojeni«, tj. onečišćeni, jače onečišćeni »točkasti« i »tamno-točkasti« do »tamno-obojenih« koji predstavljaju najnečistije vrste).

Sortiranje tinjaca obuhvaća kako razvrstavanje prema čistoći (boji), tako i (unutar svake pojedine od navedene četiri skupine čistoće) po veličini blokova. Danas mjerodavni standard IEC, izveden od nekadašnjeg indijskog, predviđa na toj bazi 8 razreda kvaliteta (tabl. 11). Naročito kad se radi o visokokvalitetnim tinjcima, njihovi se blokovi još režu u ploče pravokutnog oblika, što kasnije olakšava raslojavanje u listiće. Već prema tome koliko je tinjac oplemenjen takvim postupcima, u trgovini se razlikuje

Tablica 11
RAZREDI KAKVOĆE TINJACA

Razred kakvoće		ekstra spec.	specijalna	1	2	3	4	5	6
Površina listića, cm ²	od	315	235	156	97	65	39	19	10
	do	413	314	234	155	96	64	38	18

čišćeni (s obrezanim rubovima), kalibrirani (tinjac sortiran po debljini ploča), rezani i tzv. splitinzi (engl. *splittings*), materijal koji se sastoji od tankih listića s površinom manjom od predviđene za blok-tinjac. Naziv splitting upotrebljava se za usitnjene listiće tinjaca bez obzira na to da li su one dobivene izravno ili kao otpaci od rezanja i kalanja.

Za elektrotehniku važna svojstva muskovita i flogopita prikazana su u tablici 12. Odatle se može zaključiti da muskovit ima općenito znatno bolja izolacijska svojstva od flogopita i da je flogopit bolji izolator samo u području vrlo visokih radnih temperatura. Pri tome treba voditi računa o okolnosti da je temperatura ovisnost električne vodljivosti flogopita znatna tek na visokim temperaturama.

Tinjci su ne samo najstariji poznati izolacijski materijali nego su još uvijek i najvažniji među njima. Ipak, zbog toga što se tinjci gotovo nikako ne mogu obrađivati i što su im čestice razmjerno male, primjena tinjaca kao samostalnih izolacijskih materijala dosta je ograničena. Najvažnija takva njihova primjena je u izradi električnih kondenzatora. Ti uređaji mogu se izraditi od tinjaca već običnim metaliziranjem lica i naličja listića. Međutim, obično su tinjčevi kondenzatori izrađeni od listića i među njima uloženi metalnih folija, stegnutih zakovanim ili vijcima spojenim tlačnim pločama, a oklopljeni zaštitnim kućištem iz kojega su izvedeni priključci. Takvi kondenzatori najviše se upotrebljavaju u visokofrekvencijskoj i mjernoj tehnici. Za te svrhe tinjci moraju biti vrlo čisti.

Osim toga, čisti, kalibrirani tinjci upotrebljavaju se i u vakuumskoj električnoj tehnici za držače elektroda (npr. u elektronkama, tiratronima, za učvršćenje grijanih katoda), za izradu zaštitnih

Tablica 12
ZA ELEKTROTEHNIKU VAŽNA SVOJSTVA TINJACA

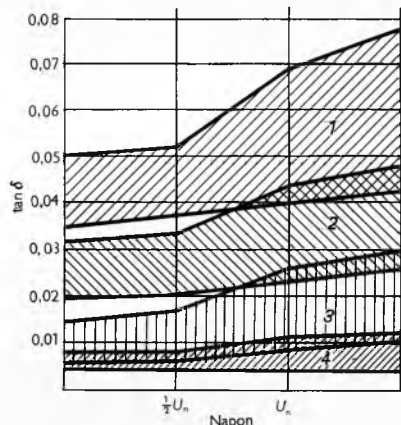
Svojstvo		Muskovit	Flogopit
Naziv	Mjera		
Gustoća	kg/dm ³	2,7...3,2	2,6...2,8
Tvrdoća po Mohsu		2,5...3,2	2,4...2,7
Temperatura kalcinacije	°C	700...800	900...1000
Čvrstoća na vlak	kp/mm ²	25...40	10...13
Čvrstoća na odrez	kp/mm ²	23...26	10...13
Koeficijent toplinskog rastezanja	1/°C	8,5·10 ⁻⁶	13,5·10 ⁻⁶
Toplinska vodljivost	kcal/m °C	0,36	5...6
Dielektričnost		6...7	10 ⁹ ...10 ¹¹
Specifični električni otpor	Ωm	10 ¹² ...10 ¹³	10 ⁹ ...10 ¹¹
Faktor dielektričnih gubitaka na 50 Hz		(2...10) · 10 ⁻⁴	(10...50) · 10 ⁻⁴
na 1 MHz		(1...3) · 10 ⁻⁴	≥ 60
Dielektrična čvrstoća	kV/mm	≥ 80	≥ 60
Dopuštena radna temperatura	°C	500...640	800...900

pločica, izolacijskih uložaka, okanaca Geiger-Müllerovih brojača, rendgenskih cijevi itd.

Daleko najveće količine tinjaca upotrebljavaju se kao sirovina za proizvodnju izolacijskih materijala s većim mogućnostima oblikovanja. Među tim izolacijskim materijalima samo tzv. tinjčeva stakla predstavljaju još potpuno anorganske izolacijske materijale. Organska veziva preostalih čine ih sličnima organskim izolacijskim materijalima. Zbog toga se takvi proizvodi ponekad i klasificiraju u tu skupinu. Ipak, s obzirom na to da su im tinjci glavni sastojci, većina autora tretira ih kao da su anorganski.

Tinjčev papir. Postupak J. Bardeta omogućio je proizvodnju papiru slične mase od čistog tinjca (udomaćeni naziv *Samica*). Pri tome se grijanjem na 800 °C za ~20 minuta iz usitnjenog tinjca ukloni približno polovica njegove kristalne vode. Zatim se uzastopnim tretiranjem otopinom natrijum-karbonata, pranjem vodom i digeriranjem razrijeđenom solnom ili sumpornom kiselinom sirovina dovodi u stanje u kojem se iz nje može napraviti suspenzija slična pulpi u proizvodnji papira. Za to je dovoljno potresanje. Ta pulpa prerađuje se zatim na neznatno modificiranim strojevima za proizvodnju papira u traku od tinjčeva papira.

Ovim postupkom mogu se dobiti listovi debljine od nekoliko desetinki do nekoliko stotinki milimetra. Listovi nisu postojani prema djelovanju vode, a njihova izolacijska svojstva neznatno su lošija od izolacijskih svojstava tinjaca. Prema tome upotreba tinjčevog papira sve se više širi, ne samo zato što je on mehanički ujednačen materijal od kojega se mogu dobiti skoro po volji veliki komadi materijala s izolacijskim kontinuitetom, već i zato što je jeftiniji i od najmanje kvalitetnih čistih tinjaca, splittinga. Njegovu nisku cijenu omogućavaju kako poboljšanja postupka proizvodnje (među ostalim rješenje problema mehaničkog usitnjavanja, što je pojednostavnilo dobivanje pulpe) tako i znatno veće iskorištenje sirovina.



Sl. 48. Ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ nekih izolacijskih materijala—preradevina tinjca o naponu. 1 Šelak-mikafolij, 2 asfalt-mikafolij, 3 tinjčev papir s preodtvrdnutim vezivom, 4 tinjčev papir naknadno impregniran epoksidnom smolom; U_n nazivni napon

Izolacijski materijali izrađeni od listića tinjca i tinjčevog papira. Najvažnija je primjena listića tinjca i tinjčevog papira za izradu izolacijskih materijala koji su poluproizvodi za izradu izolacijskih sistema električnih strojeva i uređaja. Takvi izolacijski materijali izrađuju se u obliku ploča, folija i vrpce, tako da se navedenim osnovama od tinjca dodaju veziva i/ili impregnanti, kao i nosivi dijelovi. Veziva koja služe za vezivanje tinjca ili tinjčevog papira su obično ujedno i impregnanti. Impregnanti, veziva i nosivi materijali većinom su temperaturno znatno lošiji od tinjaca, pa ti dodani materijali određuju toplinsku klasu (v. tabl. 10).

Materijali s osnovom od listića tinjca imaju većinom u nazivu riječ *mika* (*mica*, engl., tinjac), a materijali na temelju tinjčevog papira nemaju odgovarajuću zajedničku oznaku, već oznake kao Isomica, Micamat, Feinmica, Samica, Remika, Слюдопласт, Слюдинит (*слюда*, rus., tinjac) i dr. U nas su se udomaćili nazivi po isporučiocu koji se prvi pojavio na našem tržištu. Naj-

važniji proizvodi koji se dobivaju od listića tinjca jesu mikanit, mikafolij i tinjčeve vrpce, a od proizvoda na bazi tinjčevog papira samikanit, samikafolij i samika-vrpce.

Mikanit je materijal izrađen od većeg broja slojeva listića tinjca slijepljenih šelakom, asfaltom ili umjetnim smolama (suremenije vrste) u krute ili savitljive ploče, debljine obično između 0,25 i 2,0 mm. Bijeli mikaniti s malim sadržajem šelaka (1 ... 2%), smeđi su, zbog niskog tališta šelaka upotrebljivi samo u područjima nižih temperatura (do 90 °C), ali su savitljivi i lakše se obrađuju prešanjem. Mikaniti proizvedeni s pomoću gliptalnih smola daleko su postojaniji prema djelovanju temperature (do 200 °C). S pomoću silikonskih smola i obično kombiniranjem sa staklenim vlaknima danas se proizvode mikaniti postojani i do 370 °C (na bazi muskovita), pa i do 430 °C (na bazi flogopita), koji su zapravo čisti anorganski izolacijski materijali. Kao veziva mikanita upotrebljavaju se osim toga i poliesterske, poliamidne, alkidne i epoksidne smole.

Osim navedenih, tzv. krutih mikanita, obradljivih prešanjem na višim temperaturama, postoje i tzv. meki (npr. mikaniti sa šelakom, koji još sadrže stanovitu količinu otapala, i mikaniti s umjetnim smolama, u kojima vezivo nije potpuno otvrdnuto) koji se obrađuju hladnim prešanjem i zatim otvrdnjavaju grijanjem.

Mikaniti s malim sadržajem veziva (~ 2%, odnosno između 2 i 3%) upotrebljavaju se za izolaciju grijaćih tijela i kao komutatorska izolacija, oni s velikim sadržajem veziva (sa 20...25%, odn. do 30%, tzv. form-mikanit ili savitljivi mikaniti) za izolacije koje se izrađuju vrućim, odnosno hladnim oblikovanjem.

Mikafolij (mikanitni papir) razlikuje se od mikanita samo po tome što je na nekoj podlozi. Prema namjeni mikafolija, materijal njegove podloge je različit (najčešće je papir ili celofan, ali može biti također pamuk i prirodna ili umjetna svila itd.). Osim šelaka, s kojim se dobivaju žuti ili smeđi šelak-mikafoliji, i umjetnih smola, za vezivo ovih materijala upotrebljavaju se i asfalt, pri čemu se dobivaju crni asfalt-mikafoliji (za izolaciju u vlažnoj sredini).

Mikafolij se najviše upotrebljava za izolaciju vodiča, posebno namotaja električnih strojeva, pa se proizvodi u obliku smotaka do 1 m širine, debljine 0,10...0,25 mm.

Tinjčeve vrpce razlikuju se od mikafolija samo po tome što imaju vrlo fleksibilno vezivo. Debljina im je od 0,10 do 0,25 mm. Upotrebljavaju se za izolaciju rotacijskih strojeva.

Samikanit također se dobiva tehnikom izrade mikanita. Pri tome listovi tinjčevog papira zamjenjuju slojeve listića tinjca. Njegova za elektrotehniku važna svojstva općenito su ujednačenija i bolja nego što su svojstva mikanita u svim izolacijama u kojima se ta dva materijala upotrebljavaju.

Samikafolij je preradevina tinjčevog papira koja se proizvodi tehnikom proizvodnje mikafolija, pri čemu tinjčev papir zamjenjuje slojeve listića tinjca. Općenito je bolji izolacijski materijal od mikafolija. Najviše se upotrebljava za proizvodnju čvrstih, homogenih izolacijskih košuljica, djelnica, tuljaca i cijevi jednolične debljine, dobrih izolacijskih svojstava i velike postojanosti prema djelovanje topline kao i dijelova rotacijskih strojeva.

Samika-vrpce odgovaraju tinjčevim vrpčama samo su s osnovom od tinjčevog papira. Upotrebljavaju se za slične svrhe kao i tinjčeve vrpce tamo gdje su potrebne vrlo čvrste i homogene izolacije visokih dielektričnih svojstava.

Tinjčeva stakla dobivaju se od praha čistih tinjaca (npr. praha dobivenog sušenjem pulpe kakva se priređuje u proizvodnji tinjčevog papira) aglomeriranjem s olovo-boratom ili drugim staklastim vezivima (npr. vodenim staklom, aluminijum-oksidi-hidratom, koloidnom ili hidratiranom kremenom kiselinom samom, ili s vapnom i alkalijama) na temperaturama taljenja silikata. U trgovini se nalaze pod komercijalnim nazivima Mikalex, Mikaver. Obradljiva su alatom od tvrdih metala. Upotrebljavaju se u tehnici visokih frekvencija.

Sintetski tinjci. Važnost tinjaca kao elektrotehničkih materijala, njihova razmjerno visoka cijena i, najviše, poteškoće pri nabavi u ratnim uvjetima učinile su ih u drugom svjetskom ratu strateškim materijalom u većini zemalja. Zbog toga su mnogi — s različitim

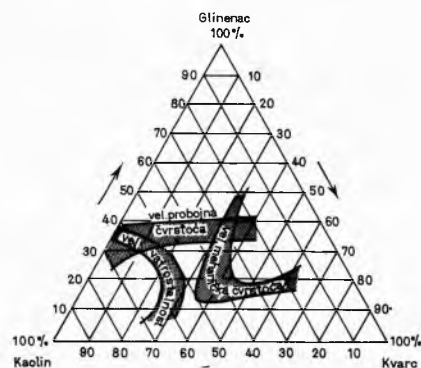
uspjehom — pokušali proizvesti tinjac sintetski. Prva industrijska proizvodnja jednog takvog materijala, fluorflogopita, počela je u USA sredinom pedesetih godina. Ipak, industrijska proizvodnja sintetskih tinjaca tek je u početku razvoja.

Keramički izolacijski materijali. Pod keramičkim materijalima (ili kratko keramikom) razumijevaju se proizvodi dobiveni sinterovanjem smjesa fino samljevenih i s vodom zamiješenih sirovina, među kojima su najvažnije gline i milovka. Kao sirovine upotrebljavaju se i neki oksidi (poblježe v. u članku *Keramika*). Od keramičkih materijala kao izolacijski materijali upotrebljavaju se posebne vrste porculana, steatita, keramike s visokim sadržajem spojeva titana i oksidne keramike.

Porculan je prvi keramički proizvod koji se upotrijebio kao izolacijski materijal (sredinom prošlog stoljeća), i to kao konstrukcijski materijal izolatorâ za učvršćenje vodiča nadzemnih električnih vodova. Do toga je došlo ne samo zbog njegovih dobrih izolacijskih svojstava već i zbog njegove velike otpornosti prema djelovanju atmosferilija i klimatskih utjecaja. Od tada su se ta njegova svojstva stalno usavršavala, pa su nastale posebne vrste porculana za elektrotehniku poznate pod nazivom *elektroporculan*. Temeljna masa (crijep) elektroporculana, kao i svih ostalih vrsta porculana, jest sustav od više kristalnih i jedne kontinualne, amorfne (staklaste) faze. Sadržaj je kristalne faze u porculanu ~60%. Ona se sastoji od kristala kvarca i aluminijum-silikata kao što su mulit i silimanit. Za izolacijske materijale od elektroporculana karakterističan je također površinski sloj cakline (glazure) kojemu je svrha ne toliko postizanje nepropusnosti (već se od same temeljne mase zahtijeva pa bude dovoljno gusta i nepropusna) koliko poboljšanje mehaničkih svojstava i postojanosti prema vanjskim utjecajima, održavanje površine čistom i time formiranje homogenog električnog polja bez površinskih puzećih struja.

Sirovine od kojih se formira crijep porculana jesu kaolin ili kaolinske gline, glinenci i kremene sirovine. Među glinenima za proizvodnju porculana daleko su najvažniji kalijumski (ortoklas, mikroklin, sanidin, adular) s formulom $KAlSi_3O_8$. Često su tim sirovinama pridruženi i natrijumski glinenci (albit, periklin) s formulom $NaAlSi_3O_8$. Ponekad se upotrebljavaju i sami kao glinenci za porculan, a ponekad i s kalcijumskim glinencem (anortitom), $CaAl_2Si_2O_8$, koji im zna biti pridružen. Od kremenih sirovina za proizvodnju porculana dolaze u obzir kremene stijene, čisti kvarciti i čisti kremen pijesak.

Već prema sadržaju kaolina (gline) i glinenaca u smjesi sirovina od kojih oni nastaju, porculani se dijele na dvije velike skupine: tvrde i meke. Tvrdi porculani, među koje se ubraja i elektroporculan, razlikuju se od mekih time što se dobivaju od smjesa sirovina bogatijih kaolinom, a siromašnijih glinencima. (Te smjese obično sadrže ~50% kaolina, 25% aluminijum-oksida i 25%



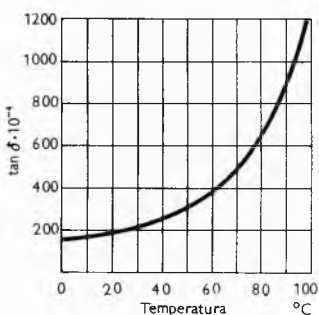
kremena; sadržaj kaolina rjeđe im je niži, a često znatno viši: doseže i do 70%.) Zbog toga su im temperature sinterovanja znatno više (obično za stotinjak stupnjeva).

Caklina porculana nanosi se u obliku vodene suspenzije fino samljevenih sirovina, koja uz navedene sirovine za stvaranje crijeva

sadrži još i mramor, dolomit ili magnezit, na nepečene predmete (pri proizvodnji predmeta većih dimenzija, kojima je čvrstoća dovoljno velika da bi podnijeli operaciju nanošenja bez deformiranja; takvi su gotovo svi proizvodi od elektroporculana) ili na predmete čija je temeljna masa već pretprečena (na $\sim 850^\circ\text{C}$; pri proizvodnji tankostijenih proizvoda). Nakon toga se predmeti peku kako je dalje navedeno.

Iako sastav porculana ni izdaleka nije jednak sastavu smjese čvrstih sirovina od kojih nastaje (jer sadrži većinom sasvim druge sastojke), svojstva porculana obično se posmatraju u ovisnosti o sastavu sirovina. Time se donekle pojednostavnjuju razmatranja, ali je i odnos između svojstava proizvoda i sastava sirovina vrlo složen. Obično se prikazuje ternarnim grafovima poput onih na sl. 49. Odatle se može razabrati da povećanje sadržaja glinenca u smjesi sirovina povećava dielektričnu, povećanje sadržaja kvarca mehaničku čvrstoću, a povećanje sadržaja kaolina toplinsku postojanost porculana. Također se razabire da je kombiniranjem sastava smjese sirovina teško postići željenu optimalnu kombinaciju makar i malog broja za elektrotehniku važnih svojstava porculana.

Svojstva elektroporculana važnija za elektrotehniku jesu njegova gustoća ($2,3\cdots 2,5\text{ kg/dm}^3$), dielektrična čvrstoća (35 kV/mm), relativna dielektričnost ($5,0\cdots 6,5$), dielektrični gubici ($17 \cdot 10^{-3}\cdots 25 \cdot 10^{-3}$ na sobnoj temperaturi; s porastom temperature oni rastu sve brže, sl. 50), specifični električni otpor (koji na sobnoj temperaturi iznosi $10^{12}\ \Omega\text{m}$, ali opada s porastom temperature), toplinska vodljivost ($0,2\text{ Wm/}^\circ\text{C}$), koeficijent toplinskog rastezanja ($4 \cdot 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$). Ipak, s obzirom na to da je u njegovom najvažnijem području primjene, kao konstrukcijskog materijala izolatorâ, uzrokom kvarova najčešće lom tih dijelova vodova, najvažnijim elektrotehničkim svojstvima porculana smatraju



Sl. 50. Ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ elektroporculana o temperaturi

se njegova mehanička svojstva (čvrstoća na vlak, tlak i savijanje, koje dosežu veličine od 500, 5000, odn. 1000 kp/cm^2 i tvrdoća, koja je na Mohsovoj skali između 7 i 8). Zbog toga su se sve ranije vrste elektroporculana proizvodile od smjese sirovina vrlo bogatih kvarcom ($\sim 40\%$ kvarca, 40% kaolina i samo $\sim 20\%$ glinenaca). Veliki nedostatak proizvodnje tih porculana bio je vrlo uski interval temperature pečenja u kojemu se formirala mikrostruktura potrebna za postizanje visoke čvrstoće. (Interval temperature bio je od 1350 do 1375°C , tj. u području omekšavanja Segerovih stožaca SK 11/12.) Danas se to postiže zamjenom jednog dijela kvarca kalciniranim glinicom ili fino samljevenim korundom. (Povećavanje sadržaja Al_2O_3 u smjesi sirovina jako povećava čvrstoću porculana.) Takvi porculani peku se na temperaturama između 1395 i 1410°C , tj. SK 13/14. Oni su daleko manje osjetljivi prema prekoračenju propisanih temperatura pečenja nego raniji elektroporculani.

Za vrijeme pečenja porculana dolazi do velikih kontrakcija volumena ($12\cdots 20\%$). To uvelike otežava u proizvodnji elektro-

porculana izradu proizvoda standardiziranih dimenzija. Zbog toga kontrola proizvoda od elektroporculana obuhvaća ne samo ispitivanje navedenih mehaničkih, električnih i drugih fizikalnih svojstava, već i ispitivanje njihovih dimenzija. U nekim slučajevima iza toga je potrebna završna obrada (brušenje) i, nakon montaže, ponovno ispitivanje.

Od elektroporculana proizvode se ne samo visokonaponski izolatori (sl. 51) nego i niskonaponski (sl. 52), i to provodni i potporni izolatori, odvodnici prenapona, kućišta prekidača itd. U konstrukciji vanjskih električnih instalacija on je praktički nezamjenjiv materijal. U novije doba u unutrašnjim instalacijama zamjenjuju ga epoksidne smole.

Visoki dielektrični gubici elektroporculana na visokim frekvencijama (oni nastaju u stakloj fazi strukture) onemogućavaju primjenu elektroporculana u tehnici slabe struje. Tu ga zamjenjuje tzv. ultraporculan, koji se proizvodi od smjese glinice, kaolina i barijum-karbonata. Na 200°C dielektrični gubici ultraporculana još su uvijek manji od $0,2\%$. I njegova su mehanička svojstva vrlo dobra, pa se upotrebljava za izradu napregnutih dijelova kondenzatora.

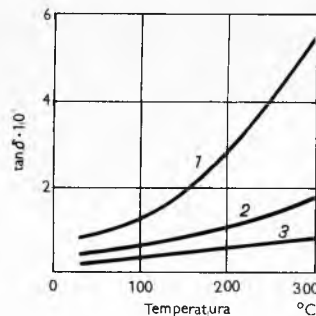
Prilično brzi porast vodljivosti elektroporculana s temperaturom, uzrokovan i heterogenom strukturom, također je njegov veliki nedostatak. On onemogućava upotrebu elektroporculana za elektrotermijske izolacije.

Steatit (masnik, od grč. $\sigma\tau\epsilon\alpha\rho$ *stear mast*) zapravo je mineraloško ime guste modifikacije milovke, magnezijum-silikata, minerala iz skupine talka, koji u idealnom slučaju ima sastav predočiv formulom $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Međutim, u elektro-

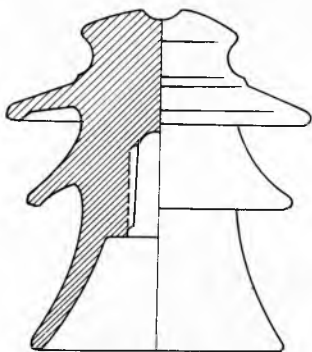
Tablica 13
KARAKTERISTIČNI SASTAVI SMJESE SIROVINA ZA PROIZVODNJU STEATITA I TEMPERATURE PEČENJA

		Normalni steatit	Specijalni steatit
Sirovina	Milovka	85%	54%
	Talk	—	30%
	Plastična glina	8%	8%
	Norveški glinenac	7%	—
	Barijum-karbonat	—	8%
Temperatura	SK	11...13	11...12
	$^\circ\text{C}$	1350...1395	1350...1375

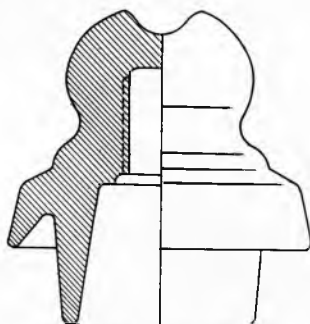
tehnici se pod steatitom redovito razumijeva keramički materijal dobiven pečenjem smjese fino samljevenih sirovina, koja uglavnom sadrži milovku, a u manjim količinama glinu i glinence (normalni steatit) ili, umjesto glinenaca, barijum-karbonat (za proizvodnju specijalnog steatita). Dvije karakteristične smjese sirovina za proizvodnju steatita prikazane su u tablici 13 zajedno s temperaturama pečenja. Nastali se steatit sastoji uglavnom od kristalne faze koju čine sitni kristali protoenstatita, enstatita i klinoenstatita (različite kristalne modifikacije magnezijum-silikata) s nešto kristobalita (SiO_2) te malog dijela amorfne, staklaste faze, koju čine ostali sastojci smjese sirovina otopljeni jedan u drugome. Ta struktura vrlo je gusta. Zbog toga se elektrotehnički proizvodi od steatita ne glaziraju, osim kad je potrebno održavati ih vrlo čistima. Higroskopnost steatita je manja od higroskopnosti porculana. Pretežno kristalna struktura steatita uvjetuje i njegova bolja električna, toplinska i mehanička svojstva (tabl. 14), među kojima su posebno važni ne samo manji, već i s temperaturom



Sl. 53. Ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ steatita (1), ultraporculana (2) i keramičkih masa na bazi barijum-aluminijum-silikata s dodatkom cirkonijum-dioksida (3) o temperaturi



Sl. 51. Visokonaponski izolator



Sl. 52. Niskonaponski izolator

manje promjenljivi dielektrični gubici steatita u usporedbi s porculanom (sl. 53).

Svim tim prednostima steatita, kao elektrotehničkog materijala, treba pribrojiti još i daleko manje kontrakcije pri pečenju steatita nego pri pečenju porculana (svega $\sim 2\%$), što znatno pojednostavnjuje proizvodnju i kontrolu proizvoda.

Steatit je konstrukcijski materijal visoko- i nisko-naponskih izolatora, podnožja sklopki, patrona osigurača, izolacijskih perli, utičnica i utikača, prekidača, antenskih i, zbog malog porasta vodljivosti s temperaturom, elektrotermijskih izolacija.

Glavni je nedostatak steatita kao izolacijskog materijala, u usporedbi s porculanom, njegov razmjerno veliki koeficijent toplinskog rastezanja i zbog toga slaba postojanost prema promjenama temperature. Međutim, taj nedostatak steatita bio je temelj razvoja njegove primjene u materijalima u kojima je združen s metalima. Pri tome mu se koeficijent toplinskog rastezanja, da bi se približio koeficijentu toplinskog rastezanja metala, čak nastojao povećati. To je najprije postignuto povećavanjem sadržaja magnezijum-oksida u smjesi sirovina za izradu materijala prvotno namijenjenih izolacijama visokofrekvencijske tehnike, zvanim *fosteritima*. (Taj naziv nastao je zbog toga što se u steatitu nalazi fosterit, kristalni oblik magnezijum-silikata sa sastavom koji odgovara formuli $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$.) Proizvodi iz te skupine pojavljuju

Tablica 14
ELEKTROTEHNIČKA SVOJSTVA STEATITA

Svojstvo			Mjera	Normalni steatit	Specijalni steatit
Dielektrična čvrstoća na 50 Hz			kV/mm	20...30	30...45
Dielektričnost				~6	~6
Faktor dielektričnih gubitaka (tan δ)	na 20 °C	na 50 Hz	10 ⁻³	2,5...3,0	1,0...1,5
		na 1 MHz		1,5...2,0	0,3...0,5
	na 100°C	na 50 Hz		~65	12...15
		na 1MHz		—	0,6...0,8
Specifični električni otpor			Ωm	10 ¹³	10 ¹³
Koeficijent toplinskog rastezanja	između 20 i 100 °C		10 ⁻⁶ /°C	7...8	6...8
	između 20 i 1000°C			8...10	8...9
Čvrstoća	na vlak		kp/mm ²	600...1000	
	na tlak			8500...9500	9000... 10000
	na savijanje			1200...1400	1400...1600
Tvrdoća na Mohsovoj skali				8...7	
Gustoća			kg/dm ³	2,6...2,8	
Toplinska vodljivost			kcal/m°C	0,2...0,3	

se u trgovini pod nazivima Kalan, Kalit, Ultrakalan, Frekventa i drugima. Uz vrlo niske dielektrične gubitke fosteriti dobiveni od smjesa sa vrlo velikim sadržajem magnezijum-oksida imaju neobično veliki koeficijent toplinskog rastezanja (do $11 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$). Svojstva slična fosteritima imaju i specijalne vrste steatita dobivene od smjesa sirovina kojima su dodane manje ili veće količine cirkon-silikata. Ti proizvodi, međutim, kvalitetom zaostaju za fosteritima.

Steatitima srodni izolacijski materijali s vrlo niskim koeficijentima toplinskog istezanja dobivaju se iz smjesa sirovina s povećanim sadržajem gline.

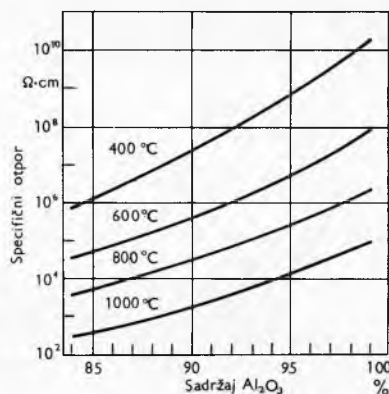
Izolacijski materijali od oksidne keramike. Pod oksidnom keramikom razumijevaju se materijali i proizvodi koji se dobivaju iz oksida i drugih kisikovih spojeva s pomoću procesa vrlo sličnih keramičkim. (Ti se procesi razlikuju od ostalih keramičkih samo time što su im operacije oblikovanja proizvoda obično samo lijevanje i prešanje. Druge su operacije vrlo rijetke, jer smjese sirovina nije jednostavno dovesti u plastično stanje.) Od ostalih keramičkih materijala ovi se razlikuju još i time što ne sadrže kremen u kiselinu ili je sadrže samo u krajnje malim količinama.

Oksidna keramika obuhvaća i neke magnetske materijale kao što su feriti (v. Magnetski materijali u ovom članku) i važne izolacijske materijale. Među ovima izdvajaju se titan-dioksid i titanati kao posebna skupina feroelektrika.

U izolacijske materijale s velikim sadržajem oksida ubrajaju se oni koji mogu poslužiti kao izolacije izložene visokim temperaturama i velikim promjenama temperatura, kao što su npr. elektrotermijske izolacije i izolacije svjećica za paljenje u motorima s unutrašnjim izgaranjem. Zbog toga ti se materijali nazivaju i *vatrostalnim izolacijskim materijalima*.

Specifični električni otpor vatrostalnih izolacijskih materijala ne smije odviše brzo rasti s temperaturom, a njihov koeficijent toplinskog rastezanja ne smije biti velik. Od takvih materijala najvažniji je aluminijum-oksidi, a slijede ga magnezijum-oksidi i cirkonijum-dioksidi.

Kao aluminijum-oksidi za vatrostalne izolacije upotrebljava se kalcinirana glinica, koja se dobiva pri preradi boksita, ili iz nje taljenjem u električnoj peći dobiveni elektrokorundi, koji je vrlo čist. Kako specifični električni otpor ovih proizvoda na različitim temperaturama ovisi o njihovoj čistoći (o sadržaju Al_2O_3) prikazano je dijagramom na sl. 54. Na običnim temperaturama i specifični električni otpor ostalih vatrostalnih izolacijskih materijala dosta je velik, ali on brže raste s temperaturom, posebno specifični električni otpor cirkonijum-dioksida.



Sl. 54. Ovisnost specifičnog električnog otpora vatrostalnih tvari s visokim sadržajem Al_2O_3 o tom sadržaju pri različitim temperaturama

(Već na srednjim temperaturama njegova je vodljivost značajna.) Ostala za elektrotehniku važna svojstva ovih materijala prikazana su u tablici 15.

Od keramičkih masa s visokim sadržajem titanovih spojeva najvažniji su materijali na bazi titan-dioksida i titanata. Titanati su najvažniji feroelektrični materijali; gotovo i nema suvremenih feroelektrika bez barijum-titanata. Zbog toga se u praksi pojmovi feroelektrika i keramičkih materijala na bazi titanata često poistovjećuju. Da bi se pojednostavnila klasifikacija, činit će se to i u daljem izlaganju.

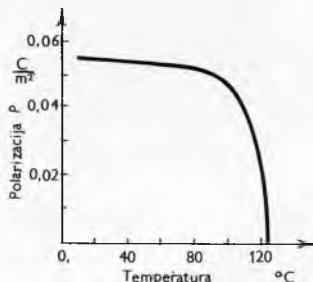
Kako iznad 1000 °C svi kristalni oblici titan-dioksida prelaze u rutil, rutil je isključivi kristalni oblik titan-dioksida u svim keramičkim materijalima u kojima se on nalazi kao faza. Njegovo za elektrotehniku najvažnije svojstvo, velika dielektričnost (različita u smjeru različitih kristalnih osi; $\epsilon_r = 110$ u neorijentiranom

Tablica 15
ELEKTROTEHNIČKA SVOJSTVA VATROSTALNIH
IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Svojstvo	Uvjeti opterećenja	Mjera	Alumi- nium- -oksid	Magne- zijum- -oksid	Cirko- nium- -dioksid
Faktor dielektričnih gubitaka $\tan \delta$	između 50 i 10^8 Hz	10^{-3}	$\leq 0,2$	—	—
Dielektričnost			9	10	19
Srednji koeficijent toplinskog rastezanja	između 20 i 100°C	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	5...7	8...9	8...9
	između 20 i 1000°C		7...8	12...14	—
Čvrstoća	na vlak	kp/cm ²	2600	—	—
	na tlak		3000	—	2100
	na savijanje		3000	—	1900

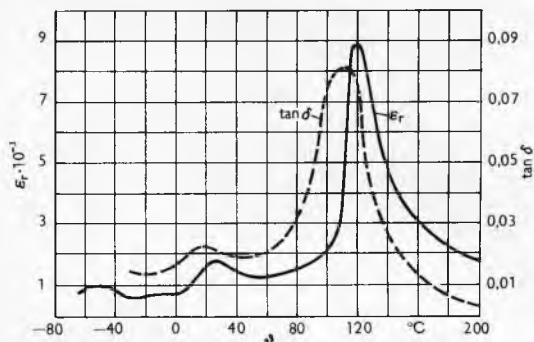
sitnokristalnom materijalu), čini ga važnim materijalom za dielektrik kondenzatora. U tom području primjene nedostatak mu je prilično velika zavisnost dielektričnosti od temperature. (Zbog toga je i kapacitet kondenzatora u kojemu rutil služi kao dielektrik jako zavisna od temperature.) Taj nedostatak rutila može se ublažiti dodatkom silikatâ ili cirkonijum-dioksida smjesi sirovina od koje se proizvodi dielektrik. Pri tome se obično proizvode materijali s dielektričnošću od 30 do 40 ili od 70 do 80, kakve se obično traže u elektronici, skoro nezavisnom od temperature do 100°C . Dielektrični gubici tih materijala mali su, a u onima koji su dobiveni od smjesâ s cirkonijum-dioksidom još su i praktički nezavisni od temperature i frekvencije polja od 50 do 10^8 Hz. Od ostalih za elektrotehniku važnih svojstava rutila značajan je i njegov negativni koeficijent rastezanja ($\sim 10 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$), zbog čega su i koeficijenti rastezanja spomenutih masa s dodacima većinom negativni. Trgovački nazivi keramičkih masa s rutilom su npr. Kondenza, Kerafar.

Od titanata za elektrotehniku su zanimljivi titanati nekih alkalnih zemalja, posebno barijum-titanat (točnije barijum-metatitanat, $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$), koji je izraziti feroelektrik sve do temperature od 120°C (feroelektrične Curieove temperature barijum-metatitanata). Najvažnija su mu feroelektrična svojstva visoka polarizabilnost (sl. 55), velika dielektričnost i veliki dielektrični gubici. Ta su svojstva barijum-metatitanata nelinearno promjenljiva s temperaturom. Međutim, promjena dielektričnosti jednoznačna je u polikristalnom materijalu s potpuno nesređenom orijentacijom kristala, pa kako je keramički barijum-metatitanat obično takav materijal, i u njemu je ta ovisnost jednoznačna (sl. 56). Pri tome kako dielektričnost tako i dielektrični gubici pokazuju dva izrazita maksimuma: jedan (manji) u području oko -10°C i jedan (veliki) u području oko feroelektrične Curieove temperature. Oba su uzrokovana promjenama kristalnog oblika (prvi prelazom iz rompskog u tetragonski, a drugi iz tetragonskog u kubni). Pri tome su maksimumi u Curieovoj točki grublje kristalnih materijala strmiji, dielektrični gubici veći, petlje električne histereze šire. U području običnih temperatura, pa i do $\sim 30^\circ\text{C}$, dielektričnost mu je manje ili više stalna. (Već prema vrsti materijala kreće se između 1000 i 1500.) U nešto užem području temperature prilično su stalni i dielektrični gubici, ako se osim temperature istovremeno ne mijenja brzo i jakost

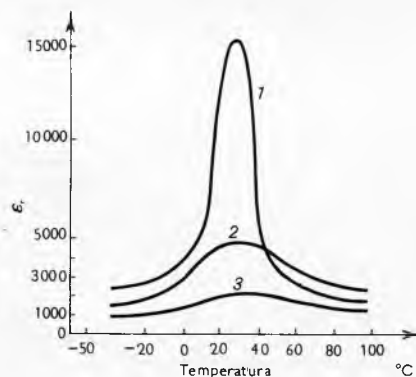


Sl. 55. Polarizacija P barijum-metatitanata u ovisnosti o temperaturi

elektronskog polja. (Dielektrični gubici barijum-metatitanata malo se mijenjaju s frekvencijom polja unutar područja od 50 do 10^8 Hz.)



Sl. 56. Ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ polikristalnog keramičkog barijum-metatitanata o temperaturi θ



Sl. 57. Ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r nekih feroelektrika o temperaturi. 1. Barijum-metatitanat s dodatkom stroncijum-metatitanata, 2 i 3 različiti keramički materijali u praksi

Barijum-titanati mogu se promatrati kao sustav $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$ u kojemu je barijum-metatitanat poseban slučaj. Mijenja li se omjer mase barijum-oksida i titan-dioksida u tom sustavu, mijenjaju se i svojstva keramičkih materijala od barijum-titanata, npr. oblik temperature zavisnosti dielektričnosti. (Njen temperaturni koeficijent smanjuje se s povećanjem sadržaja kako barijum-oksida tako i titan-dioksida, a mali višak ovog uzrokuje pomicanje Curieove temperature navise.) Slične i druge posljedice ima i dodavanje nekih oksida (obično cirkonijum-oksida), drugih titanata (npr. stroncijum- ili kalcijum-metatitanata), stanata, cirkonata i drugih spojeva smjesi sirovina. Neki od učinaka tih dodataka prikazani su na sl. 57. Jedan od najzanimljivijih među njima je učinak stroncijum-metatitanata. On potiskuje veliki maksimum u područje sobne temperature uz istovremeno njegovo sužavanje i povišavanje. (Već malim promjenama temperature mogu se izazvati velike promjene dielektričnosti uz dosižanje ekstremno velikih vrijednosti od $\epsilon_r \approx 15\,000$.)

Kako se to može i očekivati, keramički materijali na osnovi barijum-titanata ispoljuju i snažne piezoelektrične efekte pri polarizaciji jednosmjernim naponom.

Ostali titanati koji dolaze u obzir za primjenu kao feroelektrični keramički materijali (kalcijum-titanat, magnezijum-titanat i već spomenuti stroncijum-titanat) ne upotrebljavaju se samostalno, već uglavnom samo kao dodaci keramičkim masama na bazi barijum-titanata radi modifikacije nekog određenog svojstva za neku specifičnu svrhu. Slična je i primjena feroelektričnih stanata i cirkonata. (Barijum-, stroncijum-, kalcijum-, olovo-, bakar-, cink-, i kadmijum-stanat, te barijum-, stroncijum- i kalcijum-cirkonat snižavaju Curieovu temperaturu; magnezijum-, nikal- i bizmut-stanat, te magnezijum- i kalcijum-cirkonat snižuju maksimum dielektričnosti.) Od rijetkih materijala iz ove skupine koji se upotrebljavaju samostalno treba spomenuti olovo-titanat-

-cirkonat. O primjeni novijih feroelektrika, kao što su niobati i tantalati, u literaturi se još ne nalazi mnogo podataka.

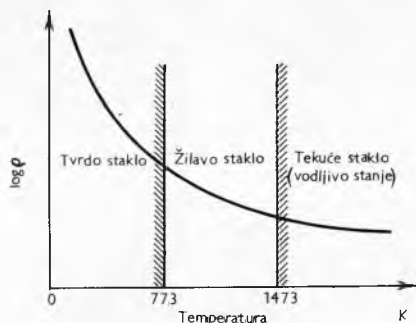
Pri primjeni keramičkih materijala kao kondenzatorskih dielektrika prvenstveno je važna njihova velika dielektričnost; ostala feroelektrična svojstva titanata i drugih u vezi s njima spomenutih spojeva predstavljaju najčešće nedostatak, pa se njihov utjecaj smanjuje dodacima. Ipak su, naročito u elektronici, česti slučajevi kad je i promjenljivost dielektričnosti tih dielektrika važna (npr. u varikondima za pojačala, modulare, pretvarače frekvencije, stabilizatore).

U elektronici su također zanimljiva i druga feroelektrična svojstva ovih materijala. Zbog toga je piezoelektrični olovo-titanat-cirkonat važan materijal elektromehaničkih pretvarača frekvencije, a postoje i feroelektrični keramički materijali za memorije elektroničkih računala, gdje je važna njihova električna remanencija. Takvi materijali moraju imati strukturu koja ih čini anizotropnim. (Moraju to biti monokristali ili grubo kristalni materijali s usmjerenom strukturom.)

Iako su keramički feroelektrici sasvim novi materijali, zbog čega se o njima zna još razmjerno malo, oni su već vrlo važni za suvremenu elektrotehniku, posebno za elektroniku. (Među ostalim, snažni feroelektrični efekti koje oni ispoljavaju u znatnoj su mjeri unapredili mikrominijaturizaciju.) Zbog toga se može očekivati da će im se primjena još proširiti.

Stakla. Klasična definicija stakala kao amorfnih, pothlađenih talina danas više ne zadovoljava. Suvremena industrija, naime, proizvela je već niz sasvim različitih tvari također amorfnih i prozirnih, na običnim temperaturama čvrstih, a na višima plastičnih i tekućih, koje se također ponekad, u skladu s navedenom definicijom, nazivaju staklima (npr. Plexiglas), mada su im inače svojstva vrlo različita od svojstava klasičnog stakla. Da bi se u terminologiju tih materijala uvelo više preciznosti, predloženo je da se takvi materijali nazivaju skupnim nazivom vitroidi (staklu slični), a staklo da se definira kao čvrst materijal koji se sastoji od anorganskih spojeva, s temeljnom masom u vitroidnom stanju, a može biti bezbojan, obojen ili zamućen česticama stranih tvari. (Postoje i druge modifikacije ove definicije.)

Glavne skupine spojeva od kojih se sastoje stakla jesu tzv. anionski oksidi (u tehničkim staklima poglavito silicijum-dioksid, a bor-trioksid u manjoj mjeri, obično zajedno sa silicijum-dioksidom, u tzv. borosilikatnom staklu), oksidi alkalnih metala (najčešće natrijum-oksidi, kalijum-oksidi u finijim, a litijum-oksidi samo u specijalnim vrstama stakla), oksidi zemnoalkalnih metala (poglavito kalcijum-oksidi, koji se može djelomično ili potpuno zamijeniti magnezijum- ili barijum-oksidi). Osim tih oksida za proizvodnju stakla važni su i drugi, naročito olovo-oksidi i aluminijum-oksidi. Glavne operacije procesa proizvodnje stakala jesu taljenje sirovina (obično oksida ili karbonata, ali i drugih, npr. tinjaca) oblikovanje i hlađenje proizvoda.



Sl. 58. Ovisnost logaritma specifičnog električnog otpora stakla o temperaturi

Na običnim temperaturama izolacijska svojstva stakala općenito su dobra. (Specifični električni otpor običnih stakala za elektrotehniku kreće se od 10^9 do $10^{15} \Omega\text{m}$, dielektričnost od 4 do 7, dielektrični gubici između $0,4 \cdot 10^{-3}$ i $10 \cdot 10^{-3}$, a dielektrična čvrstoća doseže i do 50 kV/mm .) Njihov specifični električni otpor jako opada s porastom temperature. Pri tome se pojavljuje ionska vodljivost u sve jačoj mjeri, tako da već između

200 i 300°C stakla gube svoja izolacijska svojstva. Opći oblik ovisnosti logaritma specifičnog električnog otpora stakla o temperaturi prikazan je dijagramom u sl. 58.

Specifični električni otpor stakala opada također s napredovanjem korozije pod utjecajem vlage. Tada na površini stakala nastaje dobro vodljiv sloj proizvoda tog procesa.

Nosioci kako ionske tako i površinske vodljivosti stakala uglavnom su ioni alkalijskih. (Što je veći sadržaj alkalijskih stakla, to je ne samo njegova električna vodljivost veća nego mu je i kemijska postojanost manja.) Osim toga se povećavanjem sadržaja alkalijskih oksida pogoršavaju i druga izolacijska svojstva stakala (npr. rastu im dielektrični gubici). Alkalijski oksidi u staklu nepovoljno djeluju i na njegova toplinska i mehanička svojstva važna za izolacijske materijale. S povećanjem sadržaja tih spojeva u staklu raste njegov toplinski koeficijent rastezanja i time opada njegova otpornost prema naglim promjenama temperature, a raste njegova krutost i opada njegova mehanička čvrstoća. Tako, npr., dok toplinski koeficijent rastezanja stakala doseže do $12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, a njihova se mehanička čvrstoća kreće između 6000 i 12000 kp/cm^2 , toplinski koeficijent rastezanja čistog kremenog (kvarcnog) stakla iznosi svega $0,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, a čvrstoća se kreće između 16000 i 20000 kp/cm^2 . I izolacijska su svojstva kremenog stakla bolja. Njihov specifični električni otpor na običnim temperaturama kreće se oko $4 \cdot 10^{17} \Omega\text{m}$, a dielektrični gubici dosežu najviše do $0,2 \cdot 10^{-3}$.



Sl. 59. Vezanje glava namota staklenim vrpčama

Djelovanja suprotna djelovanjima alkalijskih oksida u staklima ima niz drugih oksida. Među njima najvažniji je aluminijum-oksidi koji manje ili više potiskuje sva ta nepovoljna djelovanja. Naročito je važno njegovo kemijsko stabilizacijsko djelovanje i djelovanje u pravcu smanjivanja ionske vodljivosti stakala. Kemijsku postojanost stakala poboljšavaju i oksidi alkalijskih zemalja, olovo-oksidi i bor-trioksidi. Posljednji također smanjuje i koeficijent toplinskog rastezanja, ali na ionsku vodljivost stakala djeluje slično kao i alkalijski oksidi. Zbog svega toga za izolacije najviše se upotrebljavaju tzv. bezalkalna ili E-stakla (sa sadržajem alkalijskih ispod 1% i s dodacima za potiskivanje električne vodljivosti i za kemijsku stabilizaciju, obično aluminijum-oksidi).

Alkalijska stakla učinjena postojanijim prema djelovanju topline, promjenama temperature i kemijskim utjecajima (kao borosilikatna, npr. tzv. Pyrex-stakla) upotrebljavaju se za izradu žarulja i sijalica, neonskih i radio-cijevi, izolatora, živinih prekidača, dijelova elektronike, itd.

Bezalkalna stakla najviše se upotrebljavaju za izradu izolacijskih materijala u obliku vlakana i njihovih prerađevina. Debljina takvih vlakana kreće se između 3 i $12 \mu\text{m}$. Dobivaju se kao neprekidne niti ili kao niti dužine $10 \cdots 15 \text{ cm}$. Prve, tzv. *staklena svila*, dobivaju se mehaničkim izvlačenjem iz taline velikom brzinom, kroz vrlo uske sapnice, u kupki od maziva, te se odmah namataju u snopovima. Već prema broju niti u snopovima, ti

proizvodi nazivaju se običnom staklenom svilom (sa samo toliko niti u snopu koliko je predviđeno za dalju preradu, npr. upređanjem) ili rovingom (engl. *rowing*, do 60 niti u snopu) koji se upotrebljava za armaturu izolacija od umjetnih smola. Kratke niti (tzv. složena staklena svila) izvlače se iz taline strujom zraka, pri čemu se lome u komade navedene dužine. I one se upotrebljavaju za armiranje, ili za punjenje izolacija koje se izrađuju prešanjem. Tome sličan materijal, s nitima određene dužine (6, 13, 26, 53, 66 mm) dobiva se rezanjem staklene svile (tzv. rezana staklena svila). Od tih temeljnih proizvoda upređanjem, zavrtnjem ili uplitanjem izrađuju se stakleni konci, užice i konopci; proširivanjem ili spajanjem vezivom staklene hasure; tkanjem i pletenjem staklene navlake, vrpce i tkanine, itd. Svi ti proizvodi upotrebljavaju se kao samostalne izolacije, ali, kao i vlakna, najviše zajedno s umjetnim smolama kao armature, ili kao izolacije koje se naknadno impregniraju. Jedan slučaj takve izolacije staklenim vrpčama prikazan je na sl. 59.

Kremeno staklo upotrebljava se za specijalne svrhe, npr. za izradu izolacija kvalitetnih zračnih zakretnih kondenzatora, cijevi kiselinstalnih grijača ronila, živinih tinjalica, okanaca fotoelementa, izolatorâ u radiotehnici.

Azbest i njegove preradevine. Azbest (v. *Azbest*, TE 1, str. 633) kao izolacijski materijal u elektrotehnici izravno se upotrebljava samo u obliku praha kao punilo (npr. za izolacijske kitove). Od njegovih preradevina upotrebljavaju se neki predeni i tkani proizvodi (azbestni konac i vrpce), azbestni papir i cement. Za izradu tih preradevina upotrebljava se samo serpentinski i alkalni amfibolski azbest, tj. hrizotil i krokidolit.

Za izradu azbestnog konca i vrpce upotrebljavaju se najkvalitetnija duga vlakna. Njihovo upređanje i tkanje obavlja se na strojevima sličnim tekstilnim. Pri tome im se mehanička čvrstoća često povećava kombiniranjem s pamučnim ili umjetnim vlaknom. Azbestni konac upotrebljava se za žičnu i kabelsku izolaciju, a vrpce (koje se proizvode s debljinom od 0,2 do 0,5 mm) za vanjsku izolaciju polnih namota električnih strojeva.

Za proizvodnju azbestnog papira upotrebljavaju se kvalitetna kraća vlakna. Dobivaju se proizvodi s debljinom od 0,15 do 2 mm i dielektričnom čvrstoćom od 12 kV/mm. Upotrebljavaju se za izolaciju električnih strojeva i svornjaka transformatora, za različite izolacijske podloge, utorsku izolaciju (u kombinaciji s folijama od plastičnih masa). Lakirani azbestni papir (vetrozbest, staklo-azbest), u kojemu je azbest kombiniran sa staklenim vlaknom, upotrebljava se za međuizolaciju (izolacijske uloške). Debljina mu je 0,2–0,4 mm. Ima razmjerno veliku dielektričnu čvrstoću (14 kV/mm). Svrha njegove upotrebe među ostalim je i kompaktiranje namotâ (prešanjem na višoj temperaturi).

Proizvodi od azbest-cementa (v. *Azbestno-cementni proizvodi*, TE 1, str. 634) za koje se upotrebljavaju manje kvalitetna, kratka vlakna, služe za konstrukciju lučnih komora, rasklopnih ploča i sl., jer su dosta otporni prema električnom luku. Najveći nedostatak ovih materijala kao izolacijskih materijala u elektrotehnici je njihova higroskopnost. Zbog toga se oni ne mogu upotrijebiti kao izolacija, pogotovo ne visokonaponska, ukoliko se prethodno ne osuše i ne impregniraju (npr. izolacijskim lakovima, umjetnim smolama, posebno silikonskim).

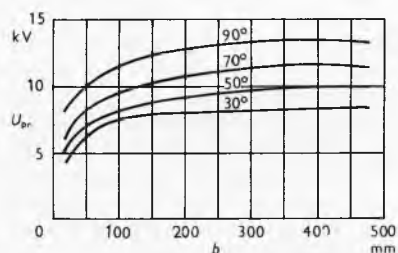
Zbog svoje razmjerno visoke cijene i svojih razmjerno loših izolacijskih svojstava, azbest i njegove preradevine sve se manje upotrebljavaju u elektrotehnici i zamjenjuju se suvremenijim sintetskim proizvodima.

Kremen (kvarc). Od kristalnih oblika kvarca za elektrotehniku su zanimljive modifikacije α i β kao piezoelektrični materijali. Danas se za tu svrhu već proizvode i umjetni monokristali kvarca hidrotermalnom sintezom (v. *Drago kamenje, umjetno*, TE 3, str. 394). Upotrebljavaju se npr. za izradu oscilatorâ, stabilizatorâ frekvencije, mikrofonâ.

Ostali anorganski izolacijski materijali. Osim napred opisanih materijala od anorganskih tvari, u stanovitaj se mjeri upotrebljavaju kao izolacijski materijali još mramor i škriljevci (naročito često tinjčevi škriljevci). Ti su materijali porozni i zbog toga higroskopni, pa im je upotreba ograničena uglavnom na područje niskonaponskih izolacija, najčešće impregniranih (obično parafinom), kao što su postolja i razvodne ploče.

Izolacijski plinovi. Okolnost da su električne instalacije, strojevi, aparati i uređaji najčešće sa sviju strana okruženi atmosferom, a osim toga njihovi neizolirani dijelovi s njome u izravnom dodiru, opravdava shvaćanje da je i zrak izolacijski materijal; za praksu je stoga potrebno poznavati izolacijska svojstva zraka i uvjete pod kojima ih zrak zadržava i gubi.

Zrak je plinska smjesa koja se uglavnom sastoji od dušika i kisika, a sadrži i male količine argona i ugljik-dioksida, te još manje količine niza drugih plemenitih plinova i vodika. Svojstva čistog zraka zanimljiva za elektrotehniku jesu njegova gustoća (1,293 g/dm³ pod standardnim okolnostima), toplinska vodljivost (0,024 W/m °C na 0 °C), dielektričnost (praktički jednaka dielektričnosti vakuumu), specifični električni otpor (10¹³ Ωm) i dielektrična čvrstoća. Dielektrična čvrstoća zraka ovisi o tlaku, temperaturi, sadržaju vlage i obliku elektroda. Ovisnost probojnog napona o udaljenosti među elektrodama i kutu njihovih vrhova prikazuje sl. 60.



Sl. 60. Probojni napon U_{pr} zraka u ovisnosti o udaljenosti elektroda b i temperaturi

Osim o obliku polja, dielektrična čvrstoća zraka ovisi o njegovoj čistoći. Uobičajene primjese zraka (voda u svim agregatnim stanjima, prašina, organske tvari kao npr. tijela insekata) mogu je znatno smanjiti. U industrijskim postrojenjima, njihovoj okolini, pa čak i u čitavim industrijskim područjima treba računati i s drugim sastojcima zraka, kao npr. anorganskim česticama sadržanim u produktima izgaranja, atmosferskom prašinom, raznim kiselinama, agresivnim plinovima, radioaktivnim česticama i dr., koji mogu znatno utjecati na njegova za izolaciju važna svojstva.

U nekim slučajevima svojstva zraka mogu ga učiniti neprikladnim za električki izolirajuću atmosferu. Tako, npr., njegova sklonost ionizaciji pod utjecajem jakih električnih polja, koja može imati za posljedicu nastajanje oksida dušika i, iz njih i prisutne vode, vrlo agresivnih kiselina, može ga učiniti odviše korozivnim. Tada se zamjenjuje dušikom (npr. za atmosferu visokonaponskih kabela, kondenzatora i transformatora), ugljik-dioksidom (takoder za punjenje visokonaponskih kondenzatora), smjesom argona i dušika (za punjenje žarulja), itd. Neki drugi plinovi imaju naročito povoljna svojstva, zbog kojih se ponekad u elektrotehnici upotrebljavaju umjesto zraka. Tako su, npr., zbog svoje daleko bolje toplinske vodljivosti (7,1 odnosno 6,4 puta veće od vodljivosti zraka) vodik i helijum u stanovitim slučajevima prikladnija rashladna sredstva npr. za hlađenje velikih električnih strojeva u zatvorenim rashladnim krugovima (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 210). (Time se također eliminiraju nepovoljne posljedice ionizacije zraka.)

Osim tih plinova koji se iz jednakih razloga kao i zrak mogu smatrati, među ostalim, i anorganskim izolacijskim materijalima, u plinovite izolacijske materijale mogu se ubrojiti također plinovi koji se upotrebljavaju kao prenosioci topline u rashladnim uređajima (npr. amonijak, sumpor-dioksid, freoni) i plinovi kojima se gasi električni luk u električnim prekidačima (sumpor-heksafluorid, plinovi koji se djelovanjem topline razvijaju iz čvrstog plinovitnog materijala; v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 128 i 129), jer i oni tvore atmosferu kojom su okruženi električni dijelovi tih uređaja.

Organski izolacijski materijali

U organske izolacijske materijale ubrajaju se izolacijske tvari (izolacijska ulja), voskovi, bitumeni, smole, plastomeri, elastomeri, silikoni, vlaknasti materijali i lakovi.

Izolacijska ulja

Kao izolacijske tekućine, koje se zbog svoje konzistencije i »masnog« opipa običavaju nazivati uljima, upotrebljavaju se mineralna ulja (sastavljena pretežno od ugljikovodika), tzv. masna ulja (sastavljena od triglicerida masnih kiselina), neki klorirani ugljikovodici (napose pentaklordifenil), neki diestri (npr. dibutilsebacat) i tzv. silikonska ulja.

Mineralna ulja proizvodi su prerade nafte, točnije rečeno mazuta, destilacijskog ostatka nakon atmosferske destilacije nafte.

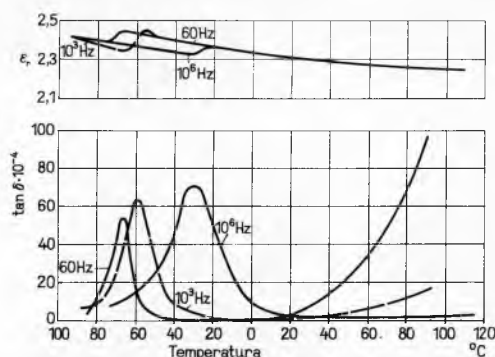
Mazut (za dobivanje izolacijskih ulja najbolje mazut od nafte naftenskog karaktera) vakuumskom destilacijom se razdvaja na teško plinsko ulje i dvije ili više teže hlapljivih uljnih frakcija. Dalekosežnom rafinacijom tih frakcija sumpornom kiselinom i aktivnim glinama za bijeljenje ili silikagelom dobivaju se mineralna ulja koja, već prema vrsti sirovine, temperaturi ključanja (tj. destilacijskoj frakciji u koju idu) i stupnju rafinacije imaju različita za primjenu kao izolacijska sredstva važna svojstva (tabl. 16).

Tablica 16
SVOJSTVA MINERALNIH IZOLACIJSKIH ULJA

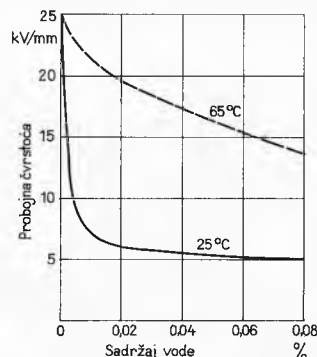
Vrst ulja	Viskozitet cSt	Stišnite °C	Plamšite °C	Dielektričnost	Faktor gubitaka $\tan \delta$ na 50 Hz	Probojna čvrstoća kV/cm
nisko viskozno	9...10,5 (na 50 °C)	-40	150...170	2,48	$15 \cdot 10^{-4}$ (na 50 °C)	120...125
srednje viskozno	45 (na 20 °C)		≥ 145	2,2	$10 \cdot 10^{-4}$ (na 50 °C)	
visoko viskozno	250...450 (na 50 °C)		250...270	2,35	$175 \cdot 10^{-4}$ (na 80 °C)	120...130

Prema namjeni, i prema tome svojstvima koji se od njih traže, izolacijska mineralna ulja mogu se grubo podijeliti u transformatorska ulja, kondenzatorska ulja i kabela ulja.

Transformatorska ulja zovu se mineralna ulja koja se upotrebljavaju u transformatorima, pretvaračima i sklopovima kao rashladno i izolacijsko sredstvo. To su svijetložute tekućine gustoće 0,86...0,89 g/cm³. Od ulja za transformatore traži se — osim dobrih dielektričnih svojstava izraženih malim faktorom gubitaka $\tan \delta$ — velika kemijska postojanost i mali viskozitet na niskim temperaturama. Kemijska postojanost, napose prema



Sl. 61. Ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ transformatorskog ulja o temperaturi i frekvenciji



Sl. 62. Ovisnost probojne čvrstoće transformatorskog ulja o sadržaju vode na različitim temperaturama

djelovanju kisika iz zraka, kod transformatorskih ulja naročito je važna s obzirom na to da su u pogonu u doticaju s zrakom na temperaturi i do 90 °C i istovremeno u doticaju s metalima koji kataliziraju oksidaciju, te ova može dovesti do stvaranja taloga, koji, kao i drugi oksidacijski produkti, smanjuje dielektričnu čvrstoću ulja. Stupanj nepostojanosti u tom pogledu izražava se porastom kiselinskog broja (sadržaja slobodne kiseline) i količinom taloga u ulju nakon izvrgavanja djelovanju kisika. Radi povećanja otpornosti prema oksidaciji, transformatorskom se ulju često dodaju antioksidansi (npr. *p*-oksidifenilamin ili fenil-*p*-aminofenol). U uljnim sklopovima mineralno ulje slično transformatorskom upotrebljava se za gašenje električnog luča (v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 122). Za te je svrhe važno da

temperaturni koeficijent viskoziteta bude što manji. Kako se mijenjaju relativna dielektričnost i faktor gubitaka takvih materijala u ovisnosti o temperaturi pokazuje sl. 61. Kako se dielektrična čvrstoća transformatorskog ulja mijenja sa sadržajem vlage prikazuje sl. 62.

Iz transformatorskog ulja se prije stavljanja u transformator, sklopku itd. vakuumskim sušenjem uklone vlaga i zrak (i/ili drugi plinovi), koji smanjuju dielektričnu čvrstoću (v. str. 75). U toku rada uređaja u kojemu se nalazi transformatorsko ulje nastaje tzv. *starenje* tog ulja, tj. pod djelovanjem vlage i kisika, te električnog i magnetskog polja poraste mu sadržaj slobodnih kiselina (kiselinski broj) i faktor dielektričnih gubitaka, a smanjuje se dielektrična čvrstoća. Stoga treba, prema propisima, svojstva transformatorskog ulja u pogonu stalno kontrolirati i punjenje transformatorskog ulja periodski obnavljati. Upotrijebljeno ulje se (u velikim pogonima) redovito regenerira fizikalnim i kemijskim postupcima. Fizikalni se postupci sastoje u zagrijavanju, filtriranju, centrifugiranju i sušenju, a kemijski su slični postupcima rafinacije destilacijskih frakcija zemnog ulja.

Kondenzatorsko ulje služi kao dielektrik u kondenzatorima industrijske i visoke frekvencije, osobito visokonaponskih i velikog kapaciteta. Njime se impregnira papir kojim su takvi kondenzatori izolirani. Kondenzatorsko ulje mora biti dobro rafinirano, postojano prema izdavanju plinova pri ionizaciji, mora imati visoku dielektričnu čvrstoću i dobra antikorozijska svojstva. Gustoća na 20 °C iznosi mu 0,9 g/cm³.

Kabela ulja. Zahtjevi koji se postavljaju u pogledu svojstava uljima koja se primjenjuju za izolaciju papirnih kabela ovise o vrsti kabela i o nazivnom naponu. Za impregnaciju izolacija kabela napona do 35 kV upotrebljava se mineralno ulje velikog viskoziteta s dodacima za dalje povećanje viskoziteta, po pravilu 15...25% kolofonija (koji mora sadržavati što manje oksisiselina da pri starenju izolacijska svojstva ne bi prebrzo opadala; za povećanje viskoziteta izolacijskog ulja upotrebljavaju se danas i polimerizati kao što su polivinileter i polizobutilen). Za impregniranje izolacije i punjenje visokopritisnih uljnih kabela napona 110 kV i više (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 240) upotrebljavaju se kabela ulja srednjeg viskoziteta, a za niskopritisne uljne kabele (do 3 at) ulja malog viskoziteta.

Masna ulja. Osim u vrlo rijetkim slučajevima, masna ulja upotrebljavaju se kao izolacijski materijali samo posredno, kao komponente nekih složenih izolacijskih materijala, uglavnom veziva izolacijskih lakova (v. dalje). Od masnih ulja koja se upotrebljavaju za te svrhe najvažnija su sušiva ulja, tj. ulja koja izložena djelovanju zraka i svjetla očvršćavaju i to, u dovoljno tankim slojevima, razmjerno brzo. Pri tome se radi o procesima polimerizacije uz oksidaciju (o polimerizaciji v. str. 86). Očvršćavanje sušivih ulja pospješava se katalizatorima, tzv. sikativima, među kojima su najvažniji kobaltne, olovne i manganske soli masnih ili smolnih kiselina. Dobiveni očvrstnuti filmovi imaju dobra dielektrična svojstva i postojani su prema djelovanju većeg broja otapala, vode i topline. Važnu ulogu među sušivim uljima imaju, osim lanenog i drvnog (tung-) ulja, i ulja dobivena toplinskom obradom ricinusovog ulja.

Klorirani ugljikovodici. Od velikog broja kloriranih ugljikovodika kao izolacijski materijali upotrebljavaju se samo neki proizvodi kloriranja difenila $C_6H_5 \cdot C_6H_5$, najviše pentaklor-difenili (obično smjesa različitih klor-difenila), koji dolaze na tržište pod nazivima Clophen, Pyralen, Sovol i dr.

Glavna je njihova prednost pred mineralnim uljima što su nezapaljivi. Stoga se najviše upotrebljavaju kao rashladna i izolacijska sredstva transformatora i pretvarača tamo gdje propisi

o vatrozaštiti ne dopuštaju upotrebu mineralnih ulja. Smetnje koje bi pri tome mogao uzrokovati veliki viskozitet tih kloriranih ugljikovodika (500 cSt na 50 °C) eliminiraju se time što se razrjeđuju triklorbenzenom. Viskozitet takvih smjesa je ~14 cSt na 38 °C, stišće -37 °C, relativna dielektričnost 4,5...5, $\tan \delta$ 0,015, probojna čvrstoća slična kao i kod mineralnih ulja, a specifični električni otpor niži. Klorirani ugljikovodici ne oksidiraju se i ne polimeriziraju, te praktički ne stare. Glavni nedostatak ovih tvari kao transformatorskih ulja jesu njihova velika gustoća (1,4...1,55 kg/dm³), zbog čega kućišta transformatora moraju imati deblje zidove, agresivnost (zbog čega je, među ostalim, ograničen broj čvrstih izolacijskih materijala koji se zajedno s njima smiju upotrebljavati) i razvijanje para štetnih za zdravlje.

Dibutil-sebacat upotrebljava se kao dielektrikum kondenzatora za visokofrekvencijsko grijanje, naročito u USA.

Voskovi, bitumeni i prirodne smole

Voskovi. Voskovima se naziva niz kemijski sasvim raznorodnih tvari kojima su neka fizikalna svojstva slična svojstvima pčelinjeg voska. Mogu se podijeliti na voskove koji su proizvod metabolizma organizama, mineralne voskove i sintetske voskove. Kao izolacijski materijali uglavnom se upotrebljavaju samo voskovi iz posljednje dvije skupine. (Pčelinji vosak se nešto malo upotrebljava kao ljepilo u tehnici visokih frekvencija i kao komponenta stanovitih zaljevnih masa.)

Mineralni voskovi ili se dobivaju rafinacijom viših frakcija destilacije mazuta na sličan način kao i izolacijska ulja (takvi proizvodi nalaze se u trgovini pod nazivom *parafin*) ili se nalaze u prirodi kao mineral ozokerit, nastao također iz nafte. Kao samostalni izolacijski materijal dolaze u obzir isključivo proizvodi rafinacije ozokerita zvani *cerezin*.

Talište parafina je između 50 i 55 °C, cerezina nešto više (65...80 °C). Dielektričnost i $\tan \delta$ parafina mali su, a specifični otpor mu je velik. Slična električna svojstva ima i cerezin. Međutim, kemijska postojanost cerezina veća je nego parafina.

Voskovi služe kao sredstva za impregnaciju, naročito papira za papirne kondenzatore, također za zaštitne prevlake koje odbijaju vodu i otporne su prema kemikalijama i za zalijevanje izolacija (ponekad samostalno, a većinom kao sastojak zaljevnih masa).

Zaljevne mase (kompoundi) taljive su smjese kojima se ispunjavaju šupljine u izolacijama ili izoliraju i zaštićuju od vlage i prašine još neizolirani vodiči u kabelskim glavama i spojkicama. Sastoje se većinom od bitumena i smola, kojima se dodaju voskovi, mineralna ulja i sintetski omekšivači (često također kvarčni pijesak, azbest ili tinjac).

Za izolacijske svrhe parafin se prerađuje i kloriranjem. Klorirani parafin upotrebljavaju se kao čvrsti impregnanti dielektrika kondenzatora.

Među mineralne voskove ubraja se i tzv. *montan-vosak*, u stvari bitumen mrkog ugljena, iz kojeg se dobiva ekstrakcijom otapalima. Upotrebljava se u radio-tehnici za impregniranje nekih elemenata.

Opći nedostatak prirodnih voskova kao izolacijskih materijala jesu razmjerno velike kontrakcije njihovog obujma pri očvršćavanju i hlađenju i niske dopuštene radne temperature. Zbog toga ih sve više istiskuju iz upotrebe impregnanti od umjetnih smola.

Sintetski voskovi. Parafin i cerezin priređuju se i sintetski. Osim njih za slične svrhe upotrebljavaju se i neki drugi sintetski voskovi koji se u trgovini nalaze pod komercijalnim nazivima kao što su Halovaks, Nibren, Oleovaks. Halovaks i Nibren su klorirani naftalini; nezapaljivi su, ne oksidiraju i ne podliježu starenju. Kao polarne tvari imaju lošija dielektrična svojstva od mineralnih voskova, a zbog višeg tališta moraju se prerađivati na znatno višim temperaturama. Oleovaks, koji se dobiva hidrogenacijom ricinusovog ulja, ima još lošija dielektrična svojstva, te se upotrebljava za impregnaciju dielektrika manje točnih kondenzatora.

Bitumeni (v. članak *Bitumen*, TE 2, str. 40) imaju relativnu dielektričnost od 2,5 do 3, faktor gubitaka $\tan \delta$ oko 0,01 (na sobnoj temperaturi; do ~80 °C s temperaturom se malo mijenja), specifični električni otpor $10^{13} \dots 10^{14} \Omega \text{cm}$, dielektričnu čvrstoću 10...30 kV/mm. Nepropusni su za vodu i postojani prema njezinom djelovanju, te su im električna svojstva neovisna o vlažnosti okoline. Zbog toga su se nekad mnogo upotrebljavali izravno za zalijevanje kabelskih izolacija i armatura; danas su sastojci zaljevnih masa i složenih izolacija, posebno izolacijskih lakova; upo-

trebljavaju se također za zalijevanje elektrolitskih kondenzatora, suhih članaka, akumulatora, i sl. Suvremeni sintetički materijali jako su im ograničili primjenu.

Prirodne smole. Pod izrazom »smole« razumijeva se niz kemijski raznorodnih tvari kojima su zajednička svojstva da su sastavljene od vrlo velikih molekula (molekulska težina ~100 000 i više), te da postoje u plastičnom stanju unutar vrlo širokog područja temperatura između 20 i 150 °C. U prirodi su takve stvari nastale kao proizvodi metabolizma biljnih i životinjskih organizama. (Za umjetne smole, v. niže.) Od ovih materijala za elektrotehniku najvažniji su šelak i kolofonijum, koji spadaju u skupinu recentnih smola (tj. smola koje su proizvod metabolizma postojećih organizama). Međutim, stanovitu važnost imaju i neke fosilne smole (smole koje su nastale u prošlosti kao proizvod metabolizma davno izumrlih vrsta), i recentno-fosilne smole (smole nastale od biljaka izumrlih u ne tako dalekoj prošlosti, ili od njima sličnih koje još žive). Takve su smole jantar i kopali.

Šelak se dobiva iz izlučina (tzv. gumilaka) jedne vrste kukaca koja živi na nekim tropskim stablima. Gumilak se skida s grana i lišća tih stabala; iz njega se čišćenjem i pretaljivanjem dobiva šelak kao tanki, tvrdi i kruti listići žućkaste do tamnonarančaste boje. Na 35 °C šelak počinje mekšati, između 50 i 60 °C postaje plastičan, a talište mu je oko 80 °C. Obično između 140 i 150 °C u njemu nastupaju reakcije polimerizacije uslijed kojih konačno prelazi u netaljiv i netopljiv oblik. Na sobnoj temperaturi faktor dielektričnih gubitaka mu je oko 0,01 (na ~70 °C ima maksimum od 0,10), dielektričnost ~3,5, a dielektrična čvrstoća 20...30 kV/mm. Na višim temperaturama i ta su mu svojstva znatno lošija.

Šelak najviše služi za vezivo tinjčevih papira otpornih prema djelovanju topline do 130 °C, odnosno 105 °C (v. str. 78). Upotrebljava se i kao vezivo laminatâ (slojnih materijala) i za izolacijske lakove koji se suše na zraku te se upotrebljavaju za reparature.

Kolofonij se dobiva iz smola crnogoričnih stabala, poglavito borova, odvajanjem hlapljivih sastojaka (tzv. terpentinskog ulja) destilacijom (v. članak *Drvo, kemijska prerada*, TE 3, str. 452). Izrazito je polaran materijal s dielektričnim gubicima vrlo ovisnim o temperaturi. Dielektrična čvrstoća mu je između 10 i 15 kV/mm, a specifični otpor do $10^{16} \Omega \text{cm}$.

Kolofonij se upotrebljava za ugušćivanje ulja kojima se impregniraju izolacijski papiri energetskih kabela (v. gore) i kao komponenta veziva izolacijskih lakova (v. dalje).

Kopali. Svojstva kopala variraju u vrlo širokim granicama, već prema tome da li imaju svojstva recentnih, recentno-fosilnih ili fosilnih smola. (Općenito su kvalitetniji od kolofonija.) Do drugog svjetskoga rata predstavljali su jednu od najvažnijih smolnih sirovina za proizvodnju lakova općenito, pa tako i izolacijskih. Nakon toga su ih umjetne smole sve više istiskivale iz upotrebe. Danas se već rijetko upotrebljavaju.

Jantar je prvi materijal na kojemu su zapažene električne pojave, pa je elektricitet po njemu i dobio ime (jantar se na grčkom zove *ἤλεκτρον* elektron). Kao izolacijski materijal odlikuje se velikim specifičnim otporom ($10^{18} \Omega \text{cm}$) skoro neovisnim o vlažnosti okoline. Međutim, njegovu primjenu u elektrotehnici jako ograničava njegova visoka cijena. Upotrebljava se npr. za izolacijske stezaljke i (vrlo rijetko) za provodne izolatore elektromotora.

P. Čatoš V. Firinger

Umjetne organske makromolekularne tvari

Umjetne organske makromolekularne tvari su tvari sastavljene od vrlo velikih molekula (molekulske težine po pravilu iznad 100 000), koje se dobivaju ili kemijskom modifikacijom prirodnih makromolekularnih tvari (npr. celuloze, bjelancevina, ugljikovodika, smolâ) ili sintezom. Sve umjetne organske makromolekularne tvari koje se upotrebljavaju kao izolacijski materijali kemijski predstavljaju polimerizate, polikondenzate ili poliadukte, tj. izvode se (modificirane prirodne tvari) ili/i proizvode (sintetske tvari) od spojeva manje molekulske težine polimerizacijom, polikondenzacijom ili poliadicijom.

Polimerizacija je reakcija kojom se molekule jednog određenog spoja (monomera) među sobom spajaju, bez odvajanja drugih (jednostavnih) spojeva i bez premještanja atoma, u velike molekule (makromolekule, polimere), koje uslijed takvog načina nastajanja imaju isti elementarni sastav kao monomer. (Polimerizacija u kojoj učestvuju više različitih monomera naziva se kopolimerizacija.)

Polikondenzacijom naziva se kemijski mehanizam (kemizam) nastajanja makromolekularnih spojeva od spojeva manje molekulske težine putem ponovljenih reakcija kondenzacije, tj. reakcija pri kojima uz makromolekularni spoj nastaju i jednostavni spojevi (npr. voda, amonijak). **Poliadicijom** naziva se kemiizam nastajanja makromolekularnog spoja time što se molekule jednih spojeva manje molekulske težine mnogo puta uzastopce adiraju uz premještanje atoma na molekule drugih takvih spojeva. Pri sintezi makromolekularnih tvari polimerizacijom nastaju lančaste molekule (linearni polimeri) koje, kad se lanac monomera kod određene duljine prekine, ne mogu dalje rasti; polikondenzacijom nastaju ispočetka lančaste molekule, koje se daljom kondenzacijom mogu račvati i obrazovati prostorne mreže. Polikondenzacija se može provesti postepeno: ona se može u bilo kojem stadiju prekinuti i pod pogodnim uvjetima nastaviti nakon izolacije međuprodukta. Poliadiacija je u neku ruku po srijedi između polimerizacije i polikondenzacije: poput polimerizacije odvija se bez izdvajanja jednostavnih spojeva, a poput polikondenzacije može se po želji prekinuti i opet nastaviti, tj. provesti u stupnjima.

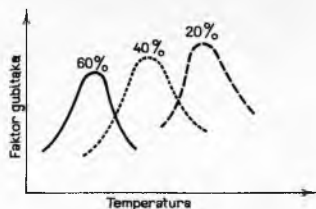
Prema svome mehaničkom, termičkom i/ili kemijskom ponašanju, umjetni se organski makromolekularni materijali mogu podijeliti na termoplastične (*termoplaste*), termoreaktivne ili duroplastične (*duroplaste*) i elastične (*elastomere*). Makromolekularni spojevi lančaste strukture (dakle u prvom redu proizvodi polimerizacije i poliadiacije, ali i neki proizvodi polikondenzacije) jesu termoplastični; oni su na običnoj temperaturi čvrsti, a grijanjem prelaze u plastično stanje reverzibilno, tj. mogu se nekoliko puta grijanjem omekšati i hlađenjem opet skrutnuti. Mnogi proizvodi polikondenzacije su termoreaktivni, tj. uslijed toga što im se napredovanjem reakcije makromolekule sve više račvaju i na kraju obrazuju prostornu mrežu, one prolaze pri grijanju ireverzibilno, preko faze u kojoj su plastične ili tekuće, u nepromijenljivo čvrsto stanje. Budući da se reakcije polikondenzacije mogu provesti u stupnjima, duroplasti mogu se proizvesti u tekućem ili termoplastičnom stanju, u tom stanju preradivati i poluproizvod onda nastavkom reakcije prevesti u čvrsto netaljivo stanje. Neki prirodni ili umjetni linearni polimeri mogu se kemijskim procesom zvanim vulkanizacijom ireverzibilno prevesti u stanje velike elastičnosti; takvi se polimeri (npr. prirodni kaučuk) ili proizvodi dobiveni iz njih vulkanizacijom (elastične gume) nazivaju elastomerima (elastima).

Svi se polimeri, polikondenzati i poliadikti u nekom stadiju njihove proizvodnje ili prerade nalaze u plastičnom stanju, oni su stoga nazvani zajedničkim imenom **poliplasti** [češće se nazivaju, prema anglosaksonskoj terminologiji, **polimerima** (u širem smislu)]. Termoplastični i duroplastični poliplasti nazivaju se zajedničkom imenom **plastomeri** (plast) i time se zajedno stavljaju uz bok elastomerima (elastima).

Osim primarnom strukturom poliplasta, tj. strukturom pojedinih makromolekula, neka njihova svojstva uslovljena su i **sekundarnom strukturom**, tj. više ili manje pravilnim rasporedom jednih makromolekula u odnosu prema drugima. Ako su linearne molekule termoplasta raspoređene nepravilno, on je amorfan, ako su u većem ili manjem broju većih ili manjih (kristalinih) područja makromolekule pravilno raspoređene, on je amorfno-kristalan ili djelomično kristalan. (Uspor. *Bjelančevine*, TE 1, str. 52, sl. 2). Stupanj kristalnosti djelomično kristalnog polimera ovisi o uvjetima njegove proizvodnje i obrade, a raspored makromolekula u kristalima ovisi o temperaturi i o konformaciji makromolekule (rasporedu atoma i atomskih grupa u njoj). Što je stupanj kristalnosti plastomera veći to je veća njegova gustoća i čvrstoća, to je viša temperatura taljenja i manji temperaturni interval unutar kojeg je plastičan. Kristalnost polimera ima znatan utjecaj i na njegova električna svojstva.

Neki amorfni poliplasti (amorfni termoplasti, te duroplasti i elastomeri u plastičnom stadiju) koji se upotrebljavaju za proizvodnju lakova, masa za prešanje, sintetskih ljepljiva, vlakana, elastomera i sl. nazivaju se **umjetnim ili sintetskim smolama**.

Dielektrična svojstva poliplasta ovise o njihovoj **polarnosti**. Prema dielektričnom ponašanju u izmjeničnom električnom polju mogu se, naime, poliplasti podijeliti na polarne i nepolarne, tj. na poliplaste koji u svojim makromolekulama imaju polarne grupe (dipole) i poliplaste koji ih nemaju. Polarni poliplasti su dielektrici koji u izmjeničnom električnom polju uzrokuju dielektrične gubitke. Svaki takav poliplast pokazuje u ovisnosti o frekvenciji, ili na danoj frekvenciji u ovisnosti o temperaturi, karakterističnu promjenu faktora gubitaka



Sl. 63. Faktor dielektričnih gubitaka tan δ omeškano polivinilklorida u ovisnosti o temperaturi i sadržaju omeškivača na konstantnoj frekvenciji (što je sadržaj omeškivača veći to je pokretljivost dipola veća)

tan δ , s maksimumom koji je već prema broju, vrsti i pokretljivosti dipola više ili manje izražen. Kako pokazuje sl. 63, na danoj frekvenciji maksimum faktora gubitaka je na to nižoj temperaturi što je dipol pokretljiviji. (Smanjivanjem pokretljivosti dipola pogodnom izmjenom sastava poliplasta mogu mu se dakle poboljšati dielektrična svojstva.) Zbog takvih dielektričnih svojstava, polarni se poliplasti u visokofrekvencijskoj tehnici mogu primijeniti samo u iznimnim slučajevima. Za primjenu u tom području postoje mnogi nepolarni termoplasti, koji pokazuju vrednotno mali i o frekvenciji neovisni faktor gubitaka tan δ , ali je broj nepolarnih duroplasta još mali.

Konačno se plastomeri mogu podijeliti prema spojevima od kojih se izgrađuju njihove makromolekule. Podjela najvažnijih plastomera koji se upotrebljavaju u elektrotehnici kao izolacijski materijali prikazana je u tablici 17. (Za elastomere v. iduće poglavlje.)

Iz tablice 17 razabire se također kako se u njoj navedeni plastomeri svrstavaju prema gore navedenoj podjeli na polimerizate, polikondenzate, poliadiкте i modificirane prirodne materijale.

Na termoplaste i duroplaste dijele se ti plastomeri ovako: svi su polimerizacijski plastomeri i modificirane celuloze termoplastični, od polikondenzacijskih plastomera termoplasti su neke anilinformaldehidne smole (za razliku od svih drugih navedenih aminoplasta), polietilentereftalat i polikarbonati (za razliku od svih drugih navedenih poliesteri) i poliamidi. Svi ostali navedeni polikondenzati su duroplasti. Poliuretani, najvažniji adicijski plastomeri, termoplastični su kad imaju lančaste molekule, a duroplastični kad su im molekule umrežene.

Od termoplasta navedenih u tabl. 17, polietilen, polipropilen i polimeri halogenima polisupstituiranih derivata etilena, te poliformaldehid, poliamidi, polikarbonati i derivati celuloze su djelomično kristalni; polizobutilen, polimerizati monosupstituiranog etilena (vinilnih spojeva), polimetilakrilat i anilinformaldehidna smola su amorfni.

Nepolarni su plastomeri polietilen, polipropilen, polizobutilen, politetrafluoretilen i polistiren. Nepolarni duroplast je kopolimer stirena s divinilbenzenom (stiren koji je »umrežen« divinilbenzenom, tj. duroplast koji nastaje time što divinilbenzen poprečno spaja mostovima linearne makromolekule polistirena i tako stvara umreženu strukturu). Ostali u tablici navedeni plastomeri su polarni.

Činjenica da gotovo nema nepolarnih duroplasta, naročito da nema nepolarnih poliplasta koji se mogu preradivati lijevanjem, u elektrotehničkoj se praksi osjeća kao velik nedostatak. Zanimljivo je u toj vezi spomenuti da je u posljednje vrijeme pronađen još jedan duroplast koji, istina, nije jako postojan na povišenoj temperaturi, ali ima odlična dielektrična svojstva. To je jako umrežen polibutadien, dakle čisti ugljikovodik bez polarnih grupa.

U daljem izlaganju izloženi su ukratko kemijski sastav i način proizvodnje plastomera navedenih u tabl. 17. (O tome više v. u člancima *Plastomeri i Umjetne smole*.)

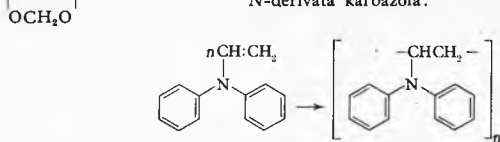
Polimerizati alkena (poliolefini). **Polietilen**, $[-CH_2CH_2-]_n$. Postupci proizvodnje polietilena iz etilena $CH_2=CH_2$ mogu se podijeliti u dvije grupe: postupke polimerizacije pod visokim tlakom i postupke polimerizacije pod niskim tlakom. Proizvodi tih dviju grupa postupaka, visokotlačni polietileni i niskotlačni polietileni, imaju različitu strukturu i zbog toga različita svojstva: visokotlačni polietileni imaju razgranatu strukturu i stoga manju gustoću i niži stupanj kristalnosti (~80%), savitljiviji su i omekšavaju na nižoj temperaturi; niskotlačni polietileni imaju pretežno linearnu strukturu i uslijed toga veću gustoću i viši stupanj kristalnosti (~90%), kruti su i omekšavaju na višoj temperaturi. — **Polipropilen**, $[-CH(CH_3)CH_2-]_n$, proizveden polimerizacijom propilena $CH_3CH=CH_2$; tehnički je upotrebljiv samo ako je pomoću tzv. stereospecifičnih katalizatora dobiven s izotaktičnom strukturom, tj. s linearnim makromolekulama kojima se sve bočne grupe CH_3 nalaze s iste strane ravnice lanca. Zbog takve pravilne steričke strukture izotaktički polipropilen je kristalan, razmjerno teško taljiv, žilav, krut i površinski tvrd. — **Polizobutilen**, $[-CH_2C-$

Tablica 17
PLASTOMERI UPOTREBLJAVANI KAO ELEKTRIČNI ISOLACIJSKI MATERIJALI

Polimerizati			Polikondenzati					Poliadukti	Modificirani prirodni spojevi
Polimerizati nezasićenih ugljikovodika	Polimerizati vinilnih i metakrilnih estera i acetalata, te N-supstituiranih vinilnih derivata	Polimerizati halogeniranih etilena	Polikondenzati fenola i formaldehida (fenoplasti)	Polikondenzati amida i amida s formaldehidom (aminoplasti)	Plastomeri na bazi etera	Plastomeri na bazi estera	Poliamidi i polimidi	Poliuretani	Derivati celuloze
Polietilen Polipropilen Polizobutilen Polistiren	Polivinilacetat Polimetilmetakrilat Polivinilformal Polivinilkarbazol	Polivinilklorid Politetrafluoretilen Polimonoklorotrifluoretilen	Fenolformaldehidne smole	Karbamidne smole Melaminske smole Dicijandiamidne smole Anilinske smole	Epoksidne smole Poliformaldehid Polifenileno-oksidi Polisulfoni	Nezasićeni poliesteri Polietilentereftalat Alkidne smole Polikarbonati	6,6-poliamid 6,10-poliamid 6-poliamid Polimidi Poliesterimidi	Linearni poliuretani Umreženi poliuretani	Nitrat celuloze Acetat celuloze Propionat celuloze Acetobutirat celuloze Etilceluloza Cijanotilceluloza

$(CH_3)_2C=CH_2$ dobiva se polimerizacijom izobutilena $CH_3C(CH_3)=CH_2$, i to, već prema stupnju polimerizacije, u obliku polizobutilenskih ulja, tjestovitih, ljepljivih polizobutilena ili čvrstih kaučuku sličnih polizobutilena. U svim tim oblicima upotrebljavaju se kao izolacijski materijali, često u mješavinama ili kao kopolimerizati s polietilenom, polipropilenom i dr. — **Polistiren (polistirol)** $[-CH(C_6H_5)CH_2-]_n$, dobiva se polimerizacijom stirena (fenil-etilena ili vinilbenzena) $C_6H_5CH=CH_2$. Jedan je od najvažnijih poliplasta s mnogostranom primjenljivošću u čistom obliku ili kao sastojak različitih kopolimera.

Polimerizati vinilnih i metakrilnih estera i acetata, te N-vinilnih derivata. Od tih plastomera, samih ili kao sastojaka kopolimera, najveću primjenu kao električni izolacijski materijali dobili su **polivinilacetat**, polimer vinilacetata, tj. estera vinilnog alkohola i octene kiseline; **polimetilmetakrilat**, polimer metil-metakrilata $CH_2=C(CH_3)COOCH_3$, tj. estera metilalkohola i metakrilne kiseline [α -metil-akrilne kiseline, $CH_2=C(CH_3)COOH$]; **polivinilformal**, tj. proizvod acetalizacije polivinilalkohola formaldehidom, $[-CH_2CHCH_2CH(OCH_3)-]_n$; **polivinilkarbazol**, polimer vinilkarbazola, tj. vinilnog N-derivata karbazola:



Budući da vinilalkohol $CH_2=CHOH$ ne postoji kao monomer, (reakcije kojima bi morao nastati daju izomerni acetaldehid CH_3COH), polivinilalkohol (sirovina za dobivanje polivinilformala i dr.) dobiva se hidrolizom polivinilacetata, a vinilacetat, iz kojeg se polimerizacijom dobiva polivinilacetat, proizvodi se adicijom octene kiseline na acetenil. Polimetilmetakrilat i polivinilkarbazol dobivaju se polimerizacijom monomera, metilmetakrilata, odn. N-vinilkarbazola.

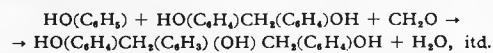
Polimerizati halogeniranih etilena. **Polivinilklorid**, $[-CH_2CHCl-]_n$, plastomer je koji se u najvećim količinama proizvodi i jedan je od najvjestranije primjenljivih. Dobiva se polimerizacijom vinilklorida $CH_2=CHCl$, a ovaj se dobiva adicijom klorovodika na acetenil ili kloriranjem etilena. Sastojak je i mnogih kopolimera. — **Politetrafluoretilen** (najpoznatije trgovačko ime mu je Teflon), $[-CF_2CF_2-]_n$, ide među organske spojeve koji su najpostojaniji prema visokim temperaturama. Zbog toga i zbog njegove dobre kemijske otpornosti i dobrih električnih svojstava najvažniji je polimer fluoriranih olefina. Proizvodi se polimerizacijom monomera, tetrafluoretilena $CF_2=CF_2$. — **Polimono- i difluoretilen (politrufluoretilen)**, $[-CF_2CFCl-]_n$, može se, za razliku od politetrafluoretilena, bez daljeg preradivanja općenito primijenjenim metodama industrije plastičnih masa i tvrdi je od politetrafluoretilena, ali nije toliko otporan prema temperaturi i prema kemijskim utjecajima; ipak je još uvijek u tom pogledu otporniji nego drugi plastomeri. Dobiva se polimerizacijom monomera $CF_2=CFCl$.

Polikondenzati fenola i formaldehida [fenol(formaldehid)ne smole, fenoplasti] nastaju polikondenzacijom fenola — najčešće običnog fenola (monohidroksibenzena) ili krezola — s jedne strane, i formaldehida s druge strane, u prisutnosti kiseli ili baznih katalizatora. Svojstva nastalih smola ovise, osim o prirodi polaznih tvari, poglavito o stupnju i načinu polikondenzacije, a ti, opet, ovise o omjeru u kojem se miješaju komponente, o vrsti katalizatora, o temperaturi i o trajanju reakcije. Kondenzacijom u kiselj sredini uz višak fenola nastaju linearni polikondenzati, tzv. **novolak**, termoplastične smole topljive u organskim otapalima (otopina u alkoholu poznata je kao bakelitni lak), koje služe kao zamjena za šelak i manila-kopal u proizvodnji lakova. Grijanjem mješavine novolaka s heksametilentetraminom (tvari koja djeluje kao smjesa formaldehida i amonijaka) daljom kondenzacijom postaje smola termoreaktivna i brzo otvrdne. Mješavina novolaka s heksametilentetraminom predstavlja osnovu nekih masa za prešanje. Polikondenzacija u **alkalnoj sredini** uz višak formaldehida dovodi do termoreaktivnih smola. Smole razmjerno male molekulske težine koje nastaju u prvom stadiju polikondenzacije, zvane **rezol**, topljive su u alkoholu (špiritu), i već prema omjeru komponentata i uvjetima reakcije, čvrste su ili tekuće. Rezoli grijanjem prelaze ireverzibilno najprije u plastične **rezolite** i konačno u nepastične krute i tvrde **rezite**, netopljive u otapalima. (Dobiveni se materijal običava nazivati bakelit.)

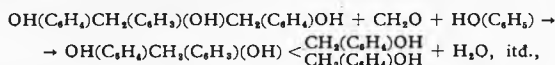
Kemijskim reakcijama fenola s formaldehidom obrazuju se između molekula fenola mostovi različitog sastava (u rezitima pretežno metilenski mostovi $-CH_2-$, pored metilenskih $-CH_2OCH_2-$, etilenskih $-CH_2CH_2-$ i dr.):



Nastavkom te reakcije formaldehida s daljim monomernim molekulama fenola i samo krajnjim fenolnim jezgrom lanaca (tj. u prisutnosti viška fenola) nastaju linearni makromolekule:

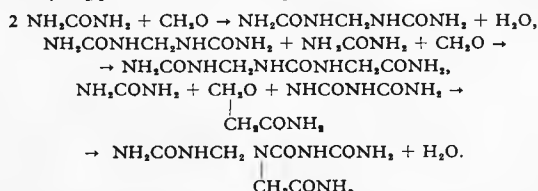


Reakcijama formaldehida s fenolom i kako s krajnjim tako i s drugim jezgrama lanaca (tj. kad nema viška fenola) nastaju razgranate makromolekule:



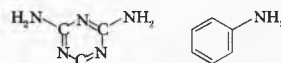
a ako formaldehid obrazuje mostove između makromolekula (u prisutnosti viška formaldehida), nastaju umrežene strukture.

Polikondenzati aminā i formaldehida (aminoplasti). Reakcijom između aminske (također amidne) grupe aminske komponente, s jedne strane, i formaldehida, s druge strane, obrazuju se mostovi te nastaju linearne, razgranate i umrežene makromolekule (analogno kao u fenoplastu), npr. s karbamidom $CO(NH_2)_2$ kao aminskom komponentom:



Prema aminskoj komponenti danas se razlikuju **karbamidne** (ureaformaldehidne), **melaminske**, **uretanske**, **sulfonamidne**, **cijanamidne** ili **dicijanamidne** i **anilinske smole**. Kao izolacijski materijali u elektrotermici upotrebljavaju se

prvenstveno **karbamidne**, **melaminske**, **dicijanamidne** i **anilinske smole**. [Melamin je heterociklički amin strukture (I), dicijanamid je cijanski derivat gvanidina $NH:C(NH_2)_2$, tj. $NH:C(NH_2)NHCN$, a anilin je fenilamin (II)]:



Čiste anilinske smole zauzimaju među aminoplastima odvojeno mjesto time što kao konačni proizvod mogu biti i termoplastične. Polikondenzacijom u prisutnosti velikog viška formaldehida mogu se dobiti i termoreaktivne anilinske smole, ali se one upotrebljavaju samo kao sastojak kopolimerizata s fenol-formaldehidnom smolom.

Polieteri i drugi poliplasti na bazi eterā i acetalā su poliplasti u

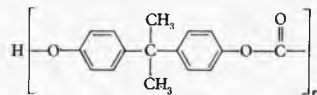
čijim se makromolekulama ponavlja atomska grupa $-C-O-$. Od tih polimera

i smola primjenjuju se kao izolacijski materijali epoksidne ili etoksilinske smole, a u novije vrijeme i poliformaldehid ili polioksimetilen. **Epoksidne smole** dobivaju se kondenzacijom viševalentnog fenola ili alkohola (najčešće difenilolpropana $HOCH_2C_6H_4(C_6H_4)_2C_6H_4OH$ ili glikola $HOCH_2CH_2OH$ i glicerola (glicerina) $HOCH_2CH(OH)CH_2OH$ s epiklorhidrinom $CH_2ClCHCl_2$ (v. članak *Epok-*

sidi) u prisutnosti natrijumske lužine. Pri tom nastaju, uz upotrebu viška epiklorhidrina, poglavito linearne molekule sastava $CH_2COHCH_2OR - OCH_2CH(OH)CH_2OR - [n]OCOCH_2CH_2OH$.

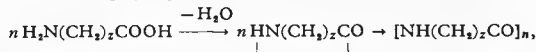
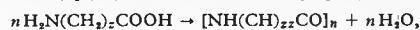
Epoksidne smole su stabilni termoplasti koji se mogu na različite načine modificirati (najčešće se esterificiraju nezasićenim masnim kiselinama) i miješanjem s različitim reagensima (poliadiacijom) ireverzibilno prevesti u tvrdo, nepastično stanje (dvokomponentna ljepila). — **Poliformaldehid**, polioksimetilen, $OH-[-CH_2O-]_n-H$, dobiva se polimerizacijom formaldehida CH_2O ili njegova cikličkog trimer, trioksana. Formalno je sličan polieterima, ali po kemijskom ponašanju odgovara poli-acetalu s acetalnom grupacijom $-CH_2OCH_2OCH_2-$.

Poliplasti na bazi esterā, poliesteri. U lančastim makromolekulama poliesterā ponavlja se esterska grupacija $-C(O)O-$. Dobivaju se općenito polikondenzacijom višebazne kiseline s viševalentnim alkoholom. Prema tome koja je kiselina s kojom alkoholom esterificirana, od kojih se sirovina polazi i na koji se način polikondenzacija provodi, proizvodi se dugi niz poliesterā različitih svojstava; neki se upotrebljavaju u termoplastičnom stanju, drugi se u primjeni otvrdnjavaju djelovanjem topline, poliadiacijom različitih kemikalija, kopolimerizacijom ili djelovanjem kisika iz zraka. Od svih tih poliesterā kao izolacijski materijali u elektrotermici upotrebljavaju se tzv. nezasićeni poliesteri, pa polietilentereftalat, tzv. alkidne smole i polikarbonati. **Nezasićeni poliesteri** su esteri nezasićenih dikarbonskih kiselina (npr. maleinske ili fumarne kiseline $HOOCCH=CHCOOH$) i dvovalentnog alkohola (npr. dietilenglikola $HOCH_2CH_2OCH_2CH_2OH$); taj poliester, gusta tekućina, predstavlja linearni polikondenzat koji se, također nezasićenim, sredstvom za otvrdnjavanje, npr. stirenom, na običnoj ili povišenoj temperaturi, bez tlaka, umrežuje adicijom, tj. bez izdvajanja trećih tvari, u tvrdu, netaljivu masu. — **Polietilentereftalat** $[-OCO-C_6H_4COOCH_2CH_2-]_n$ dobiva se polikondenzacijom iz tereftalne kiseline $HOOC-C_6H_4COOH$ i etilenglikola $HOCH_2CH_2OH$. — **Alkidne smole**, danas u najvećim količinama proizvođene umjetne smole, dobivaju se reakcijom neke polikarbonske kiseline (najčešće ftalne kiseline u obliku njezina anhidrida) s polialkoholom (najčešće glicerolom) i najčešće modificiraju monokarbonskim kiselinama iz prirodnih sušivih, polusušivih i nesušivih ulja; upotrebljavaju se u proizvodnji lakova i lak-boja. Alkidne smole idu u poliesteru koji otvrdnjavaju na zraku. Poliesteri koji se dobivaju polikondenzacijom dikarbonske kiseline s trovalentnim alkoholom (npr. glicerolom) sadrže na krajevima makromolekula hidroksilne grupe, pa se mogu otvrdnjavati poliadiacijom na diizocijanatu. Time nastaju poliuretanski plastomeri i elastomeri koji sadrže esterske grupacije (v. dalje poliuretane). Polikondenzacijom tereftalne kiseline sa smjesom dvo- i viševalentnog alkohola mogu se dobiti duroplastične poliesterne smole. — **Polikarbonati** su polimerizirani esteri ugljične kiseline i organskih dihidroksispoljeva (najčešće dihidroksifenilpropana $HOCH_2C_6H_4(C_6H_4)_2C_6H_4OH$) imaju dakle strukturu:

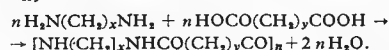


Dobivaju se polikondenzacijom dvovalentnog fenola s fosgenom $COCl_2$ (kloridom ugljične kiseline) u prisutnosti baze koja veže izlučeni klorovodik HCl , ili transesterifikacijom diesterā ugljične kiseline, npr. $OC(OC_6H_5)_2$ (v. *Esteri*).

Poliamidi su plastomeri kojima se u linearnoj makromolekuli ponavlja amidna atomska grupacija $-CONH-$. Dobivaju se a) polikondenzacijom ω -aminokiselina $H_2N(CH_2)_xCOOH$, odn. polimerizacijom njihovih laktama (tj. cikličkih spojeva koji nastaju iz ω -aminokiselina time što im se grupe $-NH_2$ i $COOH$ spoje uz otcjepljenje vode i obrazovanje grupacije $-CONH-$)

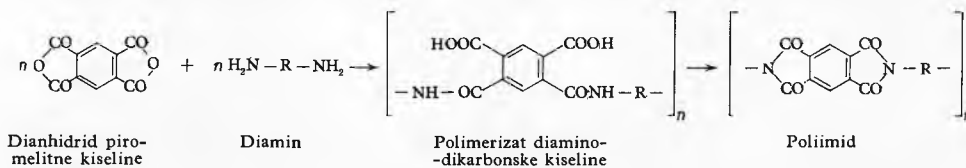


b) polikondenzacijom linearnih diamina $NH_2(CH_2)_xNH_2$ sa dikarbonskim kiselinama $HOC(=O)CH_2CH_2COOH$:



Različiti se poliamidi karakteriziraju brojkama koje znače broj C-atoma u monomernom polaznom materijalu. Pri tom je za karakterizaciju poliamida dobivenih postupkom a) dovoljna jedna brojka $x+1$, a za poliamide dobivene postupkom b) potrebne su dvije brojke, x i $y+2$. Npr. poliamid dobiven iz aminokapronske kiseline ili kaprolaktama ($x=5$) zove se 6-poliamid (Nylon 6), poliamid dobiven od heksametilendiamina i adipinske kiseline ($x=6$, $y=4$) jest 6,6-poliamid (Nylon 6,6), poliamid dobiven iz heksametilendiamina i sebacinske kiseline ($x=6$, $y=8$) zove se 6,10-poliamid ili Nylon 6,10. (Nylon je zaštićeno ime poliamidi koji se mogu upotrebljavati za proizvodnju vlakana i folija.) Aromatski poliamidi dobivaju se iz aromatskih komponentata (dikiselina i diamina) analogno kao alifatski poliamidi iz alifatskih komponentata.

Poliimidi dobivaju se polikondenzacijom nekog dianhidrida polikarbonske kiseline [najčešće dianhidrida piromelitinne kiseline $C_6H_2(COO)_4$] s aromatskim diaminom. Pri tom se najprije na niskoj temperaturi proizvodi polimerizacijom poliamidna kiselina otopljena u organskom otapalu i ta se otopina prerađuje na premake, filmove, ljepljiva itd., a onda se ti proizvodi na visokoj temperaturi otvrdnjavaju unutarnjom kondenzacijom:



Dianhidrid piromelitinne kiseline

Diamin

Polimerizat diaminodikarbonske kiseline

Poliimid

Ako se kao reakcijske komponente upotrebe, s jedne strane (mono-)anhidrid aromatske trikarbonske kiseline [obično trimelitinne $C_6H_3(COO)_3$], po pravilu u smjesi sa tereftalnom kiselinom, a sa druge strane pored aromatskog diamina i poliol (viševalentni alkohol), dobije se proizvod koji sadrži i imidne i esterske grupacije atoma (*poliesterimid*).

Poliuretani (polizocijanati). Uretani su esteri karbaminske kiseline H_2NCOOH ; poliuretani su, prema tome, poliplasti koji u svojim makromolekulama sadrže ponovljene uretanske atomske grupacije ---OCONH--- . Poliadicijom spojeva sa dva aktivna atoma vodika (vodka u grupama ---OH , ---NH_2 i dr.) na neki diizocijanat R(NCO)_2 dobivaju se termoplastični linearni poliuretani, npr. $n \text{ OCN(CH}_2\text{)}_x\text{NCO} + n \text{ HO(CH}_2\text{)}_y\text{OH} \rightarrow \text{---}[(\text{CH}_2)_x\text{NHCOO(CH}_2\text{)}_y\text{OCONH}]_n\text{---}$
 $n \text{ OCN(CH}_2\text{)}_x\text{NCO} + n \text{ H}_2\text{N(CH}_2\text{)}_y\text{NH}_2 \rightarrow \text{---}[(\text{CH}_2)_x\text{NCONH(CH}_2\text{)}_y\text{NHCONH}]_n\text{---}$.

Poliadiraju li se na izocijanate spojevi sa više nego dva aktivna atoma vodika ili poliesteri s aktivnim hidroksilnim grupama (v. gore kod poliesterâ), dobivaju se umreženi uretanski plastomeri i elastomeri.

Derivati celuloze. O tome v. članak *Celulozni derivati*, TE 2, str. 581.

Svojstva plastomera koja su važna za njihovu primjenu u elektrotehnici. Električna svojstva plastomera navedenih u tabl. 17 data su u tablicama 18, 19, 20 i 21: u tabl. 18 i 19 električna svojstva sintetskih termoplastâ (amornih odn. djelomično kristalnih), u tabl. 20 električna svojstva sintetskih duroplastâ, a u tabl. 21 električna svojstva celuloznih derivatâ.

Osim električnih svojstava, za primjenu poliplastâ u elektrotehnici važno je njihovo ponašanje na povišenim temperaturama i pri promjenama temperature, njihova kemijska otpornost, mehanička svojstva, gustoća, trajnost, higroskopnost i ponašanje pod djelovanjem vlage. Budući da su gotovo sva ta svojstva jako ovisna o obliku ispitivanog predmeta, o prethodnom postupku s njime, o načinu kako se ispitivanje izvodi i o vanjskim okolnostima (temperaturi, vlažnosti zraka i sl.), uslovne veličine kojima se ta svojstva karakteriziraju određuju se mahom konvencionalnim metodama pod određenim, većinom standardiziranim uvjetima. (O tome više v. u člancima *Plastične mase* i *Umjetne smole*.) Tako se termičko ponašanje plastomera karakterizira npr. maksimalnom temperaturom kojoj se može izvrnuti uzorak a da, nakon ohlađenja, još zadovoljava određen kriterij (npr. ima još određeni probojni napon, ili određenu čvrstoću).

Najveći nedostatak poliplasta kao izolacijskih materijala jest njihovo *starenje*, tj. sklonost da im se s vremenom ireverzibilno mijenja struktura i time snizuje kvalitet. U mnogim slučajevima starenje poliplasta može se držati pod kontrolom prikladnim načinom primjene, naknadnom toplinskom obradom, i dr. Međutim, pogoršanje kvaliteta uslijed djelovanja vanjskih činilaca (svjetla, topline, kemijskih djelovanja i sl.) ne može se uvijek spriječiti i s njime se mora računati. U mnogim slučajevima otpornost poliplasta prema starenju može se poboljšati dodavanjem prikladnih stabilizatora. Ali kako su ovi pretežno jako polarne tvari, njihova koncentracija u izolacijskim materijalima nužno je ograničena, a time je ograničeno i trajanje njihovog djelovanja.

Prerada poliplastâ. Raznolikošću oblika u kojima se poliplasti mogu podvrgnuti obradi radi primjene u tehnici (kao granulati, prah, pasta, tekućina, otopina, vlakna, folije, tkanine, poluprodukti) i brojnosti tehnoloških postupaka za njihovu preradu (valjanje, ekstrudiranje, toplo oblikovanje, brizganje, prešanje, lijevanje, puhanje, lakiranje, uronjavanje, impregniranje, sinterovanje, omatanje, skidanje strugotine i dr.) poliplasti nadmašuju metale, a pred njima imaju prednost da se mogu preradivati na bitno nižim temperaturama (po pravilu do 160°C , iznimno do 180°C). Prešanje je klasični postupak prerade duroplastâ (masâ za prešanje koje sadrže fenoplaste, aminoplaste te poliesterne i epoksidne smole). Injekci-

onim lijevanjem prerađuju se pretežno termoplastične mase, ali se mogu preradivati i duroplasti. I ekstrudiranjem se prerađuju prvenstveno termoplasti, ali prerada duroplasta tim postupkom postaje sve važnija. Puhanjem se iz termoplastâ, predoblikovanih injekcionim lijevanjem ili ekstruzijom, dobivaju boce, tube, kanisteri itd., također folije. Sinterovanjem se proizvode većinom prevlake (uronjavanjem zagrijanog predmeta u uzvratnu prašinu poliplasta) ili zatvorena šuplja tijela (okretanjem grijanog kalupa u kojem se nalazi prašina poliplasta); osim termoplastâ prerađuju se tako i neki duroplasti (npr. epoksidne smole). Lijevanjem u kalupe prerađuju se bilo umjetne smole i plastmase (fenolne, epoksidne i poliesterne) bilo monomeri (npr. stiren, akrilne smole, vinilkarbazol) koji se u kalupu polimeriziraju. Lijevanjem se iz celuloznog acetata, poliesterne smole i poliamida proizvode folije. Kalandriranje (valjanje) upotrebljava se za proizvodnju polivinilkloridnih folija. U elektrotehnici se postupkom lijevanja oklapaju i zalijevaju dijelovi aparata; uronjavanjem u taline se natapaju namoti, kondenzatori, kabelske glave i prevlače žice zaštitnim slojevima i dr.; impregniranjem tkanina, runa, papira i vlakana dobivaju se izolacijski materijali i, među ostalim, poluprodukti za prešane slojevite materijale; ekstruzijom se nanose na kabele i druge vodove izolacije, ispune i plaševi; prešanjem, brizganjem, izvlačenjem i skidanjem strugotine proizvode se dijelovi električne aparature, itd. U novije vrijeme sve se više upotrebljava proizvodnja izolacija napuhavanjem poliplasta, najčešće fenolformaldehidne i urea-formaldehidne smole, polistirena, polivinilklorida i poliuretana, u pjenu.

U tabl. 22 prikazana je obradljivost pojedinih vrsta poliplastâ glavnim postupcima preradivanja.

Primjena pojedinih plastomera u elektrotehnici navedena je u daljem izlaganju. Uz to su u toj vezi dati podaci o mehaničkim, termičkim i drugim neelektričnim svojstvima tih plastomera.

Polietylen (PE) upotrebljava se poglavito za izolaciju kabela i vodova u visokofrekvencijskoj i visokonaponskoj tehnici, za plaštevne podvodnih kabela, za visokofrekvencijske izolatore i instalacijski materijal.

U novije doba za izolaciju telekomunikacijskih kabela, a i u druge svrhe upotrebljava se pjenasti polietilen, koji ima bolja električna svojstva od kompaktnog. U vidu folija i traka upotrebljava se kao odjeljivač suvremenih izolacijskih materijala kojima vezivo nije potpuno otvrdnuto. Dodavanjem umreživača i ozračivanjem polietilena dobiva se termoplastični materijal, toplinski postojaniji i mehanički čvršći, koji se upotrebljava za

Tablica 18
ELEKTRIČNA SVOJSTVA SINTETSKIH AMORFNIH TERMOPLASTA
(suhih na zraku $20\cdots 25^\circ\text{C}$, rel. vlage $65\cdots 75\%$)

Plastomer	Probojna čvrstoća kV/mm	Spec. otpor Ωcm	Dielektričnost na			Faktor gubitaka $\tan \delta \cdot 10^4$ na		
			10^3 Hz	10^6 Hz	10^{10} Hz	10^3 Hz	10^6 Hz	10^{10} Hz
Poliizobutilen	10	$> 10^{15}$	2,3	2,3	2,3	< 5	< 5	< 5
Polivinilacetat	15 $\cdots$ 20	$> 10^{12}$	3,1	3,0	2,0	50	60	30
Polivinilformal	15 $\cdots$ 25	$> 10^{12}$	3,6	3,0	2,7	70	180	170
Polimetilmetakrilat	15 $\cdots$ 20	$> 10^{15}$	3,2	2,7	2,6	600	150	50
Polivinilklorid	10 $\cdots$ 20	$> 10^{15}$	3,3	3,0	2,8	150	160	70
Polistiren	20 $\cdots$ 30	$> 10^{16}$	2,5	2,5	2,5	< 5	< 5	< 5
Polivinilkarbazol	25 $\cdots$ 30	$> 10^{16}$	3,0	3,0	2,9	10	6	5
Anilin-formaldehidna smola	20 $\cdots$ 25	$> 10^{16}$	3,6	3,5	3,5	30	70	40

Tablica 19
ELEKTRIČNA SVOJSTVA SINTETSKIH AMORFNO-KRISTALNIH TERMOPLASTA
(suhih na zraku $20\cdots 25^\circ\text{C}$, $65\cdots 75\%$ rel. vlage)

Plastomer	Probojna čvrstoća kV/mm	Spec. otpor Ωcm	Dielektričnost na			Faktor gubitaka $\tan \delta \cdot 10^4$ na		
			10^3 Hz	10^6 Hz	10^{10} Hz	10^3 Hz	10^6 Hz	10^{10} Hz
Polietylen	> 20	$> 10^{17}$	2,3	2,3	2,3	< 3	< 3	< 3
Polipropilen	> 20	$> 10^{16}$	2,0	2,0	2,0	< 5	< 5	< 5
Politetrafluoretilen	15	$> 10^{16}$	2,1	2,0	2,0	2	2	< 4
Polimonoklorotrifluoretilen	15	$> 10^{16}$	2,65	2,4	2,3	150	50	40
6,6-poliamid sa 0,2% H_2O	15	10^{14}	3,9	3,4	2,9	150	250	110
sa $\sim 2,5\%$ H_2O	> 10	10^{11}	7,6	3,8	3,0	900	750	100
6,10-poliamid sa 0,2% H_2O	15	10^{14}	5,2	3,7	2,9	150	240	100
sa $\sim 1\%$ H_2O	15	10^{13}	4,5	3,3	2,9	650	400	75
6-poliamid sa 0,2% H_2O	15	10^{14}	5,2	3,7	2,9	150	280	120
sa $\sim 3\%$ H_2O	> 10	10^9	9,2	5,0	3,1	1400	1200	200
Polikarbonat	> 25	$> 10^{14}$	3,2	3,0		5	100	

Tablica 20
ELEKTRIČNA SVOJSTVA PLASTIČNIH MASA OD DUROPLASTA
(suhih na zraku 20...25 °C, rel. vlage 65...75%)

Plastomer (smola)	Punilo	Sadržaj smole %	Probojna čvrstoća kV/mm	Spec. otpor Ωcm	Dielektričnost ϵ na			Faktor gubitaka $\tan \delta \cdot 10^4$ na		
					10 ³ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁶ Hz	10 ³ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁶ Hz
Fenol- formaldehidna smola (novolak)	—	100	> 10	> 10 ¹¹	7...8	5...6	3...4	1000...1500	400...500	300...500
	Drveno brašno	50	> 5	> 10 ¹¹	6...8	5...6	3,5...4	300...800	200...400	400...600
	Tinjac	60...65	> 10	> 10 ¹¹	4,5...5,5	4...5	4...5	200...500	50...150	50...100
	Slojevi papira	40...50	> 5	> 10 ⁸	5...6	4...5	3,5...4	500...1000	300...400	650...750
	Slojevi tkanine	40...50	> 5	> 10 ⁸	6...8	4...6	3...4	800...1200	300...500	400...500
Karbamidna smola	α -celuloza	55...60	10...15	> 10 ¹¹	7...8	6...7	4,5...5,5	350...450	250...360	700...800
Melamin- formaldehidna smola	α -celuloza	55...60	10...15	> 10 ¹¹	6...7	5,5...6	4,5...5	300...400	300...400	400...600
Umreženi poliesteri	—	100	10...20	> 10 ¹¹	4,1...4,4	3,3...3,8	2,7...2,9	50...100	200...600	100...200
	—	100	15...20	> 10 ¹¹	2,5...4,5	3...4	2,5...3,5	100...150	150...400	150...500
	Staklena tkanina	35...40	10...15	> 10 ⁷	4,2...4,8	4,3...4,4	3,5...4	50...75	100...300	250...300
	Staklena tkanina	35...40	10...15	> 10 ⁷	4,5...5,5	4...4,5	3,5...4	50...100	150...300	300...400
Silikonska smola	—	100	> 5	> 10 ¹⁰	2,9	2,9	2,9	70	45	40
	Stakleno brašno	15	10...15	> 10 ⁹	3,5...4	3,5...4	3,5...4	10...20	15...25	45...55

svih vrsta kabela, kućišta prekidača, poluvodljivih traka i kontraktibilnih navlaka.

Poliptilen ima gustoću 0,92...0,96 kg/dm³, čvrstoća na vlak visokotlačnog polietilena iznosi do 250 kp/cm², niskotlačnog do 400 kp/cm² (istegnute niti su mnogo čvršće), uz istezanje do 700%; talište mu je 105...110 °C, dopuštena najviša temperatura u trajnoj upotrebi 60 °C. Kao nepolarnom materijalu električna svojstva su mu nepromjenljiva u širokom opsegu frekvencija (v. tabl. 19). Na njegovu dielektričnost i kut dielektričnih gubitaka ne utječe ni temperatura ni vlaga.

Trgovačka imena za polietilen niske gustoće jesu: Lupolen (BRD), Mirathen (DDR), Alkathene, Carlona (UK), Lacetene, Plastylene (F), Fertene, Rumiten (I), Daplen (A), Bralen (CS), Stamylen (NL), Alathon, Dylan, Petrothene (USA). Proizvodi se i u Jugoslaviji i prodaje pod imenom Okiten.

Trgovačka imena za polietilen visoke gustoće jesu: Hostalen G, Vestolene, Lupolen (BRD), Schkopau (DDR), Carlona, Rigidex (UK), Manolene, Natene (F), Naftohin, Rudmeta (BG), Terra (RU), Fortiflex, Hifax, Marlex, Super Dylan (USA).

Polipropilen (PP) upotrebljava se za izolaciju kabela i drugih vodova, te za izradu izolacijskih cijevi, folija i otpresaka.

Polipropilen ima bolja mehanička svojstva i veću kemijsku otpornost od polietilena, osobito na višim temperaturama. Gustoća mu je 0,90 kg/dm³, čvrstoća na vlak do 400 kp/cm² uz istezanje do 700%, talište 165...170 °C, dopuštena najviša temperatura u trajnoj upotrebi 60 °C.

Trgovačka imena za polipropilen jesu, među ostalim: Hostalen (P), Luparen, Vestolen (BRD), Carlona, Propathene (UK), Napryl (F), Poprolin (SSSR), Daplen (A), Moplen (I), Escon, Plascon, Profax (USA).

Poliizobutilen (PIB) ističe se otpornošću prema ozonu, svjetlu i vodi; upotrebljava se za kvalitetne, prema ozonu otporne izolacije kabela, za kabelske plašteve nepropusne za vodenu paru, za elastične zaljevne mase, za samoljepljive izolacijske vrpce i folije, za izolaciju rendgenskih uređaja i uređaja za neonsku rasvjetu.

Prema stupnju polimerizacije mogu se proizvoditi materijali različite konzistencije, kao ulje, ljepljiva masa i dr.

Čvrsti poliizobutilen ima gustoću 0,93 kg/dm³, čvrstoću do 70 kp/cm² uz istezanje do 1200%; najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi 100 °C. Za razliku od polietilena i polipropilena, poliizobutilen je amorfan; stoga se ne može navesti talište.

Poznata trgovačka imena poliizobutilena jesu npr. Oppanol (BRD), Vistanex (USA).

Polistiren (polistirol, PS) upotrebljava se za nosače svitaka (naročito za visokokvalitetne svitke titrajnih krugova), podnoške elektronskih cijevi, dijelova kućišta i aparata, prevučen bakrom kao osnovni materijal za štampane krugove, za izolatore elektrostatičkih mjer-

nih instrumenata i visokofrekvencijsku tehniku. Od specijalnog polistirena otpornog prema udaru prave se akumulatorske posude, izolatorske kape i sl. Poliesterskim folijama izoliraju se televizijski kabeli kao i kabeli mjernih instrumenata; one služe kao dielektrik kondenzatora; polistirenskom pjenom omataju se telefonski kabeli i visokofrekvencijski vodovi.

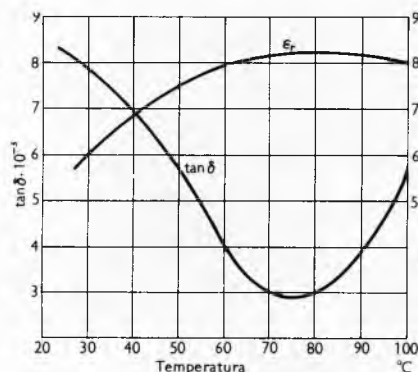
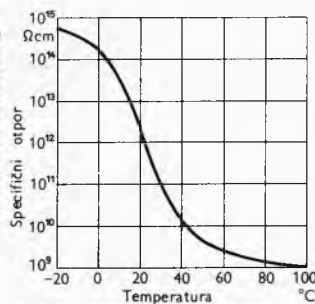
Gustoća mu je 1,06 kg/dm³, čvrstoća na vlak do 600 kp/cm² uz istezanje do 4% (istegnuta vlakna su čvršća i manje krta), najviša temperatura u trajnoj upotrebi: do 75 °C.

Trgovačka imena za polistirenske proizvode jesu: Luran, Styroflex, Styrofol (folije), Styropor (pjena), Trolitul, Vestyron (BRD), Bextrene, Carinex (UK), Edistir, Sicoflex, Sicoستيrol, Stiroplasto (I), Lorkalene, Lacgrene, Afcylene (F), Distrene, Evenglo, Styron, Lustrex, Dylene i dr. (USA). Proizvodi se i u Jugoslaviji i prodaje pod imenom Okinol i Okipor.

Polivinilklorid (PVC) upotrebljava se kao tvrdi PVC, koji sadrži stabilizatore, punila i dodatke za olakšanje klizanja pri preradi, i kao meki PVC, koji sadrži također plastifikatore i omekšivače. Mogu mu se dodavati i pigmenti; to se u elektrotehnici iskorištava za obilježavanje vodiča. Tvrdi PVC upotrebljava se u elektrotehnici za izolacijske dijelove, izolacijske cijevi, utikače, priključne letvice, montažne ploče, obloge kućišta i aparature, utorske izolacije u vezi s papirom i prešpanom, izolirajuće međuslojeve, izolacijske vrpce, kabelske glave i zaglavke, magnetofonske vrpce. Mekci PVC upotrebljava se pretežno za izolacije i plašteve kabela i vodova svake vrste u instalacijskoj i telekomunikacijskoj tehnici (ali ne u tehnici nosećih i visokih frekvencija) za napone do 12 kV; za izradu ljepljivih izolacijskih traka, te kontraktibilnih traka, za utikače, izolirane ručke i drške, i sl. Proizvodi se i specijalni PVC koji podnosi trajno 105 °C i upotrebljava se za izolaciju vodova u toplinskoj klasi A. Temperaturnu ovisnost faktora

Tablica 21
ELEKTRIČNA SVOJSTVA PLASTIČNIH MASA OD MODIFICIRANIH PRIRODNIH SPOJEVA
(suhih na zraku 20...25 °C, rel. vlage 65...75%)

Plastomer	Omekšivač	Omjer plastomer/ omekšivač	Probojna čvrstoća kV/mm	Spec. otpor Ωcm	Dielektričnost ϵ na			Faktor gubitaka $\tan \delta \cdot 10^4$ na		
					10 ³ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁶ Hz	10 ³ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁶ Hz
Dinitrat celuloze	Kamfor	76/24...74/26	> 10	10 ¹¹ ...10 ¹³	7	5	3	400	500	1000
Triacetat celuloze	—	100/0	> 100	10 ¹¹ ...10 ¹⁴	3,8	3,4	3,3	100	250	400
Acetat celuloze, sekundarni	Dietilfitalat	78/22...74/26	15...25	10 ¹⁰ ...10 ¹³	4,73	3,6	3,2	200	425	300
Etilceluloza	Komercijalna mješavina	85/15	15...20	10 ¹¹ ...10 ¹⁴	3,1	2,9	2,7	75	100	250

Sl. 64. Temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ polivinilklorida

Sl. 65. Temperaturna ovisnost specifičnog električnog otpora polivinilklorida omekšanog dioktilftalatom

dielektričnih gubitaka $\tan \delta$ za različite sadržaje omekšivača pokazuje sl. 63.

U dijagramu sl. 64 prikazana je temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora dielektričnih gubitaka $\tan \delta$, a u dijagramu sl. 65 temperaturna ovisnost specifičnog električnog otpora ρ polivinilklorida.

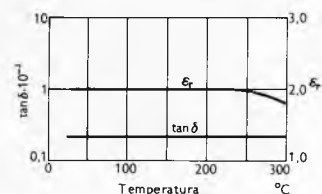
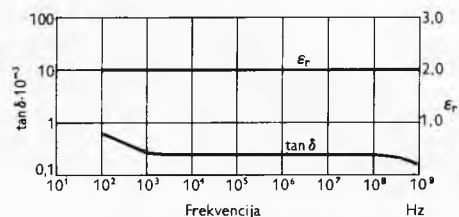
Čisti polivinilklorid ima gustoću 1,38...1,41 kg/dm³; čvrstoća na vlak mu je do 700 kp/cm² uz istezanje do 60% (istegnute folije i vlakna i do 4000 kp/cm², uz istezanje 10...15%), najviša temperatura u trajnoj upotrebi 50 °C. Mekani PVC (npr. omekšan trikrezilfosfatom u omjeru 60 : 40) ima gustoću 1,26...1,28 kg/cm³ uz istezanje do 300%, maksimalna temperatura trajne upo-

utoračke izolacije, za izolaciju vodiča u raketnoj i vojnoj tehnici, kao materijal za brtve i samomazive ležajeve.

Na sl. 66 prikazana je temperaturna, a na sl. 67 frekventijska zavisnost dielektričnosti ϵ_r i faktora dielektričnih gubitaka $\tan \delta$ politetrafluoretilena, kao tipičnog nepolarnog plastomera.

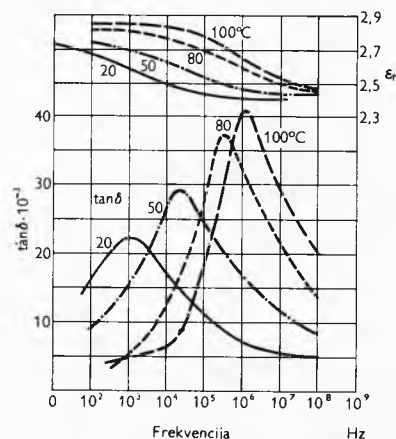
Gustoća politetrafluoretilena iznosi 2,20...2,22 kg/dm³, čvrstoća na vlak do 300 kp/cm² uz istezanje do 400% (jako istegnute folije imaju čvrstoću do 1000 kp/cm²), taljite kristalnog dijela 325...330 °C, najviša dopustiva temperatura u trajnoj upotrebi: 200 °C. Potpuno je nehigroskopan i nezapaljiv, otporan prema kemikalijama i koroni, ima dobra klizna svojstva.

Politetrafluoretilen poznat je najviše pod trgovačkim imenom Teflon (USA). Druga su trgovačka imena Hostafion TF (BRD), Heydeflon (DDR), Fluon (UK), Algoflon (I), Soreflon (F).

Sl. 66. Temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ politetrafluoretilenaSl. 67. Frekventijska ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ politetrafluoretilena

Polimonoklortrifluoretilen (politrifluorkloretilen, PCTFE) upotrebljava se umjesto politetrafluoretilena kad zahtjevi u pogledu termičkih svojstava nisu najveći.

Na sl. 68 prikazana je frekventijska i temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ polimonoklortrifluoretilena, vrlo polarnog plastomera.

Sl. 68. Frekventijska i temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ polimonoklortrifluoretilenaTablica 22
PRERADLJIVOST PLASTOMERNIH MATERIJALA

Plastomerni materijali	Prešanje	Injekciono prešanje*	Injekciono lijevanje	Ekstruzija	Bezdanio lijevanje	Puhanje	Rotaciono lijevanje	Rotaciono sinterovanje	Lijevanje smola u kalupe	Sinterovanje pod pritiskom
Fenolna smola									●	
Fenoplastne mase za prešanje	●	●		●						
Aminoplastne mase za prešanje	●	●		●						
Poliesterska smola									●	
Poliesterske mase za prešanje	●	●	○							
Epoksidne mase za prešanje	●	●								
Epoksidna smola									●	
Polietilen			●		●	●		●		
Polipropilen			●		●	●		●		
Polizobutilen				●						
Polivinilklorid, meki	●	●	●	●	●		●			
Polivinilklorid, tvrdi	●	●	●	●	●					
Poliamid		●	●	●	○			●		
Polikarbonat		●	●	●	○					
Poliformaldehid		●	●	●						
Politetrafluoretilen										●
Polimonoklortrifluoretilen	●	●	●	●	●					
Polistiren		●	●	●	●			●		
Polimetilmetakrilat	●	●	●	●	●					
Acetat celuloze			●	●	●					
Acetobutirat celuloze			●	●	●					

● po pravilu dobro se preradjuje ○ preradjuje se uz određene pretpostavke

*Preradljivost injekcionim prešanjem ovisi o vrsti punila

Gustoća mu je $2,1 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoća na vlak do 400 kp/cm^2 uz istezanje do 200% kad je amorfan, do 550 kp/cm^2 uz istezanje do 30% kad je rekristaliziran. Talište mu je $200\text{--}220^\circ\text{C}$, najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi 120°C . Za razliku od politetrafluoretilena lako se prerađuje (v. str. 91).

Trgovačka imena politetrafluoretilena jesu npr.: Hostafion C (BRD), Ekafluvin (DDR), Voltalet (F), Kel-F, Halon, Aclar, Polyfluoron (USA).

Polivinilformali, kojima točka mekšanja može biti do 230°C , upotrebljavaju se u kombinaciji s fenolnim smolama za proizvodnju žilavih, termički postojanih i u otapalima netopljivih izolacijskih lakova, naročito lakova za izoliranje transformatorskih namota.

Polivinilformal ima gustoću $1,2 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak do 900 kp/cm^2 uz istezanje do 8%.

Trgovačka imena polivinilformala jesu npr. Mowital F, Pioform F (BRD), Rhovinal F (F), Formvar (USA).

Polivinilkarbazol se zbog njegove otpornosti prema toplini i temperaturi, te dobrih električnih svojstava, upotrebljava u elektrotehnici za sastavne dijelove (osobito u visokofrekvencijskoj tehnici) koji su električki i mehanički napregnuti, a izloženi su temperaturama do 170°C . Porozni, naročito celulozni elektrotehnički sastavni dijelovi impregniraju se polivinilkarbazolom tako da se natope rastaljenim monomerom *N*-vinilkarbazolom kojemu je dodato katalizatora, a onda se u porama sadržani vinilkarbazol polimerizira grijanjem.

Polivinilkarbazol ima gustoću $1,19\text{--}1,20 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak do 300 kp/cm^2 uz istezanje 1%. Točka mekšanja mu je 180°C , najviša temperatura trajne upotrebe 150°C .

Trgovačko ime mu je Luvican (BRD).

Polimetilmetakrilat («organsko staklo», PMMA), kao elastično-tvrđi termoplast velike otpornosti prema svjetlosti, starenju i atmosferijama, upotrebljava se za izradu dijelova aparature koji treba da budu i ostanu poput stakla prozirni. Kao izolacijski materijal se zbog skupoće rjeđe primjenjuje. Služi kao plinotvorni materijal u prekidačima (v. *Električni sklopni aparati*, TE 4, str. 129).

Polimetilmetakrilat ima gustoću $1,19 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak do 800 kp/cm^2 uz istezanje do 8%. Najviša temperatura trajne upotrebe je 75°C . Odlikuje se otpornošću prema površinskim kliznim strujama.

PMMA poznat je najviše pod trgovačkim imenom Plexiglas (BRD). Druga trgovačka imena jesu npr.: Plexidur, Resadur, Plexigum (BRD), Piacyl (DDR), Perspex, Transpex, Diacon (UK), Oroglas, Lucite (USA). U Jugoslaviji naziva se Klirit.

Fenoplasti, odn. fenolformaldehidne smole (PF). Čiste fenol-formaldehidne smole (bez punila) upotrebljavaju se u rezolnom stanju, bistre poput stakla, bezbojne ili obojene, kao smole za lijevanje u kalupe, u kojima se grijanjem otvrdnjavaju; u novije vrijeme se u stanju rezitola prerađuju prešanjem; služe i za proizvodnju izolacijskih i impregnacijskih lakova, zaljevnih masa, ljepila, kao vezivo masa za prešanje s punilima i za slojne materijale (laminat). Izolacije od čistih fenol-formaldehidnih smola odlikuju se malom higroskopnošću. U elektrotehnici se fenoplasti upotrebljavaju najviše u obliku masa za prešanje s punilima. Mehanička i termička svojstva tih masa ovise o vrsti i strukturi punila. Električki najkvalitetnije takve mase sadrže 50–55% krezolne smole ($\rho = 10^{11} \Omega\text{cm}$). Otpresci od fenoplasta mogu se proizvesti samo u tamnim bojama, dosta su higroskopni i nepostojani prema puznim strujama. Kao polarni materijali imaju razmjerno visok faktor gubitaka $\tan \delta$. Upotrebljavaju se za instalacijski materijal, dijelove telefonskih aparata, kućišta, za hermetско oklapanje aparata, za ručke sklopnih aparata, dijelove niskonaponskih sklopnih aparata, stezne ploče u telekomunikacijskoj tehnici, podnoške elektronskih cijevi, nosače svitaka.

Čista fenol-formaldehidna smola rezolnog tipa ima gustoću $1,3 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak do 300 kp/cm^2 uz istezanje do 6% (lijevana smola i do 800 kp/cm^2 uz istezanje do 2%). Slojni materijali od papira i 40–50% smole mogu imati čvrstoću na vlak i do 2500 kp/cm^2 i podnose trajno temperaturu $100\text{--}110^\circ\text{C}$.

Fenoplasti su najpoznatiji pod imenom bakelit (prema njihovom izumitelju Leu Baekelandu), mada firma Bakelite tim zaštićenim imenom (uz dodatne oznake) naziva i druge plastomere. Druga trgovačka imena fenoplasta jesu npr. Luphen, Phenodur, Trolon, Corephen, Dekorit, Atephen, Alberit, Beckophen (BRD), Plastadur, Diphen (DDR), Bedesol, Epok, Pioneer (UK), Fluorit (I), Arochem, Arofen, Durez, Phenac, Metholone, Resinox i dr. (USA). U Jugoslaviji dolazi pod imenom Fenoform, Borofen.

Aminoplasti općenito imaju pred fenoplastima prednost (pored toga što se od njih mogu praviti predmeti svjetlijih boja) što na njihovoj površini teže nastaju puzne struje koje vode do karbonizacije; što pod utjecajem električne iskre i luka razvijaju plinove koji ih gase i što su postojanije prema višim temperaturama. Melaminske smole (melamin-formaldehidne, MF) imaju ta svojstva u većoj mjeri nego karbamidne (urea-formaldehidne, UF), pa se stoga više od njih upotrebljavaju, same ili u smjesi s njima, kao smole za lijevanje i kao vezivo masa za prešanje i

laminata, te za proizvodnju pjenastog materijala. Od aminoplastnih masa za prešanje proizvodi se instalacijski materijal, telefonski aparati i drugi otpresci svijetle boje i velike otpornosti prema puznim strujama. Od aminoplasta grade se i lučne komore, a upotrebljavaju se i za izradu lakova. U elektrotehnici upotrebljavaju se i laminat od staklene vune s melaminskom smolom kao vezivom. **Dicijan-diamidne smole** daju mase za prešanje koje se mogu predaivati injekcionim prešanjem, imaju bolja mehanička, termička i električna svojstva od karbamidnih smola i upotrebljavaju se u elektrotehnici u slične svrhe kao drugi aminoplasti, često u smjesi s njima.

Čista melamin-formaldehidna smola ima gustoću $1,48 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak 1000 kp/cm^2 uz istezanje do 1%. Najviša dopuštena temperatura trajne upotrebe: 100°C . Melaminske smole su najtvrdi plastomeri.

Trgovačka imena aminoplasta jesu, npr.: Plastopal, Resamine, Ultrapas, Pollopas, Maprenale (BRD), Meladur, Didi (dicijandiamidni, DDR), Beckuröl, Paralac (UK), Aminolac (F), Plaskon, Beckamine, Melmac, Uformite (USA). U Jugoslaviji imaju nazive Melaform, Uroform.

Anilin-formaldehidne smole upotrebljavaju se za izradu slojnih tvrdih izolacija i masa za prešanje od kojih se prave sastavni dijelovi u radio-tehnici, npr. kondenzatori i otpornici.

Čista anilin-formaldehidna smola (termoplastična) ima gustoću $1,21\text{--}1,22 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak do 800 kp/cm^2 uz istezanje do 2%, najvišu dopuštenu temperaturu u trajnoj upotrebi 80°C . Zbog toga što je manje polarni plastomer, anilin-formaldehidna smola ima znatno bolja dielektrična svojstva od fenoplasta i od drugih aminoplasta.

Trgovačka imena za anilinske smole jesu npr. Cibanit (Švic.), Panilax (UK), Dilectem (USA).

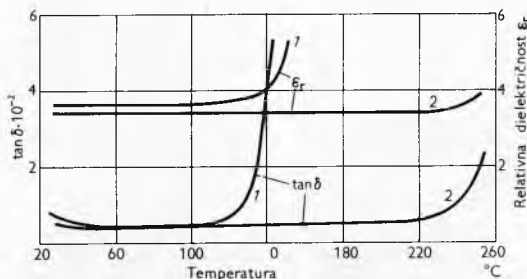
Poliformaldehid (polioksimetilen) noviji je termoplastični materijal koji se krutošću i tvrdoćom približava duroplastima, te se stoga sve više upotrebljava umjesto metalâ, npr. u gradnji automobila. Električna su mu svojstva na visokim i niskim frekvencijama dobra. Faktor gubitaka i dielektrična konstanta su mu mali u širokom području frekvencija, na sobnoj i povišenoj temperaturi. Dobra električna svojstva zadržava i uz veliku vlažnost, štaviše, i nakon uranjanja u vodu. Upotrebljava se za izradu konstrukcijskih dijelova u visokofrekvencijskoj tehnici, za svitke, držače četkica, držače žarulja, utičnice, itd.

Gustoća poliformaldehida je $1,43 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoća na vlak do 800 kp/cm^2 uz istezanje do 20%, tvrdoća mu je nešto manja od tvrdoće melaminske smole, talište $180\text{--}185^\circ\text{C}$, najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi 100°C . Poliformaldehid je nepolarni, termoplastični, velikim dijelom kristalni plastomer.

Trgovačka imena poliformaldehida jesu: Hostaform C (BRD), Kematal (UK), Celcon, Delrin (USA).

Epoksidne (etoksilinske) smole (EP) upotrijebile su se ispočetka kao visokovrijedna dvokomponentna ljepila za metale, porculan, staklo, drvo, tekstil, papir i duroplaste (v. *Ljepila*). (Termoplasti se po pravilu njima ne mogu lijepiti.) Danas se polje njihove primjene znatno proširilo i dalje se širi. U elektrotehnici se epoksidne smole, često s dodatkom punila (kvarcno brašno i pijesak, mljovka, kaolin, mljevena kreda, škrljevac ili porculan) upotrebljavaju najčešće kao smola za lijevanje (npr. za zalijevanje kolektorâ, mjernih transformatora i namotâ motorâ, također osjetljivih naprava i mikroelektroničkih elemenata). Lijevanjem se proizvode npr. potporni izolatori u visokonaponskoj tehnici, upravljačke i sklopne motke visokonaponskih sklopnih aparata, kabela spojnice i glave. U manjoj mjeri se danas upotrebljavaju epoksidne mase za prešanje, naročito za proizvodnju oklopâ bez pukotina na većim metalnim dijelovima i za proizvodnju izolacija točnih dimenzija po mjeri. Proizvode se i epoksidni izolacijski i impregnacijski lakovi za izolaciju vodičâ, impregnaciju namotâ visokonaponskih generatora i motora, te vučnih motora. Epoksidne smole služe i kao vezivo izolacijskih materijala na bazi tinjeva papira, kao vezivo vanjske izolacije visokonaponskih generatora i motora, kao vezivo vanjske i osnovne izolacije vučnih motora, kao vezivo laminata od papira, tekstila, azbesta, staklenih tkanina, hasura i pramena, također tinja. U novije doba epoksidne smole upotrebljavaju se za izradu elektroizolacijskih kitova s različitim punilima, za vanjsku i unutarnju izolaciju, za popravke i za pričvršćivanje instalacijskog materijala na beton i zide. U obliku praha epoksidne smole se primjenjuju za izolaciju strojnih dijelova postupkom sinterovanja (v. str. 60) i elektrostatičkim postupkom (v. str. 47). Pri preradi lijevanjem velika je prednost epoksidnih smola što se njihovo otvrdnjavanje postiže poliacijom, tj. bez razvijanja ili izlučivanja trećih tvari, pa su odjelci kompaktni i homogeni. Kao impregnanti epoksi-smole upotrebljavaju se bez razrjeđivača, što je prednost pred klasičnim impregniranim.

Gustoća epoksidne smole iznosi 1,15...1,30 kg/cm³, čvrstoća na vlak do 800, na tlak do 1300 kp/cm² (sa 200% punila čvrstoća na tlak može biti do 2200 kp/cm²), toplinska postojanost do 140 °C, s anorganskim punilom i do 155 °C. Epoksi-smole su kemijski vrlo otporne, a električna svojstva su im vrlo dobra i, zbog homogenosti strukture materijala, o smjeru naprezanja neovisna. Dielektričnost je 4 (na 90 °C), tan δ na 50 Hz 0,002, na 10¹⁰ Hz 0,02. Temperatura ovisnost dielektričnosti i faktora dielektričnih gubitaka nekih epoksidnih smola prikazana su u sl. 69.



Sl. 69. Temperaturna ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ nekih epoksidnih smola. 1 Araldit CY 205-4T 901, 2 Araldit CY 175-4T 901

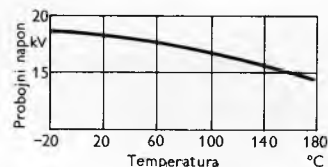
Trgovačka imena za epoksidne smole jesu, npr.: Araldit (Švic.), Epikote (BRD, UK), Epilox (DDR), Scuroil (F), Epon, Epolite, Unox (USA).

Nezasićeni poliesteri su duroplasti koji se mogu otvrdnjavati bez tlaka i bez grijanja, pa se upotrebljavaju kao smole za lijevanje, kao zaljevne smole te (bez otapala i razrjeđivača) za impregnaciju namota elektrotehničkih proizvoda. Cijena im je razmjerno niska. Upotrebljavaju se i kao sastojci masa za prešanje, a ojačani staklenom vunom predstavljaju dobre izolacijske materijale izvanrednih mehaničkih svojstava: mogu postizati čvrstoće istog reda veličine kao metali.

Jedna tipična duroplastična poliesterska smola za lijevanje ima gustoću 1,31 kg/dm³, čvrstoću na vlak do 400 kp/cm² uz istezanje do 2,5%. Najviša dopustiva temperatura u trajnoj upotrebi je 130 °C. Poliesterska smola ojačana paralelnim pramenima staklenih vlakna (50...70%) ima čvrstoću na vlak 2500...10 000 kp/cm².

Neka trgovačka imena za nezasićene poliesterske smole jesu: Palatal, Polyleit, Leguval, Vestopal (BRD), Polyester G (DDR), Estal, Glycodiene, Rhodester (F), Filabond, Hetron, Lamex, Pelastor (UK), Gel-Kote, Glidpol, Plaskon, Sierracin, Vibrin (USA). U Jugoslaviji proizvode se pod imenom Chromoplast.

Polietilentereftalat je termoplast koji se zbog jake tendencije ka kristalizaciji može upotrebljavati samo u istegnutom obliku kao folija ili vlakno. Vrlo elastične, žilave, prema udaru otporne, nehigroskopske i termički neobično postojane folije upotrebljavaju se za kabeleske izolacije, kao sastojci složenih utorskih izolacija i tankih izolacija malih motora, kao dielektrik kondenzatora, za izolaciju vodiča električnih strojeva i transformatora. Vlakna za izolaciju okruglih i profiliranih vodiča uspješno zamjenjuju staklena vlakna do toplinske klase F (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 165). U novije vrijeme izrađuju se i tereftalni izolacijski lakovi koji se odlikuju velikom otpornošću prema kiselinama, rashladnim sredstvima i impregnantima.



Sl. 70. Temperaturna ovisnost probojnog napona polietilentereftalata

Gustoća polietilentereftalata je 1,33...1,41 kg/dm³ (prema stupnju kristalnosti), čvrstoća na vlak folija od 400 do 7000 kp/cm² uz istezanje od 400 do 20% (prema stupnju istezanja i kristalnosti), talište 250...255 °C, najviša dopustiva temperatura u trajnoj upotrebi: 130 °C.

Folije polietilentereftalata poznate su pod trgovačkim imenima Hostaphan (BRD), Mylar (USA), a vlakna pod imenima Diolen (BRD), Grisuten (DDR), Terylene (UK), Dacron (USA).

Alkidne smole upotrebljavaju se čiste ili kao kopolimerizati (po pravilu sa stirenom) kao veziva u proizvodnji lakova uopće, pa tako također izolacijskih lakova i kombiniranih izolacija.

Tipičan slabo umreženi kopolimerizat alkidne smole sa stirenom ima gustoću 1,20...1,25 kg/dm³, čvrstoću na vlak do 400 kp/cm² uz istezanje 1,5...2,5%, najvišu dopustivu temperaturu u trajnoj upotrebi 90 °C.

Polikarbonati upotrebljavaju se u elektrotehnici kao materijal za folije, te za proizvodnju dijelova (nosača svitaka, kontaktnih letvica, podnožaka elektronike, telefona) postupkom injekcijskog prešanja. Za tu su primjenu pogodni zbog velike krutosti i udarne žilavosti, dimenzijske stabilnosti, statičke trajne čvr-

stoće u vezi s dobrim drugim mehaničkim svojstvima, termičke otpornosti.

Gustoća polikarbonata je 1,20 kg/dm³, čvrstoća na vlak do 700 kp/cm² uz istezanje 50...80%, talište 200...230 °C, najviša dopustiva temperatura u stalnoj upotrebi 120 °C.

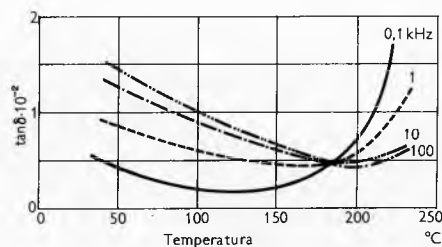
Trgovačka imena polikarbonata jesu, npr.: Makrolan (BRD), Difkon (SSSR), Lexan (USA).

Poliamidni termoplasti (PA), uglavnom 6- i 6,6-poliamidi, upotrebljavali su se donedavno zbog svoje relativno velike higroskopsnosti samo za specijalne svrhe, npr. kao trake ili folije za izolaciju vodiča i kabela i za utorske izolacije, također na kabelima kao vrlo žilav zaštitni sloj otporan protiv habanja. U kombinaciji sa specijalnim smolama mogu se iz topljivih miješanih poliamida proizvoditi elektroizolacijski lakovi toplinskih klasa B i F. Poliamidna vlakna upotrebljavaju se za izolaciju vodiča, i to u kombinaciji s lakom. Danas se proizvode i manje higroskopsni poliamidi (npr. 6,10-poliamid) koji se upotrebljavaju za proizvodnju nosača svitaka, izolacijskih i kontaktnih ploča, podnožaka i grla fluorescentnih cijevi, sklopnih elemenata, tipaka, dijelova telefona, itd.

Gustoća različitih poliamida iznosi u pothlađenom, amorfnom stanju od 1,04 do 1,14 kg/dm³ (gustoća čistog kristala, izračunata iz rendgenografskih mjerenja, iznosi 1,19...1,25 kg/dm³), čvrstoća na vlak odljeva i otpresaka 400...800 kp/cm² uz istezanje 20...>150%, istegnutih niti i folija 3000...8000 kp/cm² uz istezanje 10...30%. Najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi je 80 °C.

Trgovačka imena za alifatske poliamide jesu, npr.: Durethan BK, Ultramid, Vestamid (BRD), Miramid (DDR), Maranyl (UK), Orgamide, Technyl (F), Renyl, Sniamid (I), Grilon (Švic.), Akulon (NL), Caprolan, Nylon, Plascon (USA). U Jugoslaviji dolazi pod imenom Yulon.

Aromatski poliamidi odlikuju se velikom toplinskom postojanošću (250 °C), kemijskom otpornošću i dobrim dielektričnim svojstvima koja su praktički neovisna o vlažnosti okoline. Sami



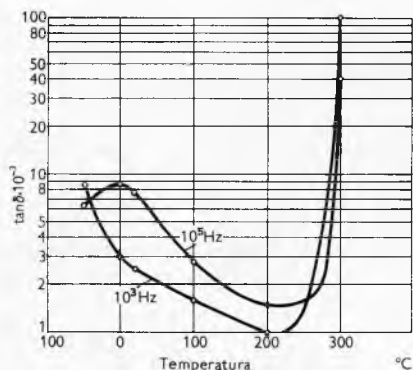
Sl. 71. Temperaturna i frekvencijska ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ aromatskih poliamida

ili kombinirani s poliesterima sve više se upotrebljavaju, u obliku folija, npr., za utorske izolacije i izolaciju glava namota električnih strojeva, za izolaciju vodiča, međuslojnu izolaciju transformatora i prigušnica, podloge štampanih krugova. Za izolaciju visokonaponskih uređaja, zbog slabe otpornosti prema koroni, aromatski se poliamidi danas još ne primjenjuju, ali se ugradnjom usitnjenog tinjca pokušava učiniti ih primjenljivim i za te svrhe. I pored visoke cijene njihova se upotreba brzo širi; neki ih smatraju izolacijskim materijalom budućnosti. Temperaturna i frekvencijska ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ aromatskih poliamida prikazana je na sl. 71.

Aromatski poliamid dobiven iz *m*-fenilendiamina i izoftaloilklorida, poznat pod komercijalnim imenom Nomex-papir, ima čvrstoću na vlak 3000 kp/cm² u smjeru valjanja, 1800 kp/cm² u smjeru okomitom na valjanje, uz istezanje 17, odn. 13%.

Polimidi odlikuju se velikom toplinskom postojanošću. U inertnoj atmosferi mogu se zagrijati kroz kratko vrijeme na 500 °C, ali na zraku se polako oksidiraju, te im najviša temperatura trajne upotrebe nije znatno viša nego politetrafluoretilenu (Teflonu). Međutim, za razliku od ovoga, imaju i na toj temperaturi još dobra mehanička svojstva. Nedostatak im je osjetljivost prema baznoj razgradnji, naročito hidrazinom, nepostojanost na sunčanom svjetlu, relativno velika higroskopsnost. Njihova odlična dielektrična svojstva omogućavaju izradu vrlo tankih izolacija; od njih izrađene trake i folije sve se više upotrebljavaju za utorske i međuslojne izolacije, izolacije vodiča i transformatora, kao dielektrik kondenzatora, kao podloge štampanih krugova, također za kombinirane izolacije (laminat i dr.). Naročito se njihova primjena uvela na specijalnim područjima, kao što su nuklearna tehnika, raketna tehnika, vučni motori za kolosiječna vozila.

Poliimidi, a još više *poliesterimidi*, upotrebljavaju se kao izolacijski lakovi izvanredne toplinske otpornosti (klasa F-H), kratkotrajno preopteretljivi, dobrih dielektričnih svojstava, otporni prema struganju. Temperaturna ovisnost faktora dielektričnih gubitaka poliimida na frekvencijama 10^3 i 10^5 Hz prikazana je na sl. 72.



Sl. 72. Temperaturna ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ poliimida na dvjema različitim frekvencijama

Poliimidni izolacijski materijali poznati su pod trgovačkim imenima Kaplon, Vespel, Pyre-ML i dr. (USA).

Linearni poliuretani (PUR) svojom kemijskom građom i svojim svojstvima sliče poliamidima, ali zbog znatno manje higroskopnosti ($\sim 0,3\text{--}2\%$) svojim ih električnim svojstvima premašuju. Upotrebljavaju se za mehanički otporne plaštevne vodiče, kao folije za kombiniranje (višeslojne) izolacije, kao impregnanti za izolacijske materijale klase F.

Linearni (termoplastični) poliuretani imaju gustoću $1,17 \text{ kg/dm}^3$ u amorfnom (pothlađenom) stanju, $1,20\text{--}1,22 \text{ kg/dm}^3$ u kristalnom stanju, čvrstoća na vlak prešanih dijelova i neistegnutih folija je do 600 kp/cm^2 , a istegnutih vlakana od 1000 do 2500 kp/cm^2 , prema stupnju istezanja. Talište im je $180\text{--}185^\circ\text{C}$, najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi: 80°C .

Linearni poliuretani poznati su npr. pod trgovačkim imenima Durethan, Ultramid, Moltopren i (vlakna) Dorlon (BRD), Utagen (DDR).

Umreženi poliuretani dolaze u trgovinu redovito kao dvokomponentni; jedna komponenta, npr. poliester ili adukt poliesteri i izocijanata (Desmophen, Adiprene B) umrežava se pri samoj preradi drugom komponentom, diizocijanatom (Desmodur). Na taj način mogu se poliuretani preraditi kao smole za lijevanje ili, pomiješani s punilima, kao mase za prešanje, na toplinski postojane i dimenzijski po mjeri točne izolacijske dijelove. Otvrdnjavaju se grijanjem. Od poliuretana prave se i električni vrlo kvalitetni izolacijski lakovi, primijenjeni prvenstveno u tehnici slabe struje (minijaturizaciji) i za impregnaciju staklenih tkanina i navlaka, te poliuretanska ljepila za metale, keramiku, staklo i plastične mase. O poliuretanskim plastomerima i pjenama koje se dobivaju na analogan način, v. dalje.

Plastomeri na bazi celuloze materijali su slabe termičke postojanosti, ali se zbog svojih dobrih mehaničkih i električnih svojstava primjenjuju kao izolacijski materijali pretežno u industriji električnih kabela, u elektrostrojarstvu i u tehnici telekomunikacija, manje u visokofrekvencijskoj tehnici (zbog razmjerno velikog faktora dielektričnih gubitaka). **Celulozni nitrat (CN)** manjeg stupnja supstitucije (v. TE 2, str. 581, 582), zamiješan s kamforom uz dodatak alkohola, daje *celuloid* (najstariju umjetnu termoplastičnu masu) koja se zbog velike zapaljivosti u elektrotehnici ne upotrebljava kao izolacijski, nego samo kao konstrukcijski materijal (npr. za brojanike, skale i sl.). Mokri celulozni nitrat, pomiješan sa sredstvima za želatiniranje i mineralnim punilima, daje nezapaljivu termoplastičnu masu poznatu pod trgovačkim imenom Trolit F. **Triacetat celuloze** (potpuno octenom kiselinom esterificirana celuloza) teško je zapaljiv, ali ne i termoplastičan polimer, od kojeg se mogu proizvesti termički i električki visokokvalitetne folije debljine $0,025\text{--}0,1 \text{ mm}$. Upotrebljava se u elektrotehnici za izradu slojevitih utorskih izolacija (često sa prešpanom kao materijalom nosiocem), za izolaciju vodiča, i namota, za izradu ljepljivih izolacijskih vrpca (tanki ljepljivi sloj je metakrilat), kao dielektrik kondenzatora.

Neistegnuta folija od triacetata celuloze ima gustoću $1,27\text{--}1,29 \text{ kg/dm}^3$ i čvrstoću $900\text{--}1200 \text{ kp/cm}^2$ uz istezanje $15\text{--}30\%$; talište 310°C , najviša dopuštena temperatura u stalnoj upotrebi: 100°C .

Trgovačka imena triacetata celuloze (primarne acetilceluloze) jesu npr. Triafof, Geaphan, Cellit T.

(**Sekundarna**) **acetilceluloza (CA)** je celulozni acetat s manjim stupnjem supstitucije, iz kojeg se uz dodatak pogodnih omekšivača ($15\text{--}40\%$) mogu dobiti i celulozoidi slični termoplasti i termoplastične mase za injekcijsko lijevanje. Acetilceluloza je teško zapaljiva do praktički negoriva; u elektrotehnici se, zbog svojih dobrih mehaničkih i često dovoljnih električnih svojstava, mnogostrano upotrebljava, npr. za dijelove aparature i nosače zavojnica u dojavnoj tehnici, za kućišta i kao sirovina za lakove.

Neistegnuta folija od čiste acetilceluloze ima gustoću $1,29\text{--}1,32 \text{ kg/cm}^3$, čvrstoću na vlak $600\text{--}1000 \text{ kp/cm}^2$ uz istezanje $5\text{--}15\%$, najvišu dopuštenu temperaturu trajne upotrebe: 75°C .

Trgovačka imena acetilceluloze jesu npr. Cellon, Ecarit, Cellit L (termoplasti za preradu kao celuloid), Trolit W i HH, Ecaron, Cellidor A i S (za injekcijsko lijevanje).

Propionati i butirati celuloze manje su higroskopski od acetata, gipkiji i znatno žilaviji pri udaru, a imaju i bolja električna svojstva. Od miješanog estera acetobutirata (CAB) prave se i folije i termoplastične mase za injekcijsko lijevanje. Upotrebljavaju se kao acetilceluloza.

Trgovačka imena acetobutirata: Triafof B, Trolit B, Cellit B, Cellidor B, Tenite.

Etilceluloza odlikuje se malom higroskopnošću, velikom čvrstoćom na udar pri savijanju, velikom kemijskom otpornošću i dobrim električnim svojstvima. I od nje se prave folije i mase za injekcijsko lijevanje. Upotrebljava se kao celulozni esteri i, osim toga, kao smola za lakove i ljepila, također za osobito čvrste i žilave lakove kojima se izoliraju montažne žice.

Etilceluloza ima gustoću $1,11\text{--}1,13 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoću na vlak $400\text{--}700 \text{ kp/cm}^2$ uz istezanje $10\text{--}30\%$, talište $170\text{--}180^\circ\text{C}$; najviša dopuštena temperatura trajne upotrebe: 75°C .

Trgovačka imena: AT-Zellulose, Hermes EC, Ethocel, Lumarith EC, Ethocoll.

Benzilceluloza je još manje higroskopna od etilceluloze. Upotrebljava se isključivo za proizvodnju izolacijskih lakova.

Trgovačka imena: BZ-Zellulose, Trolit BC.

O cijanoetilcelulozi v. *Celulozni derivati*, TE 2, str. 584.

R. Podhorsky

Prirodni kaučuk i guma. Kaučuci su prirodne ili umjetne makromolekularne tvari koje se procesom vulkanizacije (ili drugim procesom jednakog djelovanja) mogu pretvoriti u proizvod zvan (*elastična*) *guma*. Guma je karakterizirana time što se u širokom temperaturnom području može reverzibilno elastično deformirati.

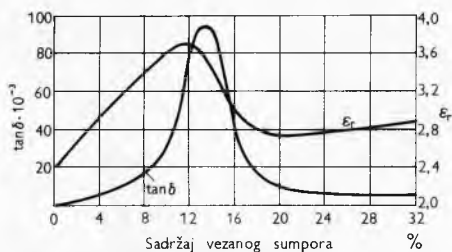
Proces vulkanizacije sastoji se u tome da se među dugim lančastim molekulama kaučuka obrazuju mostovi i time stvara umrežena struktura dovoljno gusta da se spriječi pomicanje jedne lančaste molekule u odnosu prema drugoj (plastična deformacija), ali ne toliko gusta da se spriječi promjena položaja i oblika lanaca u prostornoj mreži. Kad se na gumu djeluje silom rastezanja u jednom pravcu, linearne makromolekule, koje u nenapregnutoj gumi imaju cikcak-oblik i tvore nepravilan klupčasti splet, rastežu se u ispružene lance i orijentiraju se u pravcu sile rastezanja. Kad sila rastezanja prestane djelovati, molekule se vraćaju u prvobitni oblik i položaj kao termodinamički stabilan, te nestaje i deformacija uzrokovana silom rastezanja.

Prirodni kaučuk dobiva se koagulacijom (grušanjem) lateksa (mliječnog soka) tropske biljke *Hevea brasiliensis*. To je makromolekularni ugljikovodik bruto-formule $(C_5H_8)_n$, polimer izoprena $CH_2=C(CH_3)CH=CH_2$. Sastoji se od dugih lanaca poliizoprena: $[-CH_2C(CH_3)CHCH_2CH_2C(CH_3)CHCH_2-]_n$, ($n > 100\,000$) u kojima su ugljikovi atomi koji tvore kostur lanca smješteni u cikcak-konfiguraciji. (O proizvodnji i preradi kaučuka u gumu v. članak *Kaučuk i guma*.) Prirodni se kaučuk vulkanizira elementarnim sumporom ili organskim spojevima koji sadrže sumpora. Dodatkom $2\text{--}10\%$ sumpora (računato na količinu kaučuka) dobije se *meka guma* velike elastičnosti; dodati se $30\text{--}45\%$ sumpora, nastaje umreženje makromolekula kaučuka u gustu mrežnu strukturu, te je proizvod, zvan *tvrda guma* ili *ebonit*, čvrst, krut i neelastičan.

Meka guma upotrebljava se u elektrotehnici za izoliranje vodiča i izradu plaštova instalacijskih, jakostrujnih i telekomunikacijskih vodova i kabela, a guma slabijeg kvaliteta za ispunu kabela. Od gume (ev. na tekstilnom nosiocu) prave se također rukavice i čizme za elektromontere. Bakrene vodiče treba pokosiriti prije izolacije gumom, da bi se bakar zaštitio od sumpora u gumi. (V. *Električni vodovi*, TE 4, str. 255.) Guma koja sadrži mnogo čađe ili grafitu poluvodljiva je te se upotrebljava za odvođenje statičkog naboja. **Tvrda guma** u obliku ploča, štapova i

cijevi nekoć se zbog dobre obradljivosti mnogo upotrebljavala za izradu konstrukcijskih dijelova u tehnici slabe struje. Danas su je sasvim istisnuli plastomeri; zadržala se samo za izradu posuda kiselih akumulatora.

Ovisnost dielektričnih svojstava vulkaniziranog prirodnog kaučuka o sadržaju sumpora prikazana je na sl. 73.



Sl. 73. Ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r i faktora gubitaka $\tan \delta$ vulkaniziranog kaučuka o sadržaju sumpora, na frekvenciji 1 kHz

Gutaperča, prirodnom kaučuku srodna tvar, dobiva se iz soka jednog grma koji raste u Sumatri, Borneu i Africi. Može se vulkanizirati, ali ne postaje elastična nego ostaje termoplastična. Nešto je zbog dobrih električnih svojstava bila važni elektroizolacijski materijal, danas se zbog male higroskopnosti upotrebljava još u proizvodnji podmorskih kabela, ali je i u toj primjeni istiskuje polietilen.

Gustoća nepunjene prirodne gume iznosi $0,96 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoća na vlak $225 \dots 250 \text{ kp/cm}^2$ uz istezanje $500 \dots 800\%$, spec. otpor $10^{16} \dots 10^{18} \Omega \text{cm}$, relativna dielektričnost 3, $\tan \delta$ $0,002 \dots 0,02$.

Gustoća ebonita je $1,2 \dots 1,3 \text{ kg/dm}^3$, čvrstoća na vlak 700 kp/cm^2 uz istezanje 6%, spec. otpor $10^{16} \Omega \text{cm}$, relativna dielektričnost $3 \dots 5$, faktor gubitaka $\tan \delta$ $0,02 \dots 0,05$.

Sintetski kaučuci. S jedne strane nastojanje tehnički naprednih zemalja da se riješe ovisnosti o uvozu prirodnog kaučuka, a s druge strane tehnička potreba za kaučukom koji bi bio postojaniji prema toplini i starenju nego prirodni kaučuk i od njega otporniji prema benzinu, ulju i ozonu, doveli su poslije prvoga svjetskog rata do sintetskih kaučuka. Od kaučuka do danas uvedenih u praksu, u elektrotehniku su našli široku primjenu butadienski kaučuci (poglavito stirenski kaučuk, koji je kopolimerizat butadiena i stirena, i nitrilski kaučuk, koji je kopolimerizat butadiena i akrilonitrila), kloroprenski kaučuk (polimerizat klorbutadiena) i poliizobutilenski kaučuk, pa uretanski i silikonski kaučuk.

O butadienu, klorbutadienu (kloroprenu), akrilonitrilu te izobutilenu (izobutenu) i njihovim reakcijama v. članak *Alifatski ugljikovodici*, TE 1, str. 199, 200.

U Njemačkoj proizveden je prvi s prirodnim kaučukom uporedivi sintetski kaučuk polimerizacijom butadiena u prisutnosti natrijuma (odatle mu ime *Buna*). Bolja tehnička svojstva imaju kopolimerizati butadiena sa stirenom (Buna S, u USA GR-S) i s akrilonitrilom (Perbunan). U USA i SSSR proizvodi se i polimerizat klorbutadiena (Neopren, Baypren, Sovpren) koji se znatno lakše prerađuje od butadienskih kaučuka, vrlo je otporan prema benzinu, ulju i ozonu, teško je zapaljiv i termički postojan, ali znatno manje elastičan od prirodnog kaučuka i nešto lošijih električnih svojstava od stirenskog kaučuka.

Stirenski kaučuci (kopolimerizati butadiena i stirena) od klasičnih sintetskih kaučuka svojim svojstvima najviše sliče prirodnom kaučuku, a od njega su otporniji prema oksidaciji, postojaniji su na višim temperaturama i električna su im svojstva nakon starenja bolja. Kopolimerizat sa 27% stirena (Buna S3) lako se prerađuje i može se gotovo svagdje upotrijebiti umjesto prirodnog kaučuka; stirenski kaučuk sa više od 50% stirena (Buna SS) lako se prerađuje brizganjem i ima osobito dobra električna svojstva, ali je manje elastičan i manje postojan na niskim temperaturama. Stirenski se kaučuci sami i u smjesi s prirodnim kaučukom upotrebljavaju za izolaciju i plaštev kabela i izoliranih vodova.

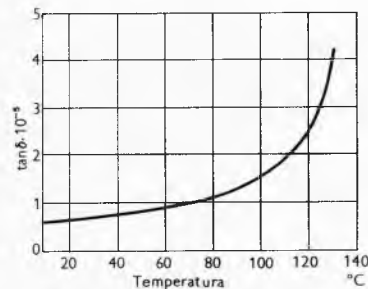
Nitrilski kaučuk (kopolimerizat butadiena i akrilonitrila) nije upotrebljiv za električne izolacije, ali se odlikuje — u odnosu prema stirenskom kaučuku — većom postojanošću na povišenoj temperaturi (kratkotrajno se može zagrijati i do 150°C) i boljom otpornošću prema benzinu i ulju.

Trgovačka imena za nitrilski kaučuk jesu npr. Perbunan N (BRD), Buna N (DDR), Hycar, Butaprene, Chemigum i dr. (USA).

Kloroprenski kaučuci upotrebljavaju se za plaštev kabela u rudnicima, kemijskoj industriji i zrakoplovima, te za izradu plaštev kabela namijenjenih primjeni u tropima.

Trgovačka imena kloroprenskog kaučuka jesu npr. Perbunan, Baypren (BRD), Neoprene (USA).

Butil-kaučuk, polimerizat izobutilena $\text{CH}_2 \cdot \text{C}(\text{CH}_3)_2$ sa 2...3% diena (izoprena ili butadiena), zbog svoje neobične otpornosti prema djelovanju kemikalija, razmjerno dobre toplinske postojanosti (do 90°C , kratkotrajno do 160°C), svojih dobrih električnih svojstava, male propusnosti za plinove, vrlo je upotrebljiv za izolaciju i plaštev kabela (naročito visokonaponskih), za različite izolacije u tehnici visokih frekvencija i visokonaponsku tehniku (za istosmjernu struju do 350 kV, izmjeničnu do 35 kV), te za izradu bandažnih i izolacijskih vrpca, ljepljiva i kitova. Temperatura ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ butil-kaučuka prikazana je u dijagramu na sl. 74.



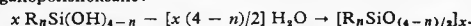
Sl. 74. Temperatura ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ butil-kaučuka

Poliuretanski kaučuk, dobiven reakcijom između visokomolekularnih polialkohola ili poliestera s hidroksilnim grupama, s jedne strane, i diizocijanata, s druge strane (v. gore kod poliestera i poliuretanskih plastomera) vrlo je elastičan, izvanredno čvrst, otporan prema starenju, ozonu i otapalima. Upotrebljava se u elektrotehnici za kabelaške plaštev, kao materijal u koji se ulažu električni sastavni dijelovi, i sl.

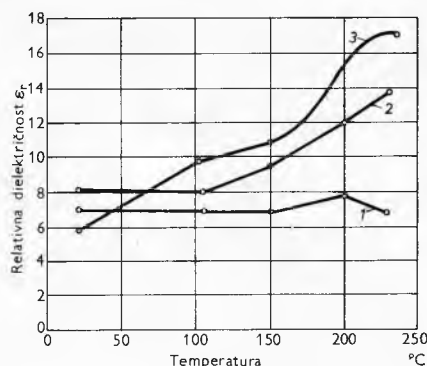
Dolazi na tržište pod imenima Vulkollan (BRD), Chemigum SL, Adiprene B (USA).

Silikoni. Silikonima se nazivaju polimerni organosilicijski spojevi bruto-sastava $\text{R}_n\text{SiO}_{(4-n)/2}$, gdje je n bilo koji racionalni broj (cijeli broj ili razlomak) između 0 i 1, osim same nule. Ti spojevi imaju u molekuli bar jednu vezu $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, njihovo sistemsko ime je, dakle, organopolisiloksani. Prema tome koliko je n u navedenoj bruto-formuli, silikoni sadrže strukturne elemente $\text{R}_3\text{SiO}-$, $-\text{R}_2\text{SiO}_2-$, $-\text{RSiO}_3-$ i/ili SiO_3^{2-} . Silikoni sa n između $\sim 1,8$ i 3 uljaste su tekućine, a silikoni sa $n < 1,8$ su smolasti i na kraju slični kremenju kiselinu (SiO_2 ima $n = 0$).

Silikoni se proizvode tako da se najprije reakcijom između organskog klorida RCl i silicijuma Si proizvedu organoklorosilani $\text{R}_n\text{SiCl}_{4-n}$ ili djelovanjem silicijum-tetraklorida SiCl_4 na alkohol organoalkoksilani $\text{R}_n\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_{4-n}$; ovi hidrolizom daju organosilanolane $\text{R}_n\text{Si}(\text{OH})_{4-n}$, koji se odmah polikondenziraju u organopolisiloksane:



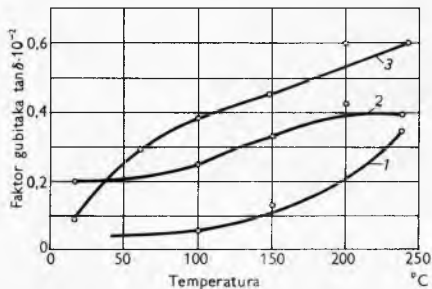
R je najčešće metil CH_3 , ali pored njega mogu se uvesti i druge grupe (fenil, etil i/ili vinil). Silanoli sa dvjema aktivnim OH-grupama ($n = 2$) daju polikondenzacijom linearne makromolekule, a silanoli sa tri aktivne OH-grupe ($n = 1$) daju razgranate, mostovima spojene i umrežene polikondenzate. Variranjem vrste, broja i omjera organskih grupa, te načina vođenja reakcija i postupka s dobivenom smjesom polisiloksana, također kopolimerizacijom s drugim monomerima, može se proizvesti, takoreći po mjeri, mnoštvo različitih silikona s različitim svojstvima. Na taj se način dobivaju kao konačni produkti: tekući silikoni (*silikonska ulja*), više ili manje čvrsti i tvrdi silikoni (*silikonske smole i lakovi*) i elastični rastjeljivi silikoni (*silikonski kaučuk i guma*), prilagođeni različitim uvjetima primjene.



Sl. 75. Temperatura ovisnost relativne dielektričnosti ϵ_r silikonskih masa za prešanje: 1 same smole, 2 smole punjene azbestom, 3 smole punjene azbestom

Silikoni, kao materijali koji tvore prelaz između anorganskih i organskih materijala, pored dobre postojanosti na niskim temperaturama (do -60°C) imaju bolju termičku postojanost nego

čisto organski izolacijski materijali (klasa H izolacijskih materijala, v. TE 4, str. 165), teško su zapaljivi, otporni su prema oksidaciji i mnogim kemikalijama (nisu otporni prema jakim kiselinama i lužinama). Imaju vrlo dobra dielektrična svojstva (sl. 75, 76), napose su otporni prema puzećim strujama (odbijaju vodu i pr-



Sl. 76. Temperaturna ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ silikonskih masa za prešanje: 1 same smole, 2 smole punjene staklom, 3 smole punjene azbestom

ljavštinu). Otpornost silikona prema radioaktivnom zračenju iskorištava se u nuklearnoj tehnici. Nedostaci su, u poređenju s drugim izolacijskim materijalima: visoka cijena svih silikona, manja čvrstoća i teža obradljivost silikonskih smola i silikonskih plastomera.

Silikonska ulja, produkti polimerizacije i polikondenzacije smjesa silanolâ s jednom i dvjema OH-grupama, proizvode se različite duljine molekularnih lanaca, i, uslijed toga, različitog viskoziteta. To su bezbojne, bistrte tekućine, mahom bez mirisa i okusa; viskozitet im ovisi znatno manje o temperaturi nego mineralnim uljima, kompresibilniji su od njih za 20%, postojaniji su na višim temperaturama, ali su im maziva svojstva gora. *Metilsilikonsko ulje* topljivo je u običajnim otapalima, ali se ne miješa s biljnim, životinjskim i mineralnim uljima; najviša dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi mu je 180 °C. *Metilfenilsilikonsko ulje* ima bolja maziva svojstva od metilsilikonskog, dopuštena temperatura u trajnoj upotrebi mu je viša, 250 °C, ovisnost viskoziteta o temperaturi je veća, odbijanje vode slabije; miješa se s drugim uljima.

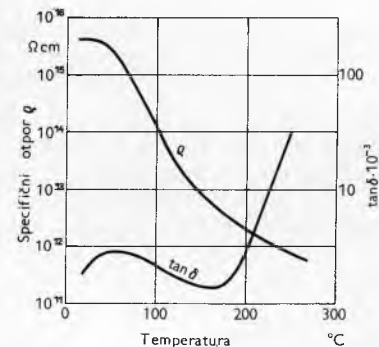
Silikonska ulja upotrebljavaju se kao izolacijska ulja, napose za transformatore i sklopne aparate na ekstremnim temperaturama, kao maziva ulja za visoke temperature, za mazanje kalupa pri preradi plastomera i elastomera, za prevlačenje površine keramičkih i staklenih izolatora da bi odbijala vodu, kao sredstvo protiv pjenjenja, kao tekućina za prigušivanje u mehaničkim i električnim mjernim sistemima i relejima; za impregniranje izoliranih vodiča i navlaka, te impregnaciju namota rotacionih strojeva i transformatora. *Silikonske masti i paste* su smjese silikonskih ulja sa zgušnjivačima (grafitnim prahom, specijalnim sapunima, finim prahom kremele kiseline). Niti otvrdnu niti postaju tekući između -70 i +250 °C. Kao maziva bolji su od najboljih masti za vruće ležajeve. Služe za povišenje površinskog otpora i zaštitu od neposrednog utjecaja vlage npr. metalnih kontakata, sklopnih elemenata, radarske opreme itd., kao odjeljivači u različitim tehnološkim procesima na visokim temperaturama, i dr.

Silikonske smole i lakovi. Silikonske smole su visokokondenzirani, jako umreženi poliorganosiloksani; proizvode se polikondenzacijom smjesa silanolâ koje sadrže pretežno silanole sa tri OH-grupe. Za elektrotehničke svrhe upotrebljavaju se gotovo isključivo metil- i metilfenilsilikonske smole; metilsilikonske smole su razmjerno krte, metilfenilsilikonske smole su, u ovisnosti o sadržaju fenilnih grupa, više ili manje elastične.

Silikonske smole su duroplasti. Dolaze u trgovinu u ne do kraja iskondenziranom stanju, usporedivim s rezolnim stanjem fenoplastâ, i to većinom otopljeni u organskom otapalu, pod imenom *silikonski lakovi*. Nakon prerade plastičnom deformacijom oni se otvrdnjavaju grijanjem kroz 5...20 h na 200...350 °C (već prema tipu smole i debljini sloja). Da bi se snizila temperatura prerade, silikonske se smole kopolikondenzacijom kombiniraju s alkidnim, poliesterskim ili fenolnim smolama. Time

se, dakako, smanjuje toplinska postojanost, ali se zato poboljšava prijanjanje i elasticitet. Najviša dopuštena temperatura trajne upotrebe čistih silikonskih smola je 180 °C, kratkotrajnim grijanjem i na 300 °C još se ne raspadaju. Električna svojstva silikonskih smola još su na temperaturi 200 °C i više vrlo dobra, a ne ovise o vlazi okoline. Sl. 77 prikazuje temperaturnu ovisnost tih svojstava za tipični silikonski lak.

Elektrotehnika je glavno područje primjene silikonskih smola i lakova. Oni se ne mogu neposredno upotrijebiti za prevlačenje bakrenih vodiča, jer na bakar slabo prijanjaju. Stoga se upotrebljavaju pretežno za impregniranje staklenih i azbestnih niti i tkanina, za izradu izolacija na bazi tinjca i kao vezivo masa za prešanje i laminatâ. Pločasti laminati mogu se obradivati skidanjem strugotine i tako iz njih izradivati izolacijski dijelovi svake



Sl. 77. Temperaturna ovisnost specifičnog otpora ρ i faktora gubitaka $\tan \delta$ silikonskog laka L 152

vrste, npr. utorske izolacije, lučne komore, priključne pločice, izolacijske ploče.

Silikonski kaučuk je linearni polidioranosiloksan.

Proizvodi se načelno na isti način kao silikonska ulja, s time da se ne polikondenzira smjesa silanola koja sadrži uz silanole s dvije OH-grupe i razmjerno mnogo silanola s jednom OH-grupom, nego gotovo čisti silanol sa dvije OH-grupe. Usljed toga u njemu nema lanaca koji završavaju neaktivnim trimetilsiloksi-grupama, nego svi lanci imaju na krajevima aktivne OH-grupe, pa stoga mogu narasti do velike duljine.

Silikonski kaučuci koji imaju molekularnu težinu 500 000 i više vulkaniziraju se toplu, tj. smjesa kaučuka i pogodnog umreživača (redovito organskog peroksida, koji tvori mostove -O- između makromolekularnih lanaca) prevodi se u silikonsku gumu grijanjem na temperaturu iznad 110 °C. Uvođenjem određenog broja vinilnih (nezasićenih) radikala u lančastu makromolekulu može se regulirati stupanj umreženja, jer se mostovi stvaraju lakše na dvostrukim vezama nego na metilu i fenilu. Metilvinilni silikonski kaučuk malo se trajno deformira pritiskom (malo je plastičan). Proizvode se i silikonski kaučuci koji se vulkaniziraju na sobnoj temperaturi (RTV — Room Temperature Vulcanizing). To su nižemolekularni linearni polidioranosiloksani (molekularna težina između 1000 i 100 000, kao silikonska ulja); smjese tih tekućih siloksana s pogodnim punilima predstavljaju paste različite konzistencije, koje se upotrebljavaju kao mase za lijevanje, mazanje ili gnječenje, a otvrdnjavaju dodatkom umreživača (obično organskih spojeva kositra).

Silikonska guma otporna je prema ozonu i atmosferijama, ali nije otporna prema ulju i benzinu, neotporna je (kao svi silikoni) prema jakim kiselinama i lužinama, a naročito je osjetljiva prema pregrijanoj vodenoj pari.

Glavna područja primjene silikonske gume jesu: izolacijske vrpce za vodove i kabele izložene visokim temperaturama, zaljevne mase za navoje, kondenzatore, otpornike i sl. primijenjene u vlažnoj i tropskoj atmosferi, navlake i brtve. Silikonskom gumom prevučene tkanine od staklenih niti predstavljaju termički visokovrijedne izolacijske vrpce i cijevi. Silikonski kaučuk za hladno vulkaniziranje upotrebljava se za izradu elastičnih izolacijskih traka.

Vlaknasti materijali

Vlaknasti materijali koji se upotrebljavaju za električnu izolaciju jesu drvo, pamuk, laneno vlakno i svile, te proizvodi predate tih materijala (niti, tkanine, papir, prešpan). Ovamo se mogu ubrojati i vlakna od plastomera koji su već prije u ovom članku obrađeni (od kemijski modificirane celuloze i od sintetskih plastomera).

Drvo ima kao izolacijski materijal u elektrotehnici tek podređenu ulogu, jer se električna svojstva drva naglo pogoršavaju kad mu se (uslijed njegove velike higroskopnosti uzrokovane mikroskopskim kanalima u biljnom vlaknu, koji zauzimaju 40...50% volumena) povećava sadržaj vode (v. članak *Drvo*, TE 3, str. 426).

Impregnacija uljem, voskom, smolom ili bitumenom smanjuje brzinu apsorpiranja vode, ali ne i količinu konačno apsorbirane vode. Upotrebljava se prvenstveno drvo listača i to većinom u kombinaciji s drugim izolacijskim materijalima. Glavna područja primjene: utorski klinovi, nosači dijelova pod naponom u ulju, potpora neizoliranih i slabo izoliranih visoko- i niskonaponskih transformatora, punilo u organskim masama za prešanje (drveno brašno). Umjesto drvenih stupova za nošenje i zatezanje vodova (v. *Drvene konstrukcije*, TE 3, str. 416 i *Električni vodovi*, TE 4, str. 238) danas se više upotrebljavaju betonski stupovi jer su jeftiniji.

Izolacijski papir je papir posebnog kvaliteta s dobrim električnim svojstvima, koji se zbog niske cijene u mnogim granama elektrotehnike primjenjuje kao gibak, priljubljiv izolacijski materijal. (O proizvodnji papira i općenito o njegovim svojstvima v. članak *Papir*.) Papir za upotrebu u elektrotehnici proizvodi se iz sulfatne (natronske) celuloze (v. *Celuloza*, TE 2, str. 570) bez lijepljenja i dodatka punila. Zgušnjavanje kalandriranjem poboljšava električna i mehanička svojstva papira. Papir upotrebljavan u elektrotehnici impregnira se uljem (*uljni papir*) ili lakom (*lak-papir*). Time mu se povisuje otpornost prema vlazi i toplinska postojanost, a električna svojstva (naročito probojna čvrstoća) mu se poboljšavaju. (Probojna čvrstoća impregniranog papira je 40...80 kV/mm, prema 8...14 kV/mm neimpregniranog.)

Mehanička svojstva papira za elektrotehničke svrhe (prekidna duljina 7...12,5 km u uzdužnom i 4...7 km u poprečnom smjeru, uz istezanje 2...4%) najbolja su kad mu je vlažnost srednja (3...10%), električna svojstva, naprotiv, to su gora što je vlažnost veća. Napose se vlažnošću smanjuje specifični otpor: suhom papiru izolacijski otpor je $10^{15}\dots10^{17}$ Ω cm, za svakih 1,5% povećanja vlage on može opasti za jednu dekadsku potenciju. Također dielektričnost i faktor gubitaka $\tan \delta$ (suhi papir neimpregniran: $\epsilon = 1,5\cdots3$, impregniran $\epsilon = 3\cdots6$) osim o frekvenciji i temperaturi, ovise i o vlažnosti papira.

Papir se kao izolacijski materijal upotrebljava za slojne izolacije i izolaciju namota u elektrostrojarstvu, za izolaciju kabela, kao dielektrik kondenzatora, kao izolacijski umetak među transformatorskim limovima, kao nosivi materijal za prešane laminate, tinjčeve proizvode i sl. Spajanjem većeg broja slojeva papira dok su još mekani i plastični proizvode se *kartoni*. Od papira impregniranog smolama proizvode se prešanjem također slojeviti izolacijski proizvodi (ploče, štapovi, cijevi, cilindri i sl.). Slojeviti materijal od papira vezanog fenolnom smolom naziva se i *tvrdi papir*.

Kondenzatorski papir vrlo je tanak (6...25 μ m) i vrlo gust 1,0...1,25 kg/dm³. Treba da je kemijski vrlo čist (sadržaj pepela < 0,5%, specifična vodljivost vodenog ekstrakta ≤ 12 mS/m), a struktura i debljina da su mu vrlo jednolične.

Papir za elektrolitske kondenzatore nema funkciju izolatora, nego služi kao nosač elektrolita, pa mora biti dovoljno porozan.

Sposobnost celuloze da apsorbira vodu može se znatno smanjiti time što se ona djelomično esterificira octenom kiselinom. Od aceticirane celuloze napravljen papir (*aceticirani papir*) ima zbog toga bolja električna svojstva, ali mu je mehanička čvrstoća manja (prekidna duljina u uzdužnom smjeru 5...7 km uz istezanje 1,5%).

Maksimalna dopuštena temperatura u stalnoj upotrebi za neimpregniran je papir 90 °C (klasa Y), za impregnirani 105 °C (klasa A, v. TE 4, str. 165).

Kabelski papir. Od papira za izolaciju kabela traži se, pored termičke otpornosti i dobrih električnih svojstava, naročito dobra mehanička svojstva (čvrstoća na vlak 1000 kp/cm², broj progibanja amo-tamo do prekida: 500). Debljina 0,08...0,20 mm (papir za telefonske kabele i za označavanje žila: 0,05 mm), gustoća 0,6...0,8 kg/dm³, dielektrična čvrstoća 8...14 kV/mm. (Više o tome v. članak *Električni vodovi*, TE 4, str. 255.) Ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ kabelskog papira o sadržaju vlage na dvjema različitim frekvencijama prikazuje sl. 78.

Transformatorski papir treba da je strojno gladak, zgusnut i kemijski čist, tako da je broj vodljivih mjesta po četvornom metru vrlo mali (gustoća 0,60...0,70 kg/dm³), debljine 0,055 mm, čvrstoće na vlak 400...800 kp/cm². Transformatorski papir upotrebljava se za izolaciju vodiča u namotima transformatora. Upotrebljava se i za izradu nosača svitaka transformatora, naročito transformatora hlađenih uljem.

Papiri za izradu slojevitih prešanih proizvoda moraju dobro upijati smole kojima se impregniraju, stoga su tanji i manje gu-

stoće nego kabelski papiri. Papiri koji se upotrebljavaju kao nosioci tinja treba da imaju veliku mehaničku čvrstoću u smjeru vlakana. To svojstvo ima tzv. japanski papir izrađen od biljnih vlakana velike duljine. Danas se za tu svrhu upotrebljava jako zgusnuti natronski papir, a ponekad i svileni papir izrađen od dugih vlakana pamuka.

Izolacijski kartoni koji služe u elektrotehnici za izolaciju nazivaju se prešpan (njem. *Preßspan*) i transformerboard.

Prešpan se dijeli prema namjeni na strojni, utorski, transformatorski i kondenzatorski. Strojni i utorski upotrebljavaju se kao takvi, u suhom stanju, i dolaze u trgovinu u rolama (strojni bojadisan narančasto, utorski tamnosivo); transformatorski i kondenzatorski moraju se impregnirati, dolaze u trgovinu u pločama, nebojadisani (prirodne sive boje). Mehanička čvrstoća prešpana je razmjerno velika: u uzdužnom smjeru 650 (strojni) do 850 kp/cm² (kondenzatorski), u poprečnom smjeru od 350 (strojni) do 500 kp/cm² (transformatorski). Dielektrična čvrstoća 9...13 kV/mm. Strojni prešpan upotrebljava se uglavnom kao pomoćni materijal, utorski za izolacije utora sam ili kao nosilac različitih kombiniranih materijala, kondenzatorski kao dielektrik kondenzatora, transformatorski za izolaciju transformatora.

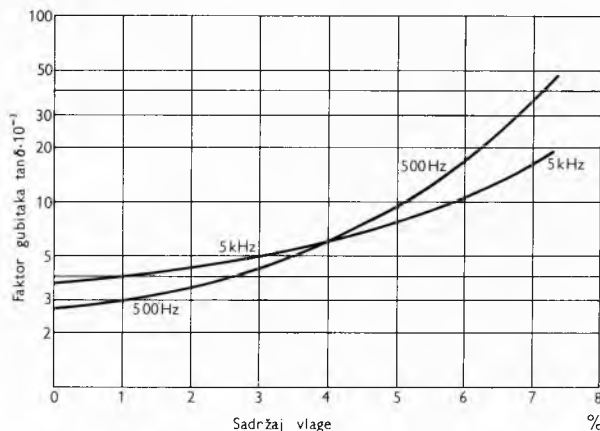
Transformerboard je sastavljen od vrlo tankih slojeva transformatorskog prešpana velike čistoće i finih vlakana. Čvrstoća na vlak mu seže do 1000 kp/cm², a dielektrična čvrstoća mu je iznad 200 kV/mm. Dobro se impregnira u transformatorskom ulju. Upotrebljava se za konstrukcijske elemente transformatora: podloge i odstoynike (distancere).

Prirodna vlakna koja se upotrebljavaju u elektrotehnici jesu pamuk, laneno vlakno i svilu. (Općenito o njima v. *Tekstilna vlakna*.)

Pamuk se dobiva iz dlaka na sjemenkama različitih biljaka, najčešće pamučike (*Gossypium*). Očišćen i izbijeljen sadrži od svih biljnih vlakana najviše celuloze (90...95%). Električna svojstva pamuka ($\epsilon = 5\cdots6$, $\tan \delta = 0,03\cdots0,2$) jako ovise o sadržaju vlage. Proizvodi dobiveni tkanjem pamučnog prediva, impregnirani uljnim ili uljno-bitumenskim lakom imaju probojnu čvrstoću i toplinsku postojanost klase A. Od njih se pamučna tkanina upotrebljava kao međuizolacija u električnim proizvodima, trake kao pomoćni materijal, a navlake kao zaštita izvodâ i sl. Laminat (prešani slojni materijal) od pamučne tkanine i fenolne ili krezolne smole zove se *tekstolit*; služi kao konstrukcijski i pomoćni materijal. Aceticirani pamuk ima bolja električna svojstva ($\epsilon = 1,3\cdots1,8$, $\tan \delta = 0,005\cdots0,02$) i toplinski je postojaniji od običnog.

Laneno vlakno, dobiveno od stabljike lana (*Linum usitatissimum*) sadrži 65...70% celuloze, osjetljivije je od pamučnog prema kemikalijama i manje elastično, ali je čvršće i trajnije od njega. Upotrebljava se u elektrotehnici kao i pamuk.

Svila, fino vlakno koje se dobiva odmatanjem čahura dudova svilka (*Bombyx mori*), uz šelak jedini je izolacijski materijal životinjskog porijekla. Sastoji se od dugih paralelno smještenih i među sobom vodikovim mostovima spojenih makromolekula bjelancevine zvane fibroin. Svila uz veliku čvrstoću ima dobra elek-



Sl. 78. Ovisnost faktora gubitaka $\tan \delta$ kabelskog papira o sadržaju vlage na dvjema različitim frekvencijama

trična svojstva, koja su manje ovisna o vlažnosti nego električna svojstva pamuka. Zbog visoke cijene danas se upotrebljava kao izolacijski materijal samo za specijalne svrhe, npr. za oplatanje specijalnih izoliranih vodova, za izolaciju nekih vodiča za vojne svrhe, za izradu označnih niti.

U drugim primjenama prirodnu svilu danas mahom zamjenjuje filamentna kemijska vlakna (*umjetna svila*). Po svom kemijskom sastavu ta su vlakna bilo regenerirana celuloza (viskozna vlakna i bakarna vlakna), bilo kemijski modificirana celuloza (triacetatna vlakna), bilo sintetski visokomolekularni spojevi o kojima je gore bilo govora (polivinilkloridna, poliakrilonitrilna, poliesterska, poliamidna, poliuretanska vlakna). (Više o tim vlaknima v. članak *Kemijska vlakna*.) Od vlakana na bazi celuloze upotrebljava se, kao izolacijski materijal u obliku niti ili tkanih vrpca za izolaciju vodiča, poglavito triacetatno vlakno, koje je znatno manje higroskopno od svile, te svoja dobra električna svojstva zadržava u znatno većoj mjeri nego svila i u vlažnoj atmosferi. I to vlakno, međutim, sve više istiskuju sintetski filamenti.

Izolacijski lakovi

(O lakovima općenito v. članak *Lakovi i boje*.) Lakovi koji se upotrebljavaju u elektrotehnici mogu se prema namjeni podijeliti na lakove za izoliranje žice, lakove za natapanje navoja (radi njihovog mehaničkog učvršćivanja i električnog izoliranja), lakove za impregniranje tkanina i lakove za stvaranje zaštitnih prevlaka.

Klasični lakovi su koloidalne otopine smola, bitumena, sušivih masti i sličnih tvari, koje tvore tzv. osnovu laka u isparljivim otapalima i razrjeđivačima. Osnovama laka mogu biti dodani omekšivači (plastifikatori), ubrzivači (sikativi) i bojila (pigmenti). Sušenje laka u svrhu dobivanja krute prevlake na lakiranom predmetu obavlja se kod normalnih ili povišenih temperatura. Isparljivi dio laka može se sastojati samo od tekuće tvari u kojoj se osnova otapa ili koloidno dispergira (*otapala*), a može sadržati i pogodni *razrjeđivač*, tekućinu koja sama ne bi mogla djelovati kao otapalo veziva, ali u smjesi s otapalom to može. Osnovni sastojci kvalitetnijih lakova jesu ili makromolekularne tvari (polioplasti, prirodne ili umjetne smole) ili tvari male molekulske težine koje tek prilikom sušenja premdazu reakcijom (polikondenzacijom ili poliadicijom) prelaze u makromolekularne tvari. Ako je niskomolekularna osnova tekuća, lak ne treba da sadrži posebno otapalo (*lak bez otapala*). Lakom bez otapala naziva se i premazno sredstvo koje se upotrebljava u rastaljenom stanju; prevlaka na predmetu lakiranom takvim lakom *suši* se ohlađivanjem.

Lakovi za izolaciju žice moraju, kao otvrdnuti, dobro prijanjati uz metale (bakar i aluminijum) biti dovoljno elastični i otporni prema habanju i istiranju, ali uz to također dovoljno tvrdi i čvrsti, te otporni na promjene temperature. Prema otapalima lakova za impregniranje namotâ treba da budu otporni, tj. za impregniranje treba uvijek izabrati lak prema kojemu je lak na žici otporan.

Mogu se razlikovati lakovi za vodiče u dojavnoj tehnici i lakovi za vodiče u električnim strojevima. Od prvih se — osim male ovisnosti električnih svojstava o vlažnosti zraka — traže u prvom redu veliki izolacijski otpor i dobra dielektrična svojstva; od drugih se traži usto toplinska postojanost i otpornost prema lakovima za impregniranje. U usporedbi s drugim vrstama izolacije vodiča, lakovi za žice omogućavaju daleko najbolje iskorištenje namotnog prostora. Izolacija žice lakom proizvodi se višekratnim provlačenjem žice kroz tekući lak, te se sastoji stoga od niza vrlo tankih slojeva otvrdnutog laka; takva izolacija ima vrlo veliku probojnu čvrstoću ($E_p = 80 \dots 100 \text{ kV/mm}$).

Kao izolacijski lakovi za žicu upotrebljavaju se danas umjesto odavna poznatih uljnih lakova, gotovo isključivo moderni lakovi na bazi polioplasta. Ti lakovi odlikuju se, osim odličnim mehaničkim svojstvima, također većom toplinskom postojanošću i otpornošću prema starenju i prema lakovima za impregniranje nego uljni lakovi. Nedostaci su im, u odnosu prema uljnim lakovima, što se teže prerađuju i što se na njima, kad su mehanički napregnuti, znaju stvarati fine napukline.

Uljni lakovi. Već oko 1920 proizvodili su se lakovi za izolaciju žica kuhanjem prirodnih asfalta s lanenim uljem *crni lakovi*. Pri tom se radi proizvodnje uljnih lakova laneno i drveno ulje kuha s prirodnim i umjetnim smolama. Prevlake laka na žici suše se u peći na povišenoj temperaturi. Karakteristična je za tako sušene slojeve laka njihova poput rubina crvena boja. Izolacije uljnim lakovima odlikuju se velikim izolacijskim otporom, dobrim dielektričnim svojstvima i malom higroskopnošću, ali se ne mogu u većoj mjeri upotrijebiti u elektromašinstvu zbog toga što brzo stare (postaju krte, nisu otporne prema lako-

vima za natapanje i — što im je glavni nedostatak — nisu termički postojane (idu u klasu Y, A i E).

Lakovi na bazi polioplasta. U primjeni polioplasta (o kojima v. str. 86 i dalje) u proizvodnji lakova za žice nastale su u posljednje vrijeme velike promjene, te se neki polioplasti koji su se za te svrhe mnogo upotrebljavali danas upotrebljavaju malo ili nikako, a u upotrebu ulaze novi materijali poboljšanih svojstava.

Tako su se epoksidne smole neko vrijeme mnogo upotrebljavale u zajednici s drugim umjetnim smolama za proizvodnju toplinski otpornih prevlaka velike elastičnosti i dobrih električnih svojstava ali male tvrdoće i čvrstoće prema struganju, a danas se za te svrhe malo upotrebljavaju. Isto to vrijedi i za poliestere čiste tereftalne kiseline. I fenolne, karbamidne i melaminske smole, omekšane alkidnim smolama, od kojih su se proizvodili lakovi klase E otporni prema stvaranju površinskih strujnih staza, ustupili su pred novijim materijalima.

Danas se za normalna opterećenja upotrebljavaju najviše lakovi na bazi modificiranih polivinilformalskih smola i kombinacija poliamida s poliesterima i izocijanatima. Polivinilformalski lak, koji daje tvrde i prema struganju otporne prevlake s temperaturom mekšanja 255°C i izolacijskim otporom $0,20 \text{ M}\Omega\text{km}$ na 140°C , univerzalni je standardni lak u USA, a u Evropi se upotrebljava naročito za profilne vodiče; poliamid-poliester-izocijanatni lak vrlo je ekonomičan u primjeni; ima temperaturu mekšanja 245°C i izolacijski otpor $0,08 \text{ M}\Omega\text{km}$ na 140°C , a upotrebljava se općenito za motore i kao univerzalni lak za klasu B. Pretežno u mikroelektronici upotrebljava se lak na bazi modificiranog poliuretana, jer uz naročito dobra električna svojstva i otpornosti prema toplinskim udarima omogućava proizvodnju žica koje se mogu lemiti bez prethodnog skidanja izolacije (lak se raspada pri umakanju kraja žice u rastaljeni kositar na 350°C). Za proizvodnju lakova veće toplinske postojanosti (za jako opterećene motore, za prigušnice, itd.) afirmirali su se poliestermidni. Daju prevlake klase F-H koje se mogu kratkotrajno preoptereti i imaju, uz dobra dielektrična svojstva, veliku čvrstoću na struganje. Za najviše opterećene motore (npr. motore strojeva za vuču, dizalice, valjačke stanove) razvijaju se u novije vrijeme lakovi za izolacije klasa H i C. To su mahom poliestermidni lakovi kojima je toplinska postojanost to veća što je esterska grupacija u njima više zamijenjena imidnom ili amidnom i što je makromolekula polioplasta više aromatskog karaktera. U ekstremnom slučaju dolazi se tako do tzv. ML-smola na bazi piromelitne kiseline i aromatskih amina poput 4,4'-diaminodifeniletana ili -difeniloksida. Ti lakovi daju izolacije klase C (temperatura u trajnoj upotrebi 245°C).

Za izradu samonosivih svitaka, kao i manjih namota bez dodatnih impregnacija, izrađuje se posebna vrsta lak-žice, izolirane s lakom na osnovi poliuretana, polivinilformala ili epoksida i dodatnim slojem termoplastičnog laka obično na osnovi polivinilacetata, polivinilbutirala ili butilmetilata.

Lakovi za impregniranje namota treba da što potpunije natope žične snopove namota strojeva i aparata, a nakon sušenja da ih čvrsto povežu, obrazujući među njima dodatnu, prema vlazi postojanu električnu izolaciju koja, budući da bolje vodi toplinu od zraka, također olakšava hlađenje namota. Radi toga lak treba da za vrijeme procesa natapanja ima tako mali viskozitet da prodire u sve šupljine među žicama, a da ipak sadrži što manje otapala, kako se pri sušenju ne bi stvarale nove šupljine. Za te se lakove (ukoliko nisu lakovi bez otapala) upotrebljavaju pretežno alifatska otapala (lak-benzin, white spirit) jer imaju mali viskozitet i jer ne otapaju lakove kojima su žice namota najčešće izolirane. Taj izbor otapala donekle ograničava izbor smole koja tvori osnovu laka.

Lakovi za impregniranje namota mogu se (kao i lakovi za izoliranje žice) razlikovati prema tome da li su namijenjeni za impregniranje namota u dojavnoj tehnici ili u strojogradnji. U dojavnoj tehnici, gdje su namoti redovito manjih dimenzija i termički malo napregnuti, mogu se upotrebljavati i (jeftiniji) uljni lakovi; za impregniranje namota električnih strojeva moraju se upotrebljavati lakovi na bazi umjetnih smola, pogodno odabranih prema maksimalnoj temperaturi kojoj moraju trajno odolijevati. (Izbor se mora vršiti i s obzirom na to da su, po pravilu, lakovi to skuplji što je viša temperatura na kojoj su još postojani). Proizvođači lakova obično deklariraju kemijsku

osnovu laka i toplinsku klasu a većinom drže u tajnosti neke od sastojaka izolacijskih lakova koje iznose na tržište pod trgovačkim imenima. Moguće je, međutim, utvrditi da se za izradu takvih lakova upotrebljavaju danas najviše fenolne, karbamidne, melaminske, alkidne, poliuretanske, epoksidne, poliesterske i silikonske smole.

Za izolacije toplinske klase E upotrebljavaju se alkidne smole modificirane sušivim uljima, aminskim, fenolnim i epoksidnim smolama ili sa stirenom kopolimerizirane alkidne i poliesterske smole. Asfaltni lakovi i uljno-asfaltni lakovi se danas praktički više ne upotrebljavaju, ali se u nekim specijalnim slučajevima namoti natapaju bitumenskim masama s točkom mekšanja iznad 120 °C. Za izolacije klase B upotrebljavaju se prvenstveno uljem plastificirane fenolne smole i nemodificirane fenolne smole u kombinaciji s poliesterima kao elastiifikatorima; primjenjuju se također modificirane karbamidne i melaminske smole u zajednici s modificiranim alkidnim i nezasićenim poliesterskim smolama kao plastifikatorima, u novije vrijeme također lakovi bez otapala: na bazi nezasićenih poliestera, epoksida modificiranih fenolnim ili aminskim smolama, poliuretanâ. U upotrebi su i asfaltne mase s točkom mekšanja iznad 130 °C. Za izolacije klase F upotrebljavaju se silikonske smole modificirane alkidnim i dr. smolama, također pogodno modificirane poliuretanske, poliesterske i epoksidne smole, te esterimidne smole. Za izolacije klase H upotrebljavaju se prvenstveno lakovi na bazi čistih silikonskih smola, u novije vrijeme također poliimidne i poliestermidne smole. Danas se proizvode i lakovi za izolacije klase C. Navedene klase lakova za natapanje namota imaju jednake karakteristike kao i već opisani lakovi za izolaciju žice.

Klasični postupci impregnacije namota obuhvaćaju pripremu laka (napose razrjeđivanje do potrebnog viskoziteta), pripremu namota (napose sušenje), samo impregniranje namota, otkapavanje (u prvom redu radi uklanjanja viška laka), isparivanje razrjeđivača i otvrdnjavanje laka. Sušenje namota obavlja se ili toplim zrakom pod atmosferskim tlakom ili u vakuumu; samo natapanje obavlja se ili uronjavanjem u lak pod atmosferskim tlakom ili u vakuumu. Osim klasičnih postupaka primjenjuju se u specijalnim slučajevima drugi postupci kao što su: centrifugalna impregnacija (za male i lake motore), tlačno-protočna impregnacija (za manje i srednje, teže strojeve), impregnacija polijevanjem ili prskanjem (za velike rotacione strojeve), kontinuirana impregnacija (u serijskoj proizvodnji malih motora), zalijevanje lakovima bez otapala prokapanje namota umjetnim smolama.

Lakovi za impregniranje tkanina i papira. Impregniranjem tkanina i papira ispunjavaju se šupljine u tim materijalima takvim tvarima i u tolikoj mjeri da se dobije gibak i podatan izolacijski materijal otporan prema vlazi i u neobičnim klimatskim okolnostima.

Za impregniranje papira i organskih tkanina (svile, pamuka) upotrebljavaju se pretežno uljni lakovi s velikim sadržajem sušivih ulja i malim dodacima tvrdih smola i parafina. (Smolni lakovi bez ulja zahtijevali bi za otvrdnjavanje povišenu temperaturu koju organska tkiva ne bi podnijela.) Tako dobiveni materijali (*uljni papir, uljna svila, uljno platno* i sl.) odavna se upotrebljavaju kao jeftini složeni izolacijski materijali toplinske klase A. Dielektričnost i faktor gubitaka su im, međutim, veliki i jako promjenljivi s temperaturom i frekvencijom, a postojanost u tropskim prilikama nije im dovoljna. Stoga ih danas već uvelike zamjenjuju plastične folije i cijevi (*bužir-navlake*) koje, uz istu električnu čvrstoću, mogu biti mnogo tanje, a i lakše se proizvode.

Izolacijske tkanine i navlake dobrih električnih svojstava i otporne prema povišenim temperaturama proizvode se danas impregniranjem staklenih tkanina alkidnim ili bitumenskim lakovima (klasa B), odn. poliuretanskim ili silikonalkidnim lakom (klasa F) i silikonskim lakom ili disperzijom silikonske gume (klasa H).

Lakovi za prevlake služe za zaštitu električki već dovoljno izoliranih dijelova od vanjskih utjecaja, mehaničkih oštećenja, vlage, kemikalija te zaštitu od tinjavog izbijanja. Budući da nema laka koji bi prema svim takvim utjecajima bio podjednako otporan, razvijeni su za različite namjene različiti lakovi.

Lakovi za zaštitu od vlage proizvodili su se ranije pretežno na osnovi sušivih ulja. Danas se za tu svrhu upotrebljavaju — pored

benzilceluloznih i polistirenskih lakova koji se suše na zraku — pretežno otporni i u tropskim prilikama, u peći sušivi lakovi na osnovi poliuretan-alkidnih i melamin-alkidnih smolnih kombinacija. Slojni otpornici se radi zaštite od vlage prevlače uljnim ili alkidnosmolnim lakovima koji su obojeni pigmentima, a u novije vrijeme i toplinski otpornijim poliuretanskim kombiniranim lakovima.

Zaštitni lakovi otporni prema kemikalijama treba najčešće da zaštite impregnaciju namotâ električnih strojeva od određenih kemikalija, ponekad također od plijesni i termitâ (u tropskoj izvedbi). Upotrebljavaju se pretežno halogenizirani ugljikovodici, napose naknadno klorirani polivinilklorid i klorkaučuk. Za prevlake koje trebaju biti otporne prema lužinama dolaze u obzir u prvom redu lakovi na osnovi epoksidnih smola. I za zaštitu od gotovo svih drugih kemikalija danas stoje na raspolaganju dovoljno otporni zaštitni lakovi.

Specijalni lakovi za prevlake služe, npr., izoliranju dinamo-limova i transformatorskih limova, za zaštitu štampanih krugova i za zaštitu od tinjavog izbijanja. Dinamo-limovi i transformatorski limovi mogu se (osim silikatnim prevlakama) izolirati jedni prema drugim lakovima, po pravilu vodotopivim lakovima na bazi fenolnih ili alkidno-fenolnih smola. Kao specijalni lakovi za zaštitu od tinjavog izbijanja upotrebljavaju se i lakovi sa silicijum-karbido. (Kontaktne otpori između poluvodljivih zrnaca silicijum-karbida ovisni su o jakosti električnog polja; stoga premaz sa silicijum-karbidom ublažava pad potencijala i tako sprečava tinjavo izbijanje.)

P. Čatoš R. Podhorsky

LIT.: R. Becker, W. Döring, Ferromagnetismus, Berlin 1929. — J. H. van Vleck, The theory of electric and magnetic susceptibilities, Oxford 1932. — E. C. Stoner, Magnetism and matter, London 1934. — F. Raskop, Isolierlacke, Berlin 1948. — C. B. Вонсовский, Я. С. Шур, Ферромагнетизм, Москва 1948. — A. Keil, Werkstoffe für elektrische Kontakte, Berlin 1950. — L. F. Bates, Modern magnetism, Cambridge 1951. — R. M. Bozorth, Ferromagnetism, New York 1951. — S. Whitehead, Dielectric breakdown of solids, Oxford 1951. — F. Pawlek, Magnetische Werkstoffe, Berlin 1952. — A. P. De Barr, Soft magnetic materials used in industry, London 1953. — R. J. W. Le Fevre, Dipole moments, London 1953. — A. Palatzky, Technische Keramik, 1954. — A. Schulze, Metallische Werkstoffe der Elektrotechnik, Berlin 1954. — P. R. Bardell, Magnetic materials in the electrical industry, London 1955. — N. P. Bogorodicki, Werkstoffe der Elektrotechnik (prijevod s ruskoga), Berlin 1955. — Б. П. Бурылко, Трансформаторное масло, Москва-Ленинград 1955. — A. Wambersky, Kontakty z drahých a spékanych kovů, Praha 1955. — W. Koster (Herausg.), Beiträge zur Theorie des Ferromagnetismus, Berlin-Heidelberg-New York 1956. — N. Röwer, Werkstoffe der Fernmeldechnik, Leipzig 1956. — A. Imhof, Hochspannungs-Isolierstoffe, Karlsruhe 1957. — W. Oburger, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, Wien 1957. — W. Tiedemann, Werkstoffe für die Elektrotechnik, Leipzig 1957. — R. Vieweg, Elektrotechnische Isolierstoffe, Berlin 1957. — B. Усов, А. Займовский, Металлы и сплавы в электротехнике, Москва 1957. — A. R. Hippel, Dielectric materials and applications, New York 1958. — C. L. Mantell, Engineering materials handbook, New York 1958. — H. Reinboth, Technologie und Anwendung magnetischer Werkstoffe, Berlin 1958. — A. Roth, Hochspannungstechnik, Wien 1959. — N. Voigt, Elektrische Widerstände, Berlin 1959. — E. P. Wohlfarth, Hard magnetic materials, u: Advances in physics, Vol. 8, London 1959. — P. J. B. Claricoats, Microwave ferrites, London 1961. — Z. Horak, F. Krupka, V. Sindelář, Technická fyzika, 1961. — W. Tiedemann, Werkstoffe für die Elektrotechnik, Bd. I Metallische Werkstoffe, Berlin 1961; Bd. 2 Nichtmetallische Werkstoffe, Berlin 1962. — F. M. Clark, Insulating materials for design and engineering practice, New York 1962. — D. Hadfield, Permanent magnets and magnetism, London 1962. — E. Kneller, Ferromagnetismus, Berlin 1962. — V. Vetrovec, B. Parez, Hliník a jeho použití v elektrotechnice, Praha 1962. — K. A. Адрианов, В. В. Скипертов, Синтетические жидкие диэлектрики, Москва 1962. — М. С. Лайзерзон, Синтетическая смола, Москва 1962. — Электротехнический справочник, Москва 1962. — H. Reinboth, Technologie und Anwendung magnetischer Werkstoffe, Berlin 1963. — A. K. Барденбург, Пластические массы в электротехнической промышленности, Москва 1963. — J. C. Anderson, Dielectrics, London 1964. — H. J. Martin, Die Ferroelektrika, Leipzig 1964. — A. J. Dekker, Solid state physics, London 1965. — Б. Лакс, К. Баттон, Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики, Москва 1965. — А. А. Преображенский, Магнитные материалы, Москва 1965. — Autorenkollektiv, Werkstoffkunde für Elektroberufe, Berlin 1967. — J. C. Anderson, Dielectrics, London 1967. — S. Blum, Der nichtmagnetisierbare Stahl und seine Anwendung, Hamburg 1967. — C. Heck, Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung, Heidelberg 1967. — C. Laverick, Superconducting magnet technology, Argonne National Laboratory, 1967. — H. P. J. Wijn, P. Dullenkopf, Werkstoffe der Elektrotechnik, Heidelberg 1967. — J. C. Anderson, Magnetism and magnetic materials, London 1968. — E. Филиппов, Taschenbuch Elektrotechnik, Berlin 1968. — R. Racho, K. Krause u. a., Werkstoffe der Elektrotechnik, Berlin 1968. — Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, Ленинград 1969. — Электротехнические материалы, Сборник рекомендуемых терминов, Москва 1969. — E. A. Lynton, Superconductivity, London 1969. — М. Д. Машикович, Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ, Москва 1969. — E. A. Mol, The wire industry, vol. 35, London 1968, vol. 36. London 1969. — И. Е. Бахыгин, Электрические свойства высокочастотных материалов, Москва 1972. — J. Hassdenteufel, J. Dubský, M. Rapoš, J. Šandera, Elektrotechnické materiály, Bratislava 1971. — X. Ш. Казарновский, Проводниковые материалы (сборник), Москва 1970. — C. H. Kittel, Introduction to solid physics, Berkeley 1970. — X. P. Паркиелли, А. М. Хайкин, Экономика применения полимеров и пластмасс в электронике, Ленинград 1972.

P. Čatoš V. Firingir Z. Godec R. Podhorsky