

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

ELEKTROTEHNISKIE MATERIĀLI

Jelgava 2008

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

ELEKTROTEHNISKIE MATERIĀLI

Mācību metodiskais līdzeklis

Jelgava 2008



Mācību līdzeklis sagatavots un izdots ESF projekta „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē” ietvaros, projektu līdzfinansē Eiropas Savienība.

Elektrotehniskie materiāli: Mācību metodiskais līdzeklis / sast. I.Plūme.
– Jelgava: LLU, 2008. – 59 lpp.

ISBN 978-9984-784-44-1

© Imants Plūme
© LLU Tehniskā fakultāte

Saturs

1. Elektrotehnisko materiālu nozīme un klasifikācija	5
2. Elektrotehnisko materiālu raksturlielumi	6
2.1. Mehāniskie raksturlielumi	6
2.1.1. Stiprība spiedē.....	6
2.1.2. Stiprība stiepē	6
2.1.3. Relatīvais pagarinājums	7
2.1.4. Stiprība liecē	7
2.1.5. Triecienstīgība	8
2.1.6. Cietība	9
2.1.6.1. Brinela metode	9
2.1.6.2. Rokvela metode	10
2.1.6.3. Vikersa metode	10
2.2. Materiālu elektriskie raksturlielumi	11
2.2.1. Īpatnējā elektriskā pretestība	11
2.2.2. Dielektriskā caurlaidība.....	13
2.2.3. Dielektrisko zudumu leņķa tangenss.....	14
2.2.4. Elektriskā izturība	15
2.3. Materiālu termiskie raksturlielumi.....	15
2.3.1. Kušanas temperatūra	15
2.3.2. Mīkstapšanas temperatūra	15
2.3.3. Siltumizturība	16
2.3.4. Termoizturība	16
2.3.5. Aukstumizturība	17
2.3.6. Siltumvadītspēja	18
2.3.7. Termiskā izplešanās	18
2.3.8. Siltumabsorbēcija.....	18
2.4. Fizikāli ķīmiskie raksturlielumi	19
2.4.1. Skābes skaitlis	19
2.4.2. Viskozitāte	19
2.4.3. Ūdensabsorbējamība	19
2.4.4. Tropiskā izturība.....	20
3. Dielektriskie materiāli	22
3.1. Gāzveida dielektriķi	22
3.2. Šķidrie dielektriķi	23
3.2.1. Naftas eļļas	23
3.2.2. Sintētiskie šķidrie dielektriķi	25
3.3. Cietie dielektriķi	28

3.3.1. Minerālu dielektriķi	28
3.3.2. Vizlas materiāli	29
3.3.3. Elektrokeramiskie dielektriķi.....	30
3.3.4. Neorganiskie stikli	32
3.3.5. Cietie polimerizācijas dielektriķi	34
3.3.5.1. Polistirols	34
3.3.5.2. Polietilēns	35
3.3.5.3. Polivinilhlorīds	36
3.3.5.4. Poliformaldehīds.....	37
3.3.5.5. Organiskais stikls.....	37
3.3.5.6. Fluorplasts.....	38
3.3.6. Cietie polikondensācijas dielektriķi.....	38
3.3.6.1. Rezolsveķi un novolaksveķi	38
3.3.6.2. Gļiftālsveķi	39
3.3.6.3. Lavsaņš	40
3.3.6.4. Kaprons	40
3.3.6.5. Epoksīdsveķi.....	40
3.3.6.6. Silīcijorganiskie dielektriķi.....	41
3.3.6.7. Poliimīdi	41
3.3.7. Lakas, emaljas un kompaundi.....	41
3.3.8. Papīri un kartoni.....	43
3.3.9. Lakaudumi un ruļļu materiāli	45
3.3.10. Plastmasas un lokšņu materiāli.....	46
3.3.11. Dielektriskās gumijas	47
3.3.12. Cieto dielektriķu elektrovadītspēja un elektriskā izturība.....	48
4. Vadītāji materiāli	50
4.1. Materiāli ar lielu vadītspēju	50
4.1.1. Varš.....	50
4.1.2. Alumīnijs	51
4.1.3. Supravadītāji un kriovadītāji.....	52
4.2. Materiāli ar lielu pretestību.....	53
4.3. Kontaktu materiāli	53
4.4. Elektrotehniskie ogles materiāli.....	56
4.5. Magnētiskie materiāli	57
Izmantotā literatūra	59

1. Elektrotehnisko materiālu nozīme un klasifikācija

Elektrotehniskos materiālus izmanto elektroiekārtu un elektroietaišu izgatavošanai. Elektrotehnisko materiālu izvēli nosaka to spēja visā ekspluatācijās periodā saglabāt uzdotos (darba) parametrus mainīgu faktoru (temperatūra, mehāniskās iedarbes, elektriskie, magnētiskie lauki u.c.) ietekmē. Elektrotehniskos materiālus var klasificēt pēc to agregātvokļa (gāzveida, šķidri vai cietie), izcelsmes (dabīgie vai mākslīgi veidotie), molekulu izmēra (monomēri vai lielmolekulārie), temperatūras izturības (aukstumizturīgie, karstumizturīgie), uzvedības elektrisko, magnētisko lauku iedarbībā, ietekmes uz apkārtējo vidi (lietderīgi, neitrāli vai vidi piesārņojoši) utt. Elektrisko materiālu (elektroiekārtas sastāvdaļu) agregātvoklis darba temperatūru diapazonā parasti ir nemainīgs. Būtisks ir materiālu iedalījums pēc to īpatnējās elektriskās pretestības vērtības, dodot iespēju tos atpazīt kā „vadītājus” un „izolatorus”. Elektrotehnikā sevišķa nozīme ir nelielai feromagnētisko vielu grupai - ferromagnētiķiem, kuras no pārējām atšķiras ar daudzkārt lielāku magnētisku caurlaidību. Lai vienkāršotu klasifikācijas parametra izvēli, elektrotehnikas kursā par galvenajiem klasifikācijas kritērijiem pamatoti ir pieņemta klasifikācija pēc materiālu agregātvokļa (**gāzveida, šķidri, cietie materiāli**) un elektriskajām vai magnētiskajām īpašībām (**dielektriķi, pusvadītāji, vadītāji, magnētiskie materiāli**) paredzētajā darba režīmā. Šāda klasifikācija palīdz arī definēt atšķirību starp darba kārtībā esošu un bojātu elektroiekārtu. Piemēram, elektroiekārtu materiālu pāreja no viena agregātvokļa citā (piemēram, šķidrums iztvaikošana vai cieta materiāla sašķidrināšanās) parasti saistīta ar iekārtas atteici. Arī materiāla elektrisko īpašību krasa izmaiņa no elektroizolējoša uz elektrovadošu (piemēram, elektroizolācijas caursites rezultātā) nereti nozīmē elektroiekārtas atteici. Savukārt specifiskajiem ferromagnētiķiem jau pie relatīvi nelielām temperatūrām var novērot magnētiskās caurlaidības krasu, neatgriezenisku samazināšanos līdz vērtībām, kas piemīt paramagnētiķiem (t.i. parastajiem materiāliem), kas būtiski ietekmē elektroiekārtas funkcionēšanu. Elektrotehnisko materiālu galīgai izvēlei nepieciešams ievērtēt arī citu būtisku īpašību (mehānisko, termisko, fizikāli ķīmisko u.c.) atbilstību konkrētās konstrukcijas īpatnībām un ekspluatācijas apstākļiem. Metodiskā materiāla nodaļu struktūra ir veidota, ievērojot augstāk minēto klasifikāciju vadoties „no vispārīgā uz konkrēto”. Atsevišķi nodaļās elektrotehniskie materiāli tiek apskatīti, ievērojot kāda būtiska materiāla raksturlieluma (piemēram, termozturības) vērtības pieauguma kārtībā.

2. Elektrotehnisko materiālu raksturlielumi

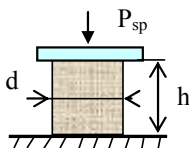
Par raksturlielumu sauc skaitlisku vērtību, kas izsaka kādu no materiāla īpašībām. Lai novērtētu elektrotehniskā materiāla galvenās īpašības, jāzina tā mehāniskie, elektriskie, termiskie, fizikāli ķīmiskie un magnētiskie raksturlielumi.

2.1. Mehāniskie raksturlielumi

Materiāla galvenie mehāniskie raksturlielumi ir stiprība stiepē, stiprība spiedē, stiprība statiskajā liecē, triecienstigrība un cietība.

2.1.1. Stiprība spiedē

Materiāla stiprību spiedē σ_{sp} nosaka paraugiem, kuriem ir cilindra vai kuba forma. Veidotām vai presētām plastmasām šo raksturlielumu nosaka 15 mm augstiem pilniem cilindriem, kuru diametrs ir 10 mm.



1. att. **Parauga pārbaude spiedē.**

d – parauga diametrs,
h – parauga augstums.

Paraugu novieto starp tērauda plāksnēm, kurām pieliek spiedes slodzi (1. att.). To palielina ar noteiktu ātrumu līdz parauga sagraušanas momentam.

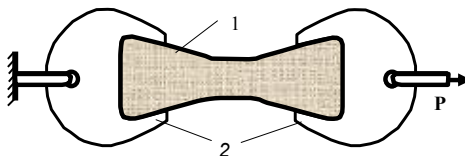
Materiāla stiprību spiedē, Pa, aprēķina pēc formulas:

$$\sigma_{st} = \frac{P}{S_0}$$

2.1.2. Stiprība stiepē

Materiāla stiprību stiepē σ_{st} nosaka noteiktas formas materiālu paraugiem, kuru forma nodrošina stiepes slodzes vienmērīgu sadalījumu parauga vidusdaļas šķērsgrīzumā. Parauga 1 pasesnīnātos galus iestiprina pārbaudes mašīnas apskavās 2 (2. att.).

2. att. **Parauga iestiprināšana pārbaudes mašīnas apskavās.** 1 – paraugs; 2 – apskavas.



Mašīnas apakšējā spīle ir nekustīga, bet otrai spīlei pieliek stiepes spēku P_{st} . Pārbaudes mašīnas pieraksta slodzes un uzņem stiepes diagrammu. Pārbaudes sākumā, kad slodze ir neliela, parauga pagarinājums ir proporcionāls slodzei. Slodzei vēl pieaugot, sākas materiāla tecēšana un visbeidzot tas tiek sagrauts. Spriegumu σ_{st} , kas atbilst lielākai slodzei P_{st} pirms parauga sagraušanas, sauc par stiprību stiepē:

$$\sigma_{st} = \frac{P_{st}}{S_0}$$

2.1.3. Relatīvais pagarinājums

Svarīga elektrotehnisko materiālu īpašība, kas ir sekas stiepes spēku iedarbībai, ir relatīvais pagarinājums. Relatīvais pagarinājums ir attiecība starp parauga sākotnējo garumu un tā garumu pārraušanas brīdī; to izsaka procentos:

$$\Delta l = \frac{(l_k - l_0)100}{l_0},$$

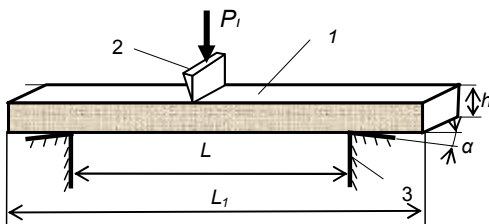
kur: l_k – parauga garums pēc pārraušanas, m;

l_0 – parauga sākotnējais garums, m.

2.1.4. Stiprība liecē

Materiāla stiprību statistiskajā liecē σ_1 nosaka materiāla taisnstūrveida šķērsriezuma stienīšiem. Materiāla paraugu 2 (3. att.) ievieto pārbaudes mašīnā tā, ka parauga gali brīvi balstās uz diviem tērauda atbalstiem 3.

Lieces slodzi P_l , kas pielikta parauga 2 vidū ar tērauda uzgaļa 1 starpniecību, vienmērīgi palielina tik ilgi, kamēr paraugs tiek sagrauts.



3. att. **Parauga ievietošana pārbaudes mašīnā.** 1 – paraugs; 2 – spiednis; 3 – atbalsts.

Materiāla stiprību statistiskajā liecē aprēķina pēc formulas:

$$\sigma_i = \frac{1,5 P_l L}{bh^2},$$

kur: P_1 – graužošā lieses slodze, N; L – atstatums starp tērauda atbalstiem pārbaudes mašīnā, m;

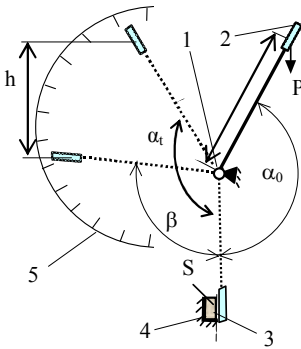
b – parauga platums, m;

h – parauga biezums, m.

Materiālu paraugiem izmanto plāksnītes, kuru šķērsriezums ir 10x15 mm, bet garums – 120 mm.

2.1.5. Trieciensstigrība

Trieciensstigrību nosaka paraugiem, kas ir vai nu 120 mm gari stienši ar šķērsriezumu 15x10 mm (plastmasas), vai arī pilni cilindri. Materiāla paraugu novieto svārsta tipa pārbaudes ierīcē uz atbalstiem 3 (4. att.).



4. att. Svārsta iekārta trieciensstigrības noteikšanai: 1 – šamīrs; 2 – svārsts ar tērauda uzgali; 3 – paraugs; 4 – atbalsts; 5 – skala.

Pa pētāmā parauga centru sit ar krītoša svārsta tērauda uzgali 2, kas sagrauj paraugu.

Parauga sagraušanai patērētais darbs A ir starpība starp svārsta tukšgaitas gājiena (pagriezes leņķis – α_t) un darba gājiena (pagriezes leņķis – β) potenciālajām enerģijām, kuru var aprēķināt kā svārsta smaguma centru starpības h reizinājumu ar svārsta svaru. Zinot leņķu α_t un β rādījumus un parauga šķērsriezuma laukumu S_0 , trieciensstigrību a aprēķina kā darba A , ko svārsts patērē parauga sagraušanai, un parauga sākotnējā šķērsriezuma laukuma S_0 attiecību:

$$a = \frac{A}{S_0} = \frac{Pl(\cos \beta - \cos \alpha_t)}{S_0}, \quad (4)$$

kur: P – svārsta vars, l – attālums no svārsta rotācijas ass līdz tā smaguma centram, m; α_t – svārsta maksimālais pagriezes leņķis tukšgaitas gājiena beigās; β – svārsta maksimālais pagriezes leņķis darba gājiena beigās; S_0 – parauga šķērsriezuma laukums, m^2 .

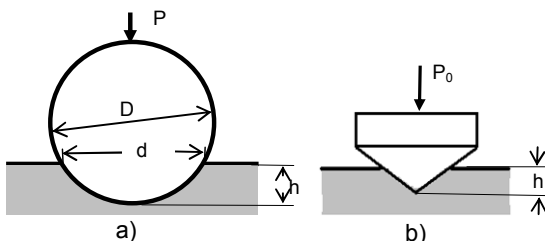
Triecienstigrība raksturo materiāla trauslumu – jo mazāka triecienstigrība, jo materiāls ir trauslāks.

2.1.6. Cietība

Par cietību sauc materiāla spēju pretoties plastiskai deformācijai, ko rada cita, cietāka ķermeņa iespiešanās bez parauga sagraušanas. Plašāk pielietojamās cietības noteikšanas metodes ir Brinela, Rokvela un Vikersa metodes.

2.1.6.1. Brinela metode

Šī cietības noteikšanas metode pamatojas uz to, ka pārbaudāmā materiāla virsmā ar pastāvīgu slodzi P iespējž rūdītu tērauda lodīti (5. att. a).



5. att. Cietības noteikšanas shēmas:
a – ar lodīti; b – ar konusu vai prizmu

Pēc slodzes noņemšanas materiālā paliek iespiedums ar diametru d un dziļumu h .

Cietība, pēc Brinela, HB ir slodzes attiecība pret iegūtā iespieduma virsmas laukumu:

$$HB = \frac{2P}{\pi D[D - (D^2 - d^2)]} = \frac{P}{\pi Dh}, Pa.$$

Lodītes diametru D un slodzi P izvēlas atkarībā no pārbaudāmā materiāla sastāva, cietības un parauga biezuma. Cietības noteikšanai tēraudam un čugunam izmanto lodīti ar diametru $D = 10$ mm un slodzi $P = 30$ kN, vara sakausējumiem – $D = 10$ mm, $P = 10$ kN, mīkstiem metāliem – $D = 10$ mm, $P = 2,5$ kN.

Lai noteiktu cietību metāliem, izmēra iespieduma diametru d un pēc tabulām nosaka cietību. Plastmasām, kas ir ļoti elastīgas, cietību nosaka, izmērot lodītes iespieduma dziļumu h zem slodzes (slogošanas ilgums 60 s) un aprēķinot cietības skaitli. Brinela metodi nedrīkst lietot materiāliem, kuru cietība lielāka par $HB 450$, jo lodīte var deformēties. To nedrīkst lietot arī plānu materiālu cietības noteikšanai.

2.1.6.2. Rokvela metode

Pēc šīs metodes materiālā iespiež dimanta konusu ar virsotnes leņķi 120° vai rūdītu tērauda lodīti ar diametru 1,588 mm un mēra iespaiduma dziļumu pirms un pēc sloģošanas. Dimanta konusu lieto cietiem, bet lodīti – mīkstiemi materiāliem.

Konusu un lodīti sloģo ar divām secīgām slodžēm: priekšslodzi $P_0 = 10$ kG un pamatslodzi – konusam $P_1 = 50$ kG (A skala) vai $P_1 = 140$ kG (C skala), lodītei $P_1 = 90$ kG (B skala). Cietību pēc Rokvela metodes mēra nosacītās vienībās, kas atbilst uzgaļa pārvietojumam 0,002 mm. To aprēķina pēc šādas formulas:

$$HR = \frac{k - (h_1 - h_0)}{c},$$

kur: h_0 – iespaiduma dziļums (mm) zem slodzes P_0 ;

h – iespaiduma dziļums (mm) pēc pamatslodzes noņemšanas, paliekot priekšslodzei P_0 ;

k – pastāvīgs lielums, kas lodītei ir 0,26, konusveida uzgalim 0,2; c – indikatora iedaļas vērtība (0,002 mm).

Rokvela cietības skaitlis raksturo uzgaļa iespaidumu dziļumu starpību; jo cietāks metāls, jo šī starpība ir mazāka. Iespaidumu dziļumu starpību automātiski uzrāda uz pārbaudes aparāta indikatora skalas. Rokvela cietības skaitli apzīmē ar burtiem HR, pierakstot arī lietotās skalas apzīmējumu. Tā, piemēram, ja lietota C skala, raksta HRC 64. Visplašāk lieto C skalu; to izmanto rūdītu tēraudu un cietu virsmas slāņu cietības pārbaudei.

2.1.5.3. Vikersa metode

Šo cietības pārbaudes metodi lieto plānu detaļu un plānu virsmas slāņu cietības noteikšanai. Cietību nosaka, iespiežot pārbaudāmajā virsmā četrstūra dimanta piramīdu (leņķis starp skaldnēm 136°) un izmērot rombiskā iespaiduma diagonāles garumu. Cietību pēc Vikersa nosaka, aprēķinot attiecību starp piramīdai pielikto slodzi P un iespaiduma virsmas laukumu pēc šādas formulas:

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,8544P}{d^2}, \frac{kG}{mm^2},$$

kur P – piramīdai pieliktā slodze (5, 10, 20, 30, 50, 100, 120 kG);

α – leņķis starp piramīdas pretējām skaldnēm;

d – vidējais diagonāles garums (mm).

Slodzes lielumu izvēlas atkarībā no pārbaudāmā materiāla biezuma – jo plānāks materiāls, jo mazāka slodze piramīdai jāpieliek. Zinot izmērītās diagonāles garumu, Vikersa cietības skaitli var noteikt pēc tabulām.

2.2. Materiālu elektriskie raksturlielumi

Materiālu elektriskajiem raksturlielumiem ir vislielākā nozīme, jo elektromateriāli ekspluatācijas laikā ir pakļauti stipru elektrisko lauku iedarbībai un materiāla caursite noved pie iekārtas atteices.

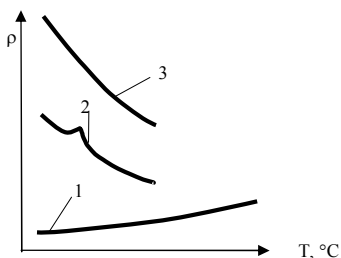
2.2.1. Īpatnējā elektriskā pretestība

Ikviens elektrotehniskais materiāls – vadītājs, pusvadītājs un pat dielektriķis – vada elektrisko strāvu. Lai novērtētu kāda materiāla elektrovadītspēju, jānosaka šī materiāla īpatnējā elektriskā pretestība. Īpatnējo elektrisko pretestību, $\Omega \cdot m$, aprēķina pēc formulas:

$$\rho = R \frac{S}{l},$$

kur R – materiāla parauga kopējā elektriskā pretestība, Ω ; S – materiāla parauga laukums, caur kuru plūst strāva, m^2 ; l – strāvas ceļa garums materiāla paraugā, m .

Mērvienība SI sistēmā ir $\Omega \cdot m$. Dažreiz īpatnējo elektrisko pretestību izsaka ar vienību $\Omega \cdot cm$ ($1 \Omega \cdot cm = 0,01 \Omega \cdot m$). Metāla vadītājiem īpatnējā pretestība ir ļoti maza – $\rho = 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$. Tas norāda uz vadītāju materiālu lielo elektrovadītspēju. Elektrotehnisko materiālu īpatnējā pretestība lielā mērā ir atkarīga no temperatūras (6. att.).



6. att. **Materiālu īpatnējās pretestības atkarība no temperatūras:** 1 – vadītājiem; 2 – pusvadītājiem; 3 – dielektriķiem.

Pusvadītāju materiālu īpatnējo pretestību vērtības ir lielākas nekā vadītājiem materiāliem ($\rho = 10^{-4} \dots 1,0^{-8} \Omega \cdot m$), bet dielektriķiem vēl lielākas – $\rho = 10^8 \dots 1,0^{18} \Omega \cdot m$.

Dielektriķu īpatnējo pretestību lielās skaitliskās vērtības norāda uz šo materiālu visai niecīgo elektrovadītspēju. Dielektriķiem jāievēro divas īpatnējās pretestības: īpatnējā tilpuma pretestība ρ_v un īpatnējā virsmas pretestība ρ_s .

Īpatnējo tilpuma pretestību var novērtēt pēc dielektriķa elektriskās pretestības, ja caur dielektriķi plūst strāva. Īpatnējo virsmas pretestību var novērtēt pēc dielektriķa pretestības, ja strāva plūst pa dielektriķa virsmu. Īpatnējo virsmas pretestību mēra omos (Ω). Skaitliski ρ_s vērtības vienmēr ir mazākas par ρ_v vērtībām (tās ir $10^9 \dots 10^{16} \Omega$).

Vadītājiem materiāliem un pusvadītājiem mēra tikai kopējo īpatnējo pretestību ρ , jo šiem materiāliem neizšķir tilpuma un virsmas strāvas.

Īpatnējās pretestības temperatūras koeficients α_p ir raksturlielums, ar kuru var novērtēt materiāla īpatnējās elektriskās pretestības izmaiņas, mainoties tā temperatūrai. Lineārās īpatnējās pretestības izmaiņas α_p aprēķina pēc formulas:

$$\alpha_p = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(t_2 - t_1)},$$

kur ρ_1 – materiāla īpatnējā elektriskā pretestība sākuma temperatūrā; ρ_2 – materiāla īpatnējā elektriskā pretestība temperatūrā T_2 .

No 5. attēla var secināt, ka vadītājiem materiāliem $\alpha_p > 0$. Tas norāda uz elektriskās pretestības palielināšanos, palielinoties vadītāja materiāla temperatūrai. Pusvadītājiem un dielektriķiem $\alpha_p < 0$, kas norāda uz pretestības samazināšanos, paaugstinoties šo materiālu temperatūrai. Paaugstinoties temperatūrai, metālu īpatnējā pretestība palielinās. Tas izskaidrojams ar elektronu kustīguma samazināšanos – temperatūras paaugstināšanās rezultātā palielinās režģa mezglu jonu termiskās svārstību kustības intensitāte un amplitūda, kas kavē elektronu dreifu pretēji elektriskā lauka virzienam, t. i., samazina elektronu brīvā noskrējiena garumu. Metālam izkūstot, šī paša iemesla dēļ elektrovadītspēja lēcienveidā samazinās. Daudziem tīriem metāliem, paaugstinot temperatūru no vērtībām, kas nedaudz pārsniedz absolūto nulli, līdz kušanas temperatūrai t_{kus} , īpatnējā pretestība palielinās gandrīz lineāri. Temperatūru pazeminot līdz absolūtajai nullei, metālu īpatnējā pretestība kļūst vienāda ar nulli, jo režģa termiskās svārstības pilnīgi izzūd, tādēļ elektronu brīvā noskrējiena garums un kustīgums kļūst neierobežoti lieli.

Visiem sakausējumiem un arī dažiem tīriem metāliem (piemēram, dzelzij) īpatnējās pretestības atkarība no temperatūras ir sarežģītāka. Īpatnējā elektriskā pretestība vairumam metālu krasi palielinās, pārejot no cieta stāvokļa šķidrā. Piemēram, varam izkūstot tā palielināt apmēram 2,4 reizes.

Specifiski efekti veidojas, ja ir kontaktu temperatūru atšķirības elektriskā ķēdē, kas sastāv no dažādiem virknē saslēgtiem vadītājiem materiāliem, jo šajā gadījumā rodas pirmspriegums jeb elektrodzinējspēks. Šo parādību sauc par **Zēbeka termoelektrisko efektu**, bet radušos pirmspriegumu – par **termopirmspriegumu** (termo-EDS).

Zēbeka efekts izskaidrojams ar to, ka brīvo elektronu saistība dažādos materiālos ir atšķirīga. Ja metāls atrodas vakuumā vai gaisā, elektronu gāzes spiediena dēļ daļa elektronu difundē apkārtējā vidē. Tā rezultātā starp metālu un apkārtējo vidi rodas potenciālu starpība, jo metāls uzlādējas pozitīvi. Potenciālu starpībai palielinoties, metāls sāk arvien stiprāk pievilkt difundējušos elektronus, līdz iestājas

dinamisks līdzsvars starp elektronu difūziju un atgriešanos metālā. Potenciālu starpību, kas atbilst līdzsvara stāvoklim, sauc par attiecīgā metāla potenciālu.

2.2.2. Dielektriskā caurlaidība

Zinot dielektrisko caurlaidību ϵ_r , var novērtēt dielektriķa spēju veidot elektrisku kapacitāti. Kā zināms, divu metāla klājumu veidota plakana kondensatora kapacitāte C ir tieši proporcionāla dielektriskās caurlaidības lielumam ϵ_r :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h},$$

kur h – atstatums starp klājumiem (dielektriķa biezums), m; S – kondensatora viena klājuma laukums, m^2 ; ϵ_0 – elektriskā konstante ($\epsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12}$ F/m) ϵ_r – dielektriskā caurlaidība (bez vienības).

Dielektrisko materiālu dielektriskā caurlaidība ir atkarīga no polarizācijas procesu intensitātes, kuri norisinās dielektriķos tiem pieliktā sprieguma ietekmē. Izšķir četrus galvenos dielektriķu polarizācijas veidus: elektronu polarizāciju, dipolu polarizāciju, jonu polarizāciju un domēnu polarizāciju.

Elektronu polarizācija ir elastīga elektronu apvalku nobīde attiecībā pret kodolu dielektriķa atomos (vai jonos). Elektronu polarizācija noris bez izņēmuma visos dielektriķos.

Dipolu polarizācija ir polāro molekulu (dipolu) pagriešanās. Šo polarizācijas veidu novēro tikai polāriem organiskiem dielektriķiem, kas sastāv no polārām molekulām, kurām ir elektrisks moments. Dielektriķus, kuru molekulām elektrisku momentu nav, sauc par nepolāriem dielektriķiem.

Tā kā nepolāros dielektriķos vienīgais polarizācijas veids ir elektronu polarizācija, tad šo dielektriķu dielektriskā caurlaidība nav liela $\epsilon_r = 1,0 - 2,2$. Polāriem dielektriķiem polarizācijas intensitāte ir lielāka nekā nepolāriem dielektriķiem, jo šajos dielektriķos darbojas divi polarizācijas veidi: dipolu polarizācija un elektronu polarizācija. Tāpēc polāro dielektriķu dielektriskā caurlaidība ir lielāka nekā nepolāro dielektriķu caurlaidība ($\epsilon_r = 3 - 8$).

Jonu polarizācija ir elastīga jonu nobīde no sava līdzsvara stāvokļa. Tā raksturīga dažiem neorganiskajiem dielektriķiem (vizlai, elektrokeramikai). Polarizācijas procesa intensitāte jonu dielektriķiem ir liela, tāpēc to dielektriskā caurlaidība ir 8 – 20 un lielāka.

Domēnu polarizācija novērojama īpašai dielektriķu grupai, kurus sauc par segnetoelektriķiem. Tipisks šīs dielektriķu grupas pārstāvis ir segneta sāls $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Segnetoelektriķos ir apgabali (domēni) ar orientētiem dipoliem. Pievienojot spriegumu, segnetoelektriķī sākas intensīvs domēnu polarizācijas process. Tas izpaužas kā dipolu pagriešanās segnetoelektriķa domēnos elektriskā lauka spēku ietekmē. Vienlaikus segnetoelektriķī norisinās arī jonu un elektronu polarizācijas procesi. Segnetoelektriķu dielektriskās caurlaidības vērtība sasniedz 1500 – 4500 un vairāk.

Dielektrisko materiālu dielektriskā caurlaidība mainās atkarībā no temperatūras, pieliktā sprieguma frekvences un citiem faktoriem.

2.2.3. Dielektrisko zudumu leņķa tangenss

Ja metāla vadītāja gabalu vienreiz pieslēdz līdzspriegumam, bet otrreiz maiņspriegumam, kura efektīvā vērtība vienāda ar līdzspriegumu, tad enerģijas zudumi abos gadījumos ir vienādi, tātad $P_{\sim} = P_{-}$.

Ja šo pašu mēģinājumu izdara ar polāru organisku dielektriķi, tad enerģijas zudumi maiņsprieguma gadījumā daudzkārt pārsniedz enerģijas zudumus līdzsprieguma gadījumā, tātad $P_{\sim} \gg P_{-}$. Aktīvās jaudas zudumus dielektriķī sauc par dielektriskajiem zudumiem.

Aktīvās jaudas zudumu dielektriķī (mērvienība W), ja tam pieslēgts līdzspriegums, aprēķina pēc formulas

$$P = U I,$$

kur I – caur dielektriķi plūstošās strāvas stiprums, A;

U – dielektriķim pieliktais līdzspriegums, V.

Maiņsprieguma gadījumā dielektriskos zudumus aprēķina pēc formulas:

$$P_a = U^2 2\pi f C \operatorname{tg} \delta,$$

kur U – dielektriķim pieliktais maiņspriegums, V; f – frekvence, Hz; C – dielektriķa (izolācijas) kapacitāte, F.

No izteiksmes izriet, ka noteikta sprieguma U , frekvences f un dielektriķa kapacitātes C gadījumā aktīvie zudumi tajā ir atkarīgi no lieluma $\operatorname{tg} \delta$. Gāzveida dielektriķim $\operatorname{tg} \delta = 10^{-6} \dots 10^{-5}$, tāpēc gāzveida dielektriķus (gaisu u.c.) izmanto etalonkondensatoros.

Labākajiem šķidrājiem un cietajiem dielektriķiem $\operatorname{tg} \delta = (2 - 6) \cdot 10^{-4}$, bet pārējiem – $\operatorname{tg} \delta = 0,002 \dots 0,05$. Līdz ar to $\operatorname{tg} \delta$ dielektriķos raksturo enerģijas zudumus. Šis lielums ļoti atkarīgs no dielektriķa temperatūras. Nepolārā dielektriķī $\operatorname{tg} \delta$ palielināšanos un tātad arī enerģijas zudumu palielināšanos tajā izraisa caurplūdes strāvas palielināšanās. Dielektriķim uzsilstot, brīvo jonu koncentrācija pieaug un tā

rezultātā caurplūdes strāva palielinās.

2.2.4. Elektriskā izturība

Elektriskā izturība E_c ir elektriskā lauka intensitātes līmenis, kuru sasniedzot notiek caursite – dielektriķī izveidojas strāvu vadošs kanāls ar lielu vadītspēju. Dielektriķa elektrisko izturību (mērvienība SI sistēmā MV/m), aprēķina pēc formulas:

$$E_c = \frac{U}{h},$$

kur U_c – caursites spriegums, kuru sasniedzot notiek dielektriķa caursite, kV;

h – dielektriķa biezums caursites vietā, mm.

2.3. Materiālu termiskie raksturlielumi

Zinot termiskos raksturlielumus, var novērtēt materiālu ekspluatācijas noslodzes iespējas. Tam ir svarīga nozīme, jo lielākā daļa materiālu elektriskajās mašīnās un aparātos atrodas paaugstinātā temperatūrā. Turmāk ir paskaidroti galvenie termiskie raksturlielumi.

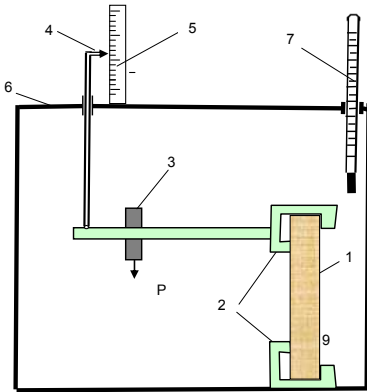
2.3.1. Kušanas temperatūra

Kušanas temperatūra ($t_{kuš}$) ir raksturīga kristāliskas struktūras materiāliem, kas noteiktā temperatūrā pāriet no cieta stāvokļa šķidrā stāvoklī. Materiāli ar kristālisku struktūru ir praktiski visi metāli, daļa pusvadītāju un daži dielektriķi.

2.3.2. Mīkstapšanas temperatūra

Mīkstapšanas temperatūra ir raksturīga vielām ar amorfu struktūru – vielas, kuram struktūras elementi nav sakārtoti kristāliskā režģī, bet izvietoti haotiski (sveķiem, bitumeniem u. c). Šiem materiāliem pāreja no cieta stāvokļa šķidrā stāvoklī nenotiek stingri noteiktā temperatūrā, bet gan kādā temperatūru intervālā. Tāpēc amorfos materiālus raksturo ar nosacītu mīkstapšanas temperatūru, kuru sasniedzot materiāls kļūst viskozi plūstošs. Materiālu nevar lietot temperatūrā, kas tuva tā mīkstapšanas temperatūrai, jo tad tas kļūst mīksts un var plūst.

2.3.3. Siltumizturība



Siltumizturība ir raksturlielums, ar kuru var novērtēt, kā dielektriķis iztur īslaicīgu sasīšanu. Siltumizturību nosaka Martensa aparātā (7. att.) paraugiem, kas izveidoti kā 120 mm gari stienīši ar 10x15 mm šķērsgriezumu.

Kameru silda ar elektriskajiem stieples sildelementiem. Parauga stienīša augšējam galam uzbīda tērauda spaili 2, kam pievienots stienis ar slogu 3. Uz stieņa brīvā gala balstās tievs tērauda stienītis ar rādītāju 4. Slogu 3 uz stieņa novieto ar tādu aprēķinu, lai lieces spriegumi stienīša bīstamajā šķērsgriezumā

būtu 5 MPa.

Martensa aparātā vienlaikus ievieto trīs materiāla paraugus, novietojot starp tiem divus termometrus 7. Izmantojot termoregulatoru, temperatūru termostātā paaugstina ar ātrumu 50 K/h. Sildīšanas un lieces momenta vienlaicīgas iedarbības rezultātā paraugi sāk deformēties – izliekties. Stieņa brīvais gals ar slogu 3 un rādītājs 4 pārvietojas uz leju. Stieņa 5 gala pārvietošanās lielumu fiksē rādītājs 2 uz milimetru skalas 3.

Par siltumizturību, kas noteikta pēc šīs metodes, pieņem temperatūru, kuru sasniedzot, parauga deformācijas rezultātā rādītājs 2 uz skalas pārvietojas uz leju par 6 mm. Temperatūras vidējo aritmētisko lielumu aprēķina pēc divu termometru rādījumiem, vienlaikus pārbaudot trīs dotā materiāla paraugus. Tā, piemēram, polistirola siltumizturība pēc Martensa ir 75 – 80 °C, bet getinaksa siltumizturība – 150 – 170 °C.

2.3.4. Termoizturība

Termoizturība ir dielektriskā materiāla spēja ilgstoši izturēt paaugstinātu temperatūru, nepieļaujami nepasliktinoties tā īpašībām. Elektroizolācijas materiālus pēc termoizturības iedala šādās klasēs (1. tabula).

Pie Y klases pieder organiskie dielektriķi: dažu marķu polistirols un polietilēns; epiesūcinātie šķiedrie materiāli: kartoni, papīri, kokvilnas materiāli, dabiskais zīds u.c. Pie A klases pieder ar piesūcināšanas materiāliem piesūcināti papīri, kartoni, kokvilnas un zīda materiāli, kā arī lakaudumi, daudzas plastmasas, getinakss, tekstolīts u.c.

Pie B klases pieder tādi materiāli kā lavsāna plēves un šķiedra, stikla tekstolīts uz rezolsveķu E klases pieder līmētie vizlas materiāli (mikanīti), vairāki stikla šķiedras

materiāli ar termoreaktīvu saistvielu un dažas plastmasas ar neorganisku pildvielu.

1. tabula

Elektroizolācijas materiālu termoizturības klases

Termoizturības klase	Maksimāli pieļaujamā darba temperatūra, °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Virš 180

Pie F klases pieder materiāli, kuru pamatā ir vizla, azbests un stikla šķiedra, kasīmēti vai piesūcināti ar termoizturīgām saistvielām epoksīdlakām u. c).

Pie H klases pieder silīcijorganiskās lakas, ka arī materiālu kompozīcijas, kas sastāv no vizlas un stikla šķiedras un salīmētas ar silīcij organiskiem sveķiem un lakām.

Pie C klases pieder galvenokārt neorganiskas izcelsmes dielektriķi (elektrokeramika, stikli, vizla bez organiskas izcelsmes līmējošiem vai piesūcinošiem sastāvjiem u. c.). No organiskiem lielmolekulāriem dielektriķiem pie šīs klases pieder fluoroplasts-4 un poliimīdi.

Šķidriem dielektriķiem aukstumizturību nosaka pēc sacietēšanas temperatūras, kuru sasniedzot tie kļūst cieti.

Temperatūru, kurā, saskaroties ar atklātu liesmu, uzliesmo tvaiki un gāzes, kas rodas, sildot noteikta tilpuma šķiedru dielektriķi, sauc par tvaiku uzliesmošanas temperatūru.

2.3.5. Aukstumizturība

Par materiāla aukstumizturību sauc tā spēju izturēt zemu temperatūru iedarbību, būtiski nepazeminot tā mehāniskās īpašības. Zemā temperatūrā elastīgie un lokānie dielektriskie materiāli (gumijas, plastmasas, lakas plēves u.c.) saplaisā vai zaudē lokanību.

Būtiskākā no aukstuma iedarbības sekām ir materiāla trauslums zemās temperatūrās. Materiāla elastību zemās temperatūrās pārbauda speciālā aukstuma kamerā (kurā tiek uzturētas zemas temperatūras), saliecot 1,5 mm plāksnīti 90 grādu leņķī vai arī 0,5 mm biezu plāksnīti attiecīgi 180 grādu leņķī. Pakāpeniski kamerā tiek

pazemināta temperatūra un par aukstumizturības robežu tiek uzskatīta zemākā temperatūra, pie kuras plāksnītēs vēl neparādās plaisas.

2.3.6. Siltumvadītspēja

Ar siltumvadītspēju raksturo pārvadītās siltuma enerģijas plūsmu caur noteikta biezuma materiāla plāksni uz vienu tās laukuma vienību. Siltumvadītspējai ir būtiska loma iekārtu (tās elementu) normālu dzesēšanas apstākļu nodrošināšanai. Metāliem ir izteikta kolerācija starp siltumvadītspēju un elektrovadītspēju, piemēram, varam ir izcila siltumvadītspēja un arī elektrovadītspēja. Dielektriķiem siltumvadītspēja ir daudzkārt mazāka, salīdzinot ar metāliem, pie kam tā vēl krasi samazinās, ja materiāliem ir gāzu poru ieslēgumi. Speciālas uzputotas plastmasas ar zemu siltumvadītspēju (piemēram, putu polistirolu) izmanto kā siltumizolējošu materiālu.

2.3.7. Termiskā izplešanās

Praktiski visi materiāli sasilstot izplešas un šādu parādību sauc par termisko izplešanos.

Termiskās izplešanās koeficienti ir atrodamī speciālās rokasgrāmatās. Noteikts, ka metāliem pastāv kolerācijas sakarība starp lineārās izplešanās koeficientu un kušanas temperatūru. Jo augstāka ir metāla kušanas temperatūra, jo mazāks tā lineārās izplešanās temperatūras koeficients. Termiskās izplešanās (jeb lineārās izplešanās) koeficients jāievērtē, piemēram, aprēķinot vadu nokari pie mainīgām vasaras un ziemas temperatūrām.

2.3.8. Siltumabsorbciija

Siltumabsorbciija ir materiāla spēja sasilstot uzņemt noteiktu daudzumu siltuma enerģijas, kas tiek atdota apkārtējā vidē, ja materiālu atdzesē. Šādi materiāli ir izturīgāki pret straujām elektriskās strāvas izmaiņām, piemēram, īsslēguma strāvām.

2.4. Fizikāli ķīmiskie raksturlielumi

Materiālu svarīgas īpašības ir spēja ekspluatācijas laikā izturēt daudzveidīgas ārējo faktoru iedarbības. Materiālu spēju darboties noteiktā vidē var novērtēt zinot to fizikāli ķīmiskās īpašību skaitliskos izteiksmes – raksturlielumus.

2.4.1. Skābes skaitlis

Par skābes skaitli sauc kālija hidroksīda (KOH) miligramu skaitu, kas nepieciešams brīvo skābju neutralizācijai vienā gramā šķidra dielektriķa.

Jo lielāks skābes skaitlis, jo vairāk brīvo skābju ir šķīdrajā dielektriķī un tātad lielāka ir tā vadītspēja, tāpēc, ka skābes elektriskā sprieguma ietekmē viegli sadalās jonos. Bez tam skābes noārda šķiedru elektroizolācijas materiālus (papīru, kokvilnas aptinumu u. c), ar kuriem šķidrās dielektriķis saskaras.

2.4.2. Viskozitāte

Viskozitāte ir iekšējās berzes koeficients, šķidrums daļiņām relatīvi pārvietojoties. Ja viskozitāte ir liela, šķidrums ir biezs un tā daļiņas ir mazkustīgas; ja viskozitāte maza, šķidrums daļiņas ir kustīgas, t. i., šķidrumam raksturīga laba plūstamība.

No viskozitātes ir atkarīga šķidro dielektriķu piesūcināšanas spēja. Jo mazāka piesūcināšanas materiālu (laku, kompaundu) viskozitāte, jo labāk to daļiņas iespiežas tinumu šķīdraidnās izolācijas porās. Viskozitātei palielinoties, šķidro dielektriķu piesūcināšanas spēja samazinās. Lai novērtētu šķidrums iekšējās berzes koeficientu, nosaka kinemātisko viskozitāti un nosacīto viskozitāti (kinemātisko viskozitāti mēra m^2/s , bet nosacīto viskozitāti sekundēs).

Temperatūrai paaugstinoties, visu šķidrums viskozitāte samazinās. Tas izskaidrojams ar savstarpējās iedarbības spēku samazināšanos starp šķidrums daļiņām.

2.4.3. Ūdensabsorbējamība

Ūdensabsorbējamība ir raksturlielums, ar kuru var novērtēt dielektriķa spēju izturēt ūdens iedarbību, kas, iespiežoties materiāla porās, pasliktina tā elektriskos raksturlielumus. Ūdensabsorbējamības noteikšanai cieto dielektriķu paraugus vispirms nosver, bet pēc tam iegremdē traukā ar ūdeni istabas temperatūrā. Pēc 24 stundām (materiāliem ar mazu ūdensabsorbējamību to nosaka paraugiem, kas atradušies ūdenī 48 vai 72 stundas) paraugus no ūdens izņem un vēlreiz nosver.

Materiāla ūdensabsorbējamību W procentos aprēķina pēc formulas:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1},$$

kur m_1 – izžāvēta materiāla parauga masa, g;

m_2 – materiāla parauga masa pēc 24 stundu atrašanās ūdenī, g.

2.4.4. Tropiskā izturība

Tropisko izturību nosaka elektroizolācijas materiāliem, kas paredzēti elektroiekārtām, kuras darbojas tropiskā klimata apstākļos.

Elektroizolācijas materiāli, kas nav aizsargāti ar hermētiski slēgtiem apvalkiem, tropu apstākļos pakļauti šādām iedarbībām: augstai apkārtējā gaisa temperatūrai (45-55 °C); krasām temperatūras izmaiņām diennakts laikā (līdz 40 K un vairāk); mitrā tropiskā klimatā lielam gaisa relatīvajam mitrumam (90-95 %); saules radiācijai (liels gaismas plūsmas un siltuma plūsmas blīvums); pelējumsēņu (mikroorganismu) iedarbībai, kuras sabojā daudzus organiskas izcelsmes izolācijas materiālus; kukaiņiem un grauzējiem, kas sabojā elektroizolāciju atklāta tipa elektroiekārtās; gaisam, kas satur sāļus un putekļus.

Minētie faktori postoši ietekmē tādus organiskos materiālus kā kokvilnas un zīda audumi, kā arī daudzas plastmasas ar koka miltu pildījumu. Šos materiālus var lietot tikai tad, ja tie ievietoti hermētiski slēgtos apvalkos vai arī aizsargāti ar biezu tropiski izturīga kompaunda (epoksīdsveķu un citu tipu kompaundu) kārtu.

Pret tropisko apstākļu iedarbību visizturīgākie ir neorganiskas izcelsmes materiāli – elektrokeramika, bezsārnu stikls u. c. Liela izturība pret tropisko apstākļu iedarbību raksturīga daudziem organiskas izcelsmes sintētiskajiem dielektriķiem (fenolformaldehīdsveķiem, epoksīdsveķiem, polivinilhlorīdam, silīcijorganiskajiem sveķiem, fluoroplastiem un plastmasām uz to bāzes ar neorganiskām pildvielām: stikla šķiedru, azbesta šķiedru, kvarca miltiem, kā arī lakām, emaljām un kompaundiem uz šo sveķu bāzes).

Dielektriskā materiāla vai izstrādājuma tropisko izturību nosaka ar speciālām pārbaudēm.

Kontroljautājumi

1. Kādi ir materiālu galvenie mehāniskie raksturlielumi? Nosauciet to vienības.
2. Kādus parametrus nosaka paraugam pie pārbaudes stiepē?
3. Kā nosaka materiālu triecienstīgrību? Nosauciet tā mērvienību.
4. Kādi ir materiālu galvenie elektriskie raksturlielumi? Nosauciet to vienības.
5. Kā mainās dielektriķu, pusvadītāju un vadītāju īpatnējā elektriskā pretestība atkarībā no temperatūras?
6. Nosauciet materiālu termiskos raksturlielumus.
7. Ar ko atšķiras materiāla siltumizturība no materiāla termoizturības?
8. Kas ir aukstumizturība un kā to nosaka?
9. Kas ir skābes skaitlis un kā to nosaka?
10. Kādi parametri nosaka materiāla tropisko izturību?

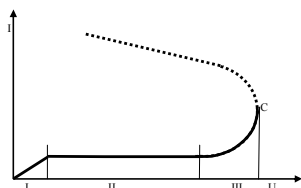
3. Dielektriskie materiāli

Dielektriskos materiālus pēc to agregātstāvokļa var iedalīt gāzveida, šķidrajos un cietajos dielektriķos. Visstabilākie parametri atšķirīgos ekspluatācijas apstākļos ir cietajiem dielektriķiem, tomēr ir iekārtas, kur nepieciešams izmantot gāzveida un šķidro dielektriķu specifiskās īpatnības (dzesēšanas spējas, plūsma kā kinētiskās enerģijas avots u.c.).

3.1. Gāzveida dielektriķi

Izplatītākās elektrotehnikā pielietojamās dielektriskās gāzes ir gaiss, slāpeklis, ūdeņradis, ogļskābā gāze un elegāze.

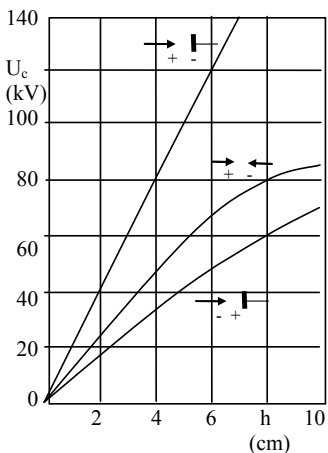
Gāzu caursite notiek elektriskā lauka spriegumam sasniedzot noteiktu vērtību (8. att.).



8. att. Elektriskā strāva gāzēs atkarībā no sprieguma uz elektrodiem.

Elektriskā izturība parasti samazinās, palielinoties dielektriķa biezumam un paaugstinoties temperatūrai. Tipiski elektrodi, starp kuriem veidojas

nehomogēni elektriskie lauki, ir smaile—plakne, smaile—smaile un daudzi citi. Smailes tuvumā spēka līniju koncentrācija ir ļoti liela, tāpēc te ir ļoti liela elektriskā lauka intensitāte, kas var izraisīt gāzu triecienjonizāciju. Pakāpeniski attālinoties no smailes plaknes virzienā, spēka līniju blīvums samazinās; tātad samazinās arī elektriskā lauka intensitāte. Vienlaikus samazinās arī tās jonizējošā iedarbība uz gāzes daļiņām. Gāzu caursiti nehomogēnā laukā ļoti ietekmē elektrodu polaritāte. Viena un tā paša biezuma gāzes slāņa caursites spriegums gadījumā, ja smaile uzlādēta pozitīvi (plāksne uzlādēta negatīvi), ir ievērojami mazāks nekā tad, ja smaiļei ir negatīvs lādiņš (9. att.).



9. att. Gāzu elektriskā caursite dažādas formas un polarizācijas elektrodiem

Tas izskaidrojams ar plazmas (pilnīgi jonizētas gāzes) apgabala veidošanos pie

smailes un tā izplatīšanos negatīvi uzlādētās plāksnes virzienā. Rezultātā smaile it kā «īzaug» cauri gāzes slānim, tā saīsinot dzirksteļveida izlādes ceļu. Gāzes caursītei šādā gadījumā vajadzīgs samērā zems spriegums.

Ja smaile uzlādēta negatīvi, caursītes spriegums ir augstāks nekā tad, ja smaile uzlādēta pozitīvi. Gaisa caursītes spriegums starp divām smailēm ir lielāks nekā pozitīvi uzlādētās smailes un plaknes gadījumā. Tas izskaidrojams ar to, ka starp divām smailēm elektriskais lauks ir mazāk nehomogēns. Lai novērstu elektriskās koronas rašanos un paaugstinātu gāzveida dielektriķu caursītes spriegumu, elektrodu asās malas cenšas noapaļot vai nosegt ar liela diametra metāla aizsargapvalkiem (ekrāniem).

Iepriekš aplūkotas caursītes parādības gāzēs, kurās nav cietu dielektriķu. Praksē bieži novērojama virsmas caursīte jeb gāzes caursīte uz robežvirsmas ar cietu dielektriķi. Kā piemēru var minēt porcelāna izolatoru virsmas dzirksteļpārklāšanos. Tā ir gaisa slāņa caursīte pa cietu dielektriķa virsmu. Visos virsmas caursītes gadījumos caursītes spriegums ir mazāks par caursītes spriegumu tādā pašā attālumā gāzē.

3.2. Šķīdrie dielektriķi

Šķīdros dielektriķus plaši lieto elektrotehniskajās ietaisēs. Ar tiem piepilda spēka transformatorus, reaktoru, eļļas slēdžu, kondensatoru, kabeļu un citu elektroiekārtu elementu iekšējo telpu. Šķīdrie dielektriķi, ja tos iepilda elektroiekārtās vakuumā, labi piesūcina materiālus, ievērojami palielinot to elektrisko izturību. Šķīdrie dielektriķi labi aizvada arī siltumu, piemēram, no transformatoru tinumiem uz tvertnes aukstajām sienām. Jaudas slēdžos šķīdrais dielektriķis ne vien izolē strāvu vadošās daļas, bet arī darbojas arī kā vide, kas dzēs elektrisko loku.

3.2.1. Naftas eļļas

Naftas elektroizolācijas eļļas iegūst no naftaspārstrādes produkta solāreļļas, kas iztvaiko 300 ... 350 °C temperatūrā. Solāreļļu pakāpeniski apstrādājot ar sērskābi un sārmu, no tās atdala ķīmiski nestabilos savienojumus. Pēc tīrīšanas, žāvēšanas un neitralizēšanas iegūst elektroizolācijas eļļas transformatoriem, kondensatoriem un kabeļiem. Kondensatoreļļas un kabeļeļļas ir tīrākas salīdzinot ar transformatoreļļām, tāpēc to elektriskie raksturlielumi ir labāki.

Naftas eļļu ķīmiskais sastāvs ir atkarīgs no naftas sastāva. Visas naftas elektroizolācijas eļļas ir naftēnu, parafīnu un aromātiskās rindas ogļūdeņražu maisījums. Naftēnu ogļūdeņraži ir noslēgtas gredzenveida struktūras oglekļa un ūdeņraža savienojumi ar sānu virknēm. Tos dažkārt sauc arī par cikliskajiem ogļūdeņražiem. Molekulu ķēdītes var būt dažāda garuma atkarība no sava starpā savienoto oglekļa atomu skaita. Parafīnu rindas ogļūdeņražiem raksturīga liela ķīmiskā

stabilitāte, t. i., tie ir izturīgi pret oksidēšanos.

Aromātiskie ogļūdeņraži arī ir cikliski oglekļa un ūdeņraža savienojumi, kas izturīgi pret oksidēšanos. Noslēdzot, ka šo ogļūdeņražu atdalīšana no elektroizolācijas eļļām izraisa eļļas ātrāku oksidēšanos. Tomēr pārāk liels aromātisko ogļūdeņražu daudzums eļļas sastāvā pazemina tas tvaiku uzliesmošanas temperatūru un veicina nogulšņu veidošanos. Tā rezultātā pasliktinās eļļas elektriskie raksturlielumi. Aromātisko ogļūdeņražu daudzums eļļas sastāvā nepārsniedz 10 ... 12 %.

Naftas elektroizolācijas eļļu sastāvā ietilpst arī citi komponenti - organiskās skābes, sveķvielas, divvērtīgā sēra savienojumi un nedaudz nepiesātināto ogļūdeņražu, kas viegli oksidējas. Lielus naftas elektroizolācijas eļļu daudzumus izmanto spēka kabeļos ar papīra izolāciju.

Pēc viskozitātes kabeļeļļas iedala 1) mazviskozās eļļās MH-2; 2) vidēji viskozās eļļās C-110 un C-220; 3) viskozās eļļās. Mazviskoko eļļu MH-2 lieto zemspiediena vai vidēja spiediena (līdz 0,3 MPa) ar eļļu pildītajos kabeļos. Mazā eļļas viskozitāte šādos kabeļos nepieciešama, lai nodrošinātu izolācijas piesūcināšanu ar eļļu pa samēra šaurajiem kanāliem jebkurā ekspluatācijas temperatūrā. Vidēji viskozās eļļas C-110 un C-220 paredzētas ar eļļu pildītu augstsprieguma (110 kV un vairāk) kabeļu piepildīšanai un piesūcināšanai ar spiedienu apmēram 1,4 MPa. Šo eļļu sastāvā nav aromātisko ogļūdeņražu un sveķvielu. Tās ir tehniski tīri naftēnu un parafīnu ogļūdeņražu maisījumi, tāpēc to elektriskie raksturlielumi ir visai stabili. Pašu viskozāko eļļu lieto līdz 35 kV sprieguma kabeļiem ar papīra, izolāciju. To piesūcināšanas šķidrā viela ir naftas eļļa, kurā izšķīdināts kolofonijš. Šķidra izolācija šādos kabeļos neatrodas zem spiediena, un piesūcināšanas eļļas lielā viskozitāte novērš tās pārtecēšanu kabelī, ja tas novietots vertikāli vai slīpi.

Ekspluatācijas procesā visas eļļas saskaras ar elektroiekārtu metāla daļām, kā arī pakļautas paaugstinātas temperatūras un elektriskā lauka iedarbībai. Dažās elektroiekārtās eļļa saskaras ar gaisu. Visi uzskaitītie faktori izraisa eļļas novecošanu (tās pamatā ir eļļas oksidēšanās). Novecošanas procesā eļļā veidojas cieti, sveķveidīgi piemaisījumi, kas daļēji var šķīst karstā eļļā. Šie piemaisījumi nogulsņējas uz transformatora tinumiem un citām tā daļām, apgrūtinot siltuma aizvadišanu no sakarsušajām daļām. Eļļā izšķīdušie piemaisījumi ievērojami pasliktina eļļas elektriskās īpašības. Novecošanas procesā eļļā veidojas skābes un mitrums, kas krasi pazemina izolācijas kvalitāti transformatoros, kabeļos un citās elektroietaisēs.

Lai aizkavētu eļļas novecošanu, tai pievieno vielas, kas aizkavē oksidēšanos, – inhibitorus. Inhibitoru piedevas tomēr pilnīgi nevar pasargāt eļļu no novecošanas. Tāpēc elektroizolācijas eļļas jāuzglabā un jātransportē sausā tarā, jāpārsūknē tikai pa tīriem metāla cauruļvadiem (nevis gumijas šļūtenēm, kas šķīstot piesārņo eļļu).

Ekspluatācijas procesā jāraugās, lai eļļā neiekļūtu gaiss un mitrums. Ar eļļu pildīto aparātu vākiem jābūt blīvi noslēgtiem un apgādātiem ar konservatoriem, t.i., papildvertnēm. Dažreiz transformatoros brīvo telpu virs eļļas līmeņa piepilda ar inertu gāzi, piemēram, slāpekli, kas pasargā eļļu no oksidēšanās.

Neskatoties uz visiem pasākumiem aizsardzībai pret eļļas novecošanu, tā tomēr oksidējas, un ar laiku eļļā uzkrājas cieti un šķidri oksidēšanās produkti un ūdens. Tāpēc ekspluatācijā esošā eļļa laiku pa laikam jāattīra no piemaisījumiem un ūdens, lai atjaunotu tās īpašības. Ir zināmi vairāki attīrīšanas paņēmieni. Ūdeni no eļļas var atdalīt, eļļu karsējot līdz ūdens viršanas temperatūrai un ūdeni iztvaicējot. Tā kā eļļas karsēšana gaisa klātbūtnē veicina novecošanu, eļļu žāvē īpašās vakuumiekārtās.

Cietos piemaisījumus no eļļas var atdalīt ar centrifūgu. Cietās daļiņas, kuru blīvums lielāks nekā eļļai, tiek atsviestas pie centrifūgas sienām un aizvāktas projām.

No šķidrājiem dielektriķiem attīrīt ūdeni un cietās daļiņas var arī ar filtrspiedi, izspiežot caur to sasildītu izolācijas šķidrums ar spiedienu 0,3 ... 0,5 MPa. Izejot caur veselu filtrējamā kartona šķērssienu sistēmu, cietās netīrumu daļiņas paliek uz kartona plākšņu virsmas, mitrums absorbējas kapilāru sienīnās, bet caur kapilāriem izplūst attīrīts un izžāvēts šķidrums dielektriķis.

Ja eļļa ir stipri novecojusi un tās skābes skaitlis pārsniedz 0,4 mg KOH/g, tā jāreģenerē. Ir zināmi vairāki eļļas reģenerācijas paņēmieni. Sevišķi stipri oksidējušās un novecojušās eļļas reģenerē pēc skābes-sārmzemju metodes. Šajā gadījumā reģenerējamai eļļai pievieno 0,5 ... 2 % sērskābes. Skābe saista visus nestabilos savienojumus, pārvēršot tos par skābo gudronu. Pēc nostādīnāšanas eļļu apstrādā ar sārmu, lai neitralizētu organiskās skābes un sērskābes atliekas. Pēc tam eļļu mazgā ar destilētu ūdeni, apstrādā ar adsorbentiem un pēc tam filtrē ar filtrspiedi vai arī centrifugē.

3.2.2. Sintētiskie šķidrie dielektriķi

Naftas elektroizolācijas eļļu trūkumi ir to degtspēja, samērā zemā tvaiku uzliesmošanas temperatūra un mazā dielektriskā permeabilitāte (kondensatoros). Šie trūkumi nepiemīt sintētiskajiem šķidrums, kas sastāv no hlorētajiem ogļūdeņražiem. Šo šķīdumu tipisks pārstāvis ir sovols. Sovolu iegūst, hlorējot izkausētu kristālisku vielu – difenilu $H_3C_6-C_6H_5$.

Caur izkausētu difenilu katalizatoru (alvas, dzelzs u. c.) klātbūtnē laiž hloru. Aizvietošanas reakcijā difenila molekulā ūdeņraža atomus aizstāj hlors. Aizvietojot vairāk par četriem ūdeņraža atomiem, iegūst eļļai līdzīgu produktu. Sovola molekulā ar hloru aizvietoti pieci ūdeņraža atomi $C_{13}H_2C_6-C_6H_3Cl_2$. Tā kā sovola molekulas ir nesimetriskas, tad tās ir polāras, un tāpēc sovols ir polārs dielektriķis. Sovolam ir liela dielektriskā cauraidība ($\epsilon_r = 5,2$), tāpēc tas palielina papīra kondensatoru kapacitāti;

papīru piesūcinot, izzūd gāzu ieslēgumi, tāpēc palielinās arī dielektriķa elektriskā izturība. Šā iemesla dēļ sovolu lieto papīra piesūcināšanai papīra kondensatoros. Sovola tīrība ir nedaudz lielāka nekā naftas eļļām; tā elektriskā izturība ir tuva naftas izolācijas eļļu elektriskajai izturībai. Sovols ir nedegošs, un tā ir sovola galvenā priekšrocība salīdzinājumā ar naftas eļļām. Tomēr tam ir būtiski trūkumi, kas ierobežo tā lietošanu. Sovola sastingšanas temperatūra ir 5 °C. Bez tam sovols ir ļoti viskozs. Tā viskozitāte 40 °C temperatūrā ir apmēram 290·10⁻⁶ m²/s, bet naftas eļļai tā ir 30·10⁻⁶ m²/s. Tāpēc papīru nevar piesūcināt istabas temperatūrā, bet sovols jāuzsilda līdz 50 °C temperatūrai. Liels trūkums ir sovola toksiskums (indīgums), ko izraisa hlora atomi sovola molekulā. Tāpēc sovols neuzliesmo, bet tā tvaiki, kaut arī uzliesmo, tomēr paša šķidrums degšanu neizraisa. Ievērojams sasniegums šķidro sintētisko dielektriķu nozarē bija silīcijorganisko šķidrumu iegūšanas metodes izstrādāšana. Tiem raksturīga ļoti zema sasaldšanas temperatūra (-60 °C), elektrisko raksturlielumu stabilitāte plašā temperatūru intervālā, kā arī liela izturība pret oksidēšanos. Viens no plaši lietotiem silīcijorganiskiem šķidrumiem ir polietilsiloksana šķidrums.

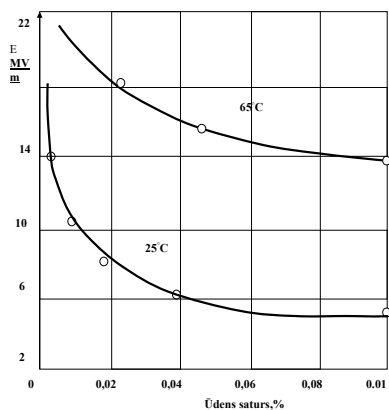
Vēl jāatzīmē, ka visi elektroizolācijas šķidrumi ir visai higroskopiski; mitrums un piemaisījumi krasi pasliktina to elektriskos raksturlielumus (10. att.).

Elektroizolācijas šķidrumi jāuzglabā hermētiski noslēgtos traukos.

Ekspluatācijā esošos šķidros dielektriķos bez jonu elektrokondukcijas vēl novēro arī moljonu kondukciju. Tās pamatā 11 elektriski uzlādētu koloīdu daļiņu pārvietošanās. Dielektrisko zudumu leņķa tangensa pieaugums tiek novērots paaugstinoties šķidro dielektriķu temperatūrai. Attīrīta šķidra dielektriķa tīrība pieaugums ir daudz mazāks nekā dielektriķim, kas jau bijis ekspluatācijā. Tas izskaidrojams ar attīrīta dielektriķa ievērojami mazāku elektrovadītspēju.

Šķidro dielektriķu elektriskā izturība lielā mērā ir atkarīga no tajos suspendētām ūdens, sveķvielu vai citu polāru piemaisījumu koloīdajām daļiņām.

Polārās ūdens vai sveķvielu daļiņas elektrisko spēku ietekmē sakārtojas ķēdīšu veidā; daļiņas, strāvai plūstot, sakarst, iztvaiko un veido gāzu kanālus, pa kuriem tad notiek šķidrā dielektriķa caursite. Ūdens piejaukumu daudzumam palielinoties, šķidrā dielektriķa elektriskā izturība stipri samazinās. Temperatūrai paaugstinoties, daļa



10. att. Transformatoru eļļas elektriskā caursites spriegums atkarībā no ūdens satura.

ūdens vai sveķvielu koloīdo daļiņu izšķīst, tāpēc vadītāja kanāla izveidošanās šķidrā dielektriķī ir apgrūtināta. Līdz ar to dielektriķa elektriskā izturība palielinās.

Līdzīgi ūdens koloīdajām daļiņām izturas arī gāzu burbulīši. Ja tie ir polarizēti, tad elektrisko spēku ietekmē veido gāzes kanālu starp elektrodiem, kuriem pieslēgts spriegums. Causrite arī šajā gadījumā notiek gāzes kanālā. Ja šķidrie dielektriķi satur gaisu vai citas gāzes, tad to elektriskā izturība ir ļoti atkarīga no spiediena. Atgāzēta šķidra dielektriķa elektriskā izturība no spiediena atkarīga daudz mazāk. Šķidro dielektriķu elektriskos raksturlielumus var uzlabot, rūpīgi attīrot no tiem mitrumu un dažādus piemaisījumus, kā arī tos atgāzējot, t.i., izdarot šķidro dielektriķu vakuumapstrādi.

Kontroljautājumi

1. Nosauciet eļģēzes izmantošanas priekšrocības un trūkumus salīdzinot ar citiem gāzveida dielektriķiem?
2. Kādas trīs zonas var izšķirt gāzu caursites diagrammā? Paskaidrot katras zonas būtību.
3. Kādi faktori ietekmē gāzu caursiti starp diviem elektrodiem?
4. Kādas ir ūdeņraža kā gāzes priekšrocības un trūkumi salīdzinot ar citām elektrotehnikā izmantojamām gāzēm?
5. Kādas ir svarīgākās gāzveida un šķidro dielektriķu īpašības elektrotehnikā?
6. Kādas ir būtiskās atšķirības ir starp naftas eļļām un sintētiskajiem šķidrajiem?
7. Kā ūdens saturs ietekmē šķidro dielektriķu elektrisko izturību?
8. Kādi ir šķidrumu oksidācijas samazināšanas paņēmieni šķidrajiem dielektriķiem?
9. Kāpēc jāveic transformatoru eļļu reģenerācija? Kādas metodes iespējams izmantot?
10. Kādas ir būtiskās priekšrocības un būtiskākie trūkumi šķidrumiem un gāzēm kā elektrotehniskajiem materiāliem salīdzinot ar cietajiem materiāliem?

3.3. Cietie dielektriķi

3.3.1. Minerālu dielektriķi

Pie plaši lietotiem minerālu dielektriķiem pieder azbests un azbestcements. Azbests ir dabisks minerāls ar raksturīgu šķiedrainu struktūru. Šķiedras viegli sašķeļamas atsevišķās sīkās šķiedriņās, kuru diametrs nepārsniedz milimetra tūkstošdaļas, bet garums – dažus centimetrus. Dažādu elektroizolācijas materiālu (papīru, diedziņu, lenšu, kartonu) izgatavošanai galvenokārt izmanto hrizotilazbestu $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ jeb magnija silikātu. Azbesta šķiedras neuzsūc mitrumu, bet ūdens tās slapina. Higroskopiskuma un dažādu piemaisījumu dēļ azbesta materiālu (papīru un audumu) elektriskās īpašības ir sliktas ($E_c = 1 \dots 2 \text{ MV/m}$). Azbesta galvenie raksturlielumi: blīvums 2500 kg/m^3 ; $\sigma_{st} = 30 \dots 40 \text{ MPa}$.

Azbesta galvenās priekšrocības ir tā termoizturība un nedegamība. Apmēram $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā azbests kūst. Azbesta darba temperatūra nepārsniedz $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatūrā virs $450 \text{ }^\circ\text{C}$ no azbesta sāk izdalīties ķīmiski saistītais ūdens un azbesta šķiedra zaudē mehānisko izturību.

No azbesta šķiedrām gatavo $0,2 \dots 1 \text{ mm}$ biezu elektroizolācijas papīru un $2 \dots 10 \text{ mm}$ biezus kartonus, kā arī pītas azbesta auduma lentes, pievienojot apmēram 30% kokvilnas šķiedru, lai palielinātu azbesta mehānisko izturību. Lentes biezums ir $0,4 \dots 0,6 \text{ mm}$, bet platums – $20 \dots 30 \text{ mm}$. Tās lieto augstsprieguma elektrisko mašīnu polu spoļu un sekciju tinumu izolācijai. Gandrīz visus azbesta materiālus lieto tikai pēc piesūcināšanas ar lakām vai kompaundiem. Piesūcināšana novērš azbesta papīru un audumu higroskopiskumu, kā arī uzlabo to elektriskos raksturlielumus.

Azbestcimentu izgatavo no azbesta šķiedras un portlandcimenta. Tā ir neorganiska plastmasa, kurā par saistvielu lietots portlandcements, bet par pildvielu - azbesta šķiedra. Azbestcimenta pagatavošanas process sastāv no sasmalcināta azbesta sajaukšanas ar cementu un ūdeni. No rūpīgi sajaukta maisījuma īpašā azbestcimenta mašīnā izlej materiāla loksnes. Mitrās loksnes presē, žāvē un sagriež plātēs.

Rūpniecībā ražojamām plātēm ir šādi izmēri: garums 1200 mm , platums 700 mm un 800 mm ar biezumu no 6 līdz 40 mm . Plātes mehānisko izturību raksturo triecienstīgrība, kas nedrīkst būt mazāka par $29 \dots 78 \text{ kJ/m}^2$.

Nepiesūcinātu azbestcimenta plašu ūdensabsorbējamība ir liela: $15 \dots 20\%$. Tāpēc zemsprieguma elektroierīcēm (kontaktoru pamatnēm, elektrisko aparātu šķērssienu un dzirksteļu dzēšanas kamerām) galvenokārt izmanto piesūcinātas azbestcimenta plātes. Azbestcimenta izstrādājumus pēc to iepriekšējās mehāniskās apstrādes (urbšanas, frēzēšanas u.c.) un izstrādājumu žāvēšanas $110 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā piesūcina ar izkausētu parafīnu,

3.3.2. Vizlas materiāli

Vizla ir dabā atrodamas minerāls ar monokristālisku struktūru. Tās mehāniskās īpašības ļoti anizotropas, tāpēc vizlas kristālus var saskaldīt plānās plāksnītēs (plāksnīšu biezums var būt mazāks par 0,006 mm). Plānās vizlas plāksnītes ir lokanas un elastīgas, un to stiprība stiepē $\sigma_{st} = 1,5 \dots 3,5$ MPa. Salīmējot vizlas plāksnītes ar līmējošiem sveķiem vai lakām (šellaku, gliftāllakām u. c), iegūst cietu (mikanīts) vai lokanu (mikalente) vizlas izolāciju elektrisko mašīnu tinumiem. No vizlām elektroizolācijas materiāliem lieto tikai muskovītu un flogopītu, jo tiem ir laba sašķejamība un labi elektriskie raksturlielumi.

Muskovīts ir kālija vizla ($K_2O-3Al_2O_3-6SiO_2-2H_2O$). Muskovīta kristāli parasti ir sudrabotā krāsā, dažreiz ar zaļganu vai sarkanīgu nokrāsu. Plānas (0,05 ... 0,06 mm) šīs vizlas plāksnītes ir caurspīdīgas. Muskovīts ir ķīmiski izturīgs, uz to neiedarbojas ne šķīdinātāji, ne sārmī. Sērskābe un sālskābe noārda muskovītu tikai sildot. Muskovīta galvenie raksturlielumi: blīvums 2700 ... 3000 kg/m³; ūdensabsorbējamība 1,3 ... 4,5%; $p_f=10^{12} \dots 10^{14}$ Ω·m; $\epsilon_r = 6 \dots 8$; $tg\delta = 0,0003 \dots 0,0005$; $E_c = 120 \dots 190$ MV/m (ja plāksnītes biezums nepārsniedz 0,01 mm). Biezumam palielinoties, vizlas elektriskā izturība samazinās. Muskovīta struktūra nemainās līdz 500 °C temperatūrai. Pārsniedzot šo temperatūru, no vizlas sāk izdalīties ķīmiski saistītais ūdens.

Flogopīts ir kālija-magnija vizla ($K_2O-6MgO-Al_2O_3-6SiO_2-H_2O$). Flogopīta kristālu krāsa var būt no melnas līdz dzintara dzeltenai. Plānas (0,006 ... 0,01 mm) flogopīta plāksnītes ir puscaurspīdīgas. Salīdzinājumā ar muskovītu, tā stiprība stiepē, kā arī elastība ir mazāka. Samērā lielās nodilumizturības dēļ flogopītu lieto līmēta lokšņu materiālu – kolektoru mikanītu ražošanai. Darba laikā flogopīta izolācijas starplikas pakļautas suku deldējošai iedarbībai, un tās nodilst tikpat, cik vara plāksnītes, līdz ar to tiek nodrošināta kolektora normāla darbība. Salīdzinājumā ar muskovītu flogopīta ķīmiskā izturība ir mazāka. Tas reaģē ar skābēm, bet sārmī uz flogopītu neiedarbojas. Flogopīta galvenie raksturlielumi: blīvums 2700 ... 2800 kg/m³; ūdensabsorbējamība 1,5 ... 5,2%; $p_f=10^n \dots 10^{13}$ Ω·m; $\epsilon_r = 5 \dots 7$; $tg\delta = 0,002 \dots 0,008$; $E_c = 95 \dots 180$ MV/m (ja plāksnīšu biezums nepārsniedz 0,01 mm). Flogopīta struktūra nemainās līdz 800 °C temperatūrai. Pārsniedzot šo temperatūru, flogopīta plāksnītes «uzpūšas», vienlaikus zaudējot sākotnējās elektriskās un mehāniskās īpašības.

Fluorflogopīts ir sintētiskā vizla, kurai salīdzinājumā ar dabiskajām vizlām ir raksturīga augstāka termozturība (līdz 1000 °C), mazāka ūdensabsorbējamība (0,5 ... 2,0 %) un labāki elektriskie raksturlielumi. Lokanais mikanīts ir lokšņu materiāls, kas iegūts, salīmējot šķelto vizlu (muskovītu vai flogopītu) ar eļļas-gliftāllakām, kuras veido lokanas plēves. Rūpniecība ražo presēto un nepresēto lokano mikanītu. Lai

palielinātu dažu lokanā mikanīta veidu mehānisko izturību, tos no abām pusēm aplīmē ar mikalentes papīru. Mikanīta lokšņu biezums ir 0,15 ... 0,5 mm.

Lokanais stiklamikanīts atšķiras no lokanā mikanīta ar to, ka tas no vienas vai abām pusēm aplīmēts ar bezsarmu stikla audumu, kas ievērojami palielina materiāla lokanību un mehānisko izturību. Termoizturīgu lokano mikanītu (H klase) izgatavo ar silīcijorganisku saistvielu. Pārējos stiklamikanītus līmē ar eļļas-gliftāllakām vai epoksīdpoliesterlakām. Lokano stiklamikanītu sastāvā ir 45 ... 65% vizlas, 30 ... 8% saistvielu, bet pārējais – stikla audums. So mikanītu biezums ir 0,20 ... 0,60 mm. Lokano mikanītu elektriskie raksturlielumi: $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \Omega \cdot m$; $tg\delta = 0,05 \dots 0,09$; $E_c = 12 \dots 28 \text{ MV/m}$. Visu veidu mikanītus, kuru pamatā ir silīcijorganiska saistviela, var ilgstoši lietot 180 °C temperatūrā (H klase); mikanītus, kuru pamatā ir poliesteru un epoksīdu līmējošie sastāvi, var ilgstoši lietot 155 °C temperatūrā, bet mikanītus uz šellakas un gliftālsveķu bāzes – temperatūrā, kas nepārsniedz 130 °C.

Mikafolija ir ruļļu vai lokšņu materiāls, kas sastāv no vienas vai vairākām šķeltās vizlas (muskovīta vai flogopīta) kārtām, kuras uzlīmētas uz 0,05 mm bieza telefonu papīra. Par saistvielām lieto gliftāllaku, eļļas-gliftāllaku un citas lakas. Vizlasplasta papīru iegūst, samaļot vizlas atbiras, tikai nelietojot apstrādi augstā (800 °C) temperatūrā un nelietojot ķīmiskus reaģentus. Vizlasplasta papīri, tāpat kā novomikanīta papīri, ir poraini materiāli, tāpēc tos lieto tikai pēc piesūcināšanas ar elektroizolācijas lakām vai kompaundiem. Visperspektīvākās piesūcināšanas vielas un saistvielas ir silīcijorganiskās lakas, jo tās nodrošina termoizturīgu vizlasplasta elektroizolācijas materiālu iegūšanu (lentes u. c). Lietojot atbilstošu piesūcināšanas un saistvielu sastāvu un stikla auduma pamatnes, var iegūt novomikanītu un vizlasplasta materiālu biezums ir daudz vienmērīgāks un to elektriskā izturība ir daudz labāka nekā daudziem šķeltās vizlas līmētajiem materiāliem.

3.3.3. Elektrokeramiskie dielektriķi

Elektrokeramiskie materiāli ir cietas, akmenim līdzīgas vielas, kuras var apstrādāt vienīgi ar abrazīviem (karborundu u. c). Visus elektrokeramiskos materiālus iedala trīs grupās: izolatoru keramika, kondensatoru keramika un segnetoelektriskā keramika. Visi elektrokeramiskie materiāli ir izturīgi pret amaosfēras iedarbību un nav higroskopiski. Viens no plaši lietotiem elektrokeramiskajiem materiāliem ir elektrotehniskais porcelāns. No tā izgatavo dažādu konstrukciju augstsprieguma un zemsprieguma izolatorus.

Elektrotehniskā porcelāna izejvielu masa sastāv no kaolīna (42 ... 50 %), kvarca (20 ... 25 %), kālija laukšpata (22 ... 30 %) un samaltiemi izbrāķētiem porcelāna izstrādājumiem (5 ... 8 %). Izolatoru kvalitatīvai izgatavošanai nepieciešama mīklai

līdzīga masa, tāpēc samaltajiem komponentiem pievieno 20 ... 22 % ūdens. Pēc tam mīklai līdzīgo porcelāna masu apstrādā vakuumā, lai izdalītu no tās gaisa ieslēgumus.

Izolatorus veido, presējot sagataves ģipša vai tērauda veidnēs. Izzāvētos porcelāna izstrādājumus pārklāj ar šķidru glazūras suspensiju (glazūru). Elektroporcelāna izstrādājumu apdedzināšanas procesā glazūras slānis kūst, izveidojot uz izstrādājuma virsmas gludu stiklveida pārklājumu. Glazūra padara izolatorus mehāniski izturīgākus un pasargā tos no mitruma un atmosfēras piesārņojuma ietekmes. Izolatoru termisko apstrādi – apdedzināšanu – izdara nepārtrauktas darbības tuneļkrāsnīs.

Cits elektrokeramiskais materiāls ir **steatīts**. Steatīta masu izgatavo no dabā atrodamā minerāla talka $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$, pievienojot tam bārija karbonātu BaCO_3 vai kalcija karbonātu CaCO_3 . Lai steatīta masu padarītu plastisku, tai pievieno 15 ... 20 % mālainu vielu (bentonītu un citus mālus). Steatītiem izlieto vistīrāko šķirņu dabiskā talka akmeni, kurā dzelzs oksīda saturs nepārsniedz 0,5 %. Steatīti atšķiras no elektrotehniskā porcelāna ar lielāku mehānisko izturību un labākiem elektriskajiem raksturlielumiem. Steatīta elektroizolācijas izstrādājumus var lietot līdz 250 °C temperatūrai, būtiski nemainoties to elektriskajiem raksturlielumiem. Elektrotehniskā porcelāna izstrādājumu elektriskie raksturlielumi krasi pasliktinās jau 100 °C temperatūrā.

Steatīts salīdzinājumā ar elektrotehnisko porcelānu ir dārgāks materiāls, jo tā izgatavošanai lieto dārgākas izejvielas. No plastiskas steatīta masas izgatavo steatīta izolatorus un elektroizolācijas izstrādājumus, tos presējot ģipša veidnēs. Visplašāk izplatīta steatīta izstrādājumu spiedienliešana ar parafīna saistvielu. Sagatavotā liešanas masa nonāk liešanas aparātu darba tvertnēs. No turienes to ar 0,3 ... 0,8 MPa spiedienu iepilda tērauda veidnēs. Ar spiedienliešanas paņēmieni izgatavo elektrisko aparātu un instrumentu sarežģīta profila detaļas. Lai lietus izstrādājumus atbrīvotu no parafīna, tos ievieto ugunsizturīgās kastēs – kapsulās un uzsilda līdz 800 °C temperatūrai. Parafīns izdalās no lietajiem izstrādājumiem un iesūcas alumīnija oksīda pulverī. Pēc parafīna izdalīšanās izstrādājumus krāsnī apdedzina 1280 ... 1350 °C temperatūrā.

Keramiskie kondensatoru materiāli atšķiras no keramiskajiem izolatoru materiāliem ar lielāku dielektriskās caurlaidības vērtību ($\epsilon_r = 14 \dots 250$). Tāpēc iespējams izgatavot keramiskos kondensatorus ar lielu kapacitāti un samērā maziem izmēriem. Keramiskie kondensatori nav higroskopiski, un tāpēc tiem nav vajadzīgi aizsargkorpusi vai aizsargapvalki, kas nepieciešami vizlas vai papīra kondensatoriem.

Minerālus vai vielas, kurus deformējot uz to virsmām rodas elektriskā potenciāla starpība sauc par **segnetoelektriķiem**. Šo segnetoelektriķu īpašību izmanto dielektriskajos pastiprinātājos.

Ja segnetoelektriķa plāksnīti saspiež vai izstiepj, ieliekot tās plāknēm mehānisku slodzi, tad uz plāksnītes pretējām skaldnēm parādās elektriski lādiņi ar pretējām zīmēm. Tā rezultātā segnetoelektriķa plāksnīte kļūst par elektriskā lauka avotu. Šo parādību sauc par tiešo pjezoefektu. Šīs parādības dēļ segnetoelektriķus var izmantot elektrisko impulsu devējos spiediena mērīšanai.

Ja turpretī segnetoelektriķa plāksnītei pieslēdz maiņspriegurnu, tad plāksnītes izmēri sāk mainīties ar tādu pašu frekvenci, ar kādu mainās pieslēgtais maiņspriegums. Šo parādību sauc par apgriezto pjezoefektu. No segnetoelektriķiem izgatavotus pjezoelementus lieto par augstas frekvences svārstību avotiem. Vēl nesenu vienīgais zināmais segnetoelektriķis bija Segneta sāls. Tā ir kristāliska ūdenī šķīstoša viela, kas kūst 55 °C temperatūrā, tāpēc šo vielu tehnikā nelieto.

1943. gadā sintezēja pirmo praktiski lietojamo segnetoelektriķi – bārija titanātu (BaTiO_3). Šobrīd jau radīti ļoti daudzi segnetoelektriķi: kadmija titanāts (CdTiO_3), svina cirkonāts (PbZrO_3) u. c. Šie segnetoelektriķi mitrumu neabsorbē, nešķīst ūdenī un tos var izmantot pietiekami plašā temperatūru intervālā.

Raksturīgās segnetoelektriskās īpašības visiem segnetoelektriķiem piemīt tikai līdz noteiktai temperatūrai. Bārija titanātam segnetoelektriskās īpašības saglabājas tikai līdz 120 °C temperatūrai, bet svina cirkonātam – līdz 461 °C temperatūrai. Pārsniedzot šo temperatūru, segnetoelektriķi zaudē savas raksturīgās īpašības un pārvēršas par parastiem materiāliem.

3.3.4 Neorganiskie stikli

Neorganiskais stikls ir lēts materiāls, jo to izgatavo no plaši pieejamām vielām: kvarca smiltīm, sodas, dolomīta, krīta un dažiem citiem komponentiem. Šo vielu maisījumu noteiktās attiecībās sauc par šihlu. Šihlu iekrauj stikla kausēšanas krāsnī un 1350 ... 1600 °C temperatūrā tā kūst, veidojot šķidru stikla masu, no kuras gatavo dažādus stikla izstrādājumus.

Galvenā stikla veidotāja viela ir kvarca smiltis, kas satur 98 % smiltis. Praktiski stiklu var iegūt tikai no kvarca smiltīm, bet tās iespējams sakausēt tikai ļoti augstā (ap 2000 °C) temperatūrā. Kvarca stikliem piemīt virkne vērtīgu īpašību: ļoti labi elektriskie raksturlielumi, mitrumizturība, kā arī ļoti mazs lineārās izplešanās temperatūras koeficients.

Kvarca stikla galvenie raksturlielumi: blīvums 2200 kg/m^3 ; $\rho_v = 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$; $\epsilon_r = 3,8$; $\text{tg}\delta = 0,0001$; $E_c = 35 \dots 44 \text{ MV/m}$.

Lai iegūtu citu veidu stiklus, sastāda šihlu, kuras sastāvā bez kvarca smiltīm ir vielas, kas pazemina šihlas kušanas temperatūru un ietekmē stikla īpašības. Tās ir soda, krīts, dolomīts un citas vielas.

Šihtas sastāvam pievieno arī vielas, kas aizkavē stikla kristalizāciju, - alumīnija oksīdu Al_2O_3 , borskābes anhidrīdu B_2O_3 u. c. Šihtu karsējot, no tās vispirms iztvaiko mitrums. Gāzes aizplūst atmosfērā, bet atlikušie nātrija, kālija, kalcija un citu elementu oksīdi ķīmiski reaģē ar silīcija dioksīdu (SiO_2), veidojot saliktus savienojumus, ko sauc par silikātiem. No tā arī cēlies neorganisko stiklu otrs nosaukums – silikātkitli.

1350 ... 1600 °C temperatūrā silikāti kūst, veidojot viskozu stikla masu, no kuras gatavo dažādus stikla izstrādājumus. Masu izpūšot metāla veidnēs, iegūst elektrisko spuldžu balonus (kolbas), bet presējot – stikla izolatorus un citus izstrādājumus.

Pēc ķīmiskā sastāva visus silikātkitlus var iedalīt četrās grupās: sārmu stikli, sārmu un smago metālu oksīdus saturoši stikli; sārmu mazsaturoši stikli; bezsārmu stikli.

Sārmu stikli ir samērā viegli kūstoši (1350 °C), un tie satur daudz sārmu metālu oksīdu (galvenokārt Na_2O un daļēji K_2O). Pie šīs stiklu grupas pieder logu stikls, trauku stikls un pudeļu stikls.

Sārmu un smago metālu oksīdus saturošajiem stikliem salīdzinājumā ar sārmu stikliem ir labākas elektrisko raksturlielumu vērtības. Pie šīs grupas pieder flintstikli (satur PbO) un kronstikli (satur BaO). Tos lieto arī elektroizolācijas izstrādājumu (kondensatoru, izolatoru u. c.) izgatavošanai.

Kontroljautājumi

1. Kādas ir būtiskas atšķirības starp neorganiskajām un organiskajām vielām?
2. Kādas ir azbesta pozitīvās un negatīvās īpašības, kas jāievērtē izmantojot to elektrotehnikā?
3. Kādas ir galvenās elektrotehnikā izmantojamo vizlu grupas?
4. Kas ir mikanīts? Nosauciet tā pielietošanas jomas.
5. Kādas ir galvenās elektrotehnikā elektrokeramisko materiālu izmantošanas jomas?
6. Nosauciet neorganisko stiklu kā elektrotehnisko materiālu pozitīvās un negatīvās īpašības?
7. Kādas ir būtiskās atšķirības starp parasto silikātkitli un kvarca stiklu?
8. Kas ir segnetoelektriķi un kāda ir pjezoelektriskā efekta būtība?

3.3.5. Cietie polimerizācijas dielektriķi

Mūsdienu elektrotehnika plaši izmanto sintētiskos lielmolekulāros dielektriķus. Šos materiālus var iegūt polimerizācijas vai polikondensācijas reakcijās, un tāpēc tos atbilstoši iegūšanas veidam sauc par polimerizācijas vai polikondensācijas materiāliem. Polimēra molekula monomera molekulas savstarpēji cieši saistītas ar ķīmiskām saitēm. Lielās polimēru molekulas var veidoties, monomēru molekulām saistoties vienā virknē. Šādas molekulas sauc par lineārām molekulām.

Polimērus, kuru molekulām ir stabila lineāra forma, sauc par termoplastiskiem polimēriem. Sildot tie kļūst mīksti, plastiski vai šķidri.

Ir polimēri, kuru molekulas telpā izveidotas trīs virzienos, daudziem lineāriem posmiem saistoties ar šķērssaitēm. Šādas molekulas sauc par telpiskām molekulām. Polimēri ar telpiskām molekulām ir samērā cieti un trausli un sildot mīksti nekļūst. Tāpēc tos sauc par termostabiliem polimēriem. Polimerizācija ir monomera molekulu savienošanās lielās lielmolekulāra savienojuma molekulās, nemainoties vielas elementārsastāvam.

3.3.5.1. Polistirols

Polistirolu iegūst polimerizējot caurspīdīgu, bezkrāsainu šķidrums - stirolu, kas virst 145 °C temperatūrā. Ja stirolam pievieno 0,1 ... 0,5% (masas %) benzoilperoksīda, tad, maisījumu uzsildot līdz 110 °C, sākas polimerizācija. Dubultsaite stirola molekulā $H_2C=CH-C_6H_5$ pārtrūkst, un brīvās saites saistās ar citām tādām pašām saitēm citās molekulās. Tā rezultātā stirola molekulas savienojas cita ar citu, veidojot lielu polimēra polistirola molekulu.

Sākuma stadijā polistirols ir biezs, caurspīdīgs šķidrums, ko izlej iepriekš sakarsētās stikla veidnēs, kur polimerizācijas process noris līdz galam. Veidnēs iegūst cieta, caurspīdīga materiāla plāksnes un stieņus. Polistirolu var iegūt arī granulu (cilindriskas formas daļiņas, kuru diametrs 3 ... 5 mm, bet garums 8 ... 10 mm) vai pulvera veidā (emulsijas polistirols).

Polistirola galvenie raksturlielumi: blīvums 1050 kg/m^3 ; $\sigma_{st} = 30 \dots 50 \text{ MPa}$; $a=12\dots 18 \text{ kJ/m}^2$; siltumizturība (pēc Martensa) 75 ... 80 °C; ūdensabsorbējamība 0,03 % (masas %); aukstumizturība -60 °C; $\rho_v=10^{13} \dots 10^{14} \Omega \cdot m$; $\epsilon_r = 2,4$; $\text{tg} \delta = (2 \dots 4) 10^{-4}$; $E_c = 25 \dots 30 \text{ MV/m}$.

Polistirols ir termoplastisks materiāls, kura mīkstapšanas temperatūra ir 110 ... 120 °C; tas šķīst benzolā, toluolā, ksilolā, tetrahlorogleklī un dažos citos nepolāros šķīdinātājos. No polistirola izgatavo spoļu karkasus, izolācijas paneļus, elektromēraparātu pamatnes un izolatorus.

Polistirols sastāv no lineāras struktūras molekulām, bet materiālā tās izvietotas haotiski. Izvelkot līdz mīkstapšanas temperatūrai sasildītu polistirolu

caur spraugām – filjērām (šo apstrādi sauc par ekstrūziju), molekulas orientējas materiāla vilkšanas virzienā. Šādi iegūst lokana polistirola plēvi, kuras biezums ir no 20 μm līdz 100 μm, bet platums – no 10 mm līdz 300 mm. Tai piemīt tikpat labas elektroizolācijas īpašības kā polistirolam biežā slānī, bet polistirola plēves elektriskā izturība ir ievērojami lielāka: $E_c = 80 \dots 100 \text{ MV/m}$. Polistirola plēves lieto augstfrekvences kabeļu dzīslu izolācijai, kā arī kondensatoru ražošanā.

Polistirola izstrādājumu galvenais trūkums ir to trauslums, t.i. samērā maza triecienstīgrība un tieksme plaisāt. Šie trūkumi lielā mērā novērsti triecienizturīgajos polistirolos. Triecienizturīgajiem polistiroliem ir lielāka triecienstīgrība ($a = 40 \dots 50 \text{ kJ/m}^2$) un nedaudz lielāka dielektriskā caurlaidība ($\epsilon_r = 3,0 \dots 3,6$) nekā parastajam polistirolam. Pārējie raksturlielumi triecienizturīgajam polistirolam praktiski ir tādi paši kā parasto marku polistirolam. Triecienizturīgo polistirolu ražo granulu veidā.

3.3.5.2. Polietilēns

Polietilēns ir balts vai gaiši pelēks, ciets, puscaurspīdīgs materiāls, kas aptaustot šķiet nedaudz taukains. To iegūst, polimerizējot zem spiediena gāzveida etilēnu ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Izšķir augstspiediena (AS), vidēja spiediena (VS) un zemspiediena (ZS) polietilēnu. Augstspiediena polietilēna iegūšana noris 180...200 °C temperatūrā un 150 MPa spiedienā skābekļa (0,05 %) klātbūtnē. Zemspiediena polietilēnu iegūst 1 MPa spiedienā un 60 °C temperatūrā, lietojot speciālus katalizatorus. Vidēja spiediena polietilēnu iegūst 130 ... 140 °C temperatūrā un 3 MPa spiedienā. Polietilēna polimerizācijas pakāpe $n = 3000 \dots 5000$, bet molekulmasa ir 20 000 ... 400 000 un vairāk. Zemspiediena un vidēja spiediena polietilēns atšķiras no augstspiediena polietilēna ar nedaudz lielāku blīvumu, lielāku mehānisko izturību un cietību, bet tiem ir mazāka izturība pret termisko novecošanu un sliktākas elektriskās īpašības.

Polietilēnu sastāvā ir no 55 % (AS) līdz 90 % (VS) kristāliskas vielas un tāpēc tiem ir skaidri izteikta kušanas temperatūra: 108 °C (AS); 125 °C (ZS); 130 °C (VS). Polietilēni ir termoplastiski materiāli. Pārstrādes rūpnīcās tie nonāk granulā veidā. Polietilēna izstrādājumus izgatavo, izmantojot spiedienliešanas, karstās presēšanas un ekstrūzijas metodes. Ekstrūzijas metodi lieto, uzklājot vadām polietilēna izolāciju, kā arī izgatavojot izolācijas caurules.

No augstspiediena polietilēna izgatavo arī puscaurspīdīgas elektroizolācijas plēves, kuru biezums ir no 30 μm līdz 200 μm, bet platums – no 1 m līdz 1,5 m. No cietāko šķirņu polietilēna (VS, ZS) izgatavo neelastīgus elektroizolācijas izstrādājumus: spoļu karkasus, plāksnes u. c. Istabas temperatūrā polietilēni nešķīst nevienā šķīdinātājā. Tikai 70 °C un augstākā temperatūrā polietilēns šķīst ksilolā, tetrahlorogleklī, hlorētajos ogļūdeņražos un naftas eļļās.

Polietilēnu galvenie raksturlielumi: augstspiediena polietilēnam – blīvums 920 kg/m^3 ; $\sigma_{st} = 10 \dots 15 \text{ MPa}$; no trieciena nelūst; siltumizturība (pēc Martensa) $55 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$; vidēja blīvuma polietilēnam – blīvums 940 kg/m^3 ; no trieciena nelūst; siltumizturība $85 \text{ }^\circ\text{C}$; zemspiediena polietilēnam – blīvums 960 kg/m^3 ; $\sigma_{st} = 23 \text{ MPa}$; no trieciena nelūst; siltumizturība $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Aukstumizturība visiem polietilēniem ir $-60 \text{ }^\circ\text{C}$; ūdensabsorbējamība nepārsniedz $0,004 \%$ (pēc 30 diennaktīm ūdenī). Polietilēni ir neizturīgi pret saules gaismu. Lai palielinātu polietilēnu izturību pret gaismas iedarbību, to sastāvā ievada kvēpu piedevas, kas krasi pasliktina elektriskas īpašības. Augstspiediena polietilēna galvenais trūkums ir zemā siltumizturība ($55 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$) un tieksme plaisāt palielinātās mehāniskās slodzēs. Lai šos trūkumus novērstu, polietilēnu vulkanizē vai apstaro ar elektronu plūsmu. Tādas apstrādes rezultātā iegūst apstaroto polietilēnu, ko lieto vadu un kabeļu izolācijai un kas atšķiras ar paaugstinātu siltumizturību (līdz $100 \text{ }^\circ\text{C}$) un lielāku mehānisko stiprību.

3.3.5.3. Polivinilhlorīds

Polivinilhlorīds ir balts pulveris, no kura ar karstās presēšanas vai karstās ekstrūzijas metodi izgatavo mehāniski izturīgus izstrādājumus (plāksnes, caurules u.c), uz kuriem neiedarbojas minerālējļas, daudzi šķīdinātāji, sārmu un skābes. Pulverveida polivinilhlorīdu iegūst, polimerizējot gāzveida vielu vinilhlorīdu $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}-\text{Cl}$ ūdeņraža peroksīda vai citu vielu klātbūtnē. Reakcija ar sašķidrinātu vinilhlorīdu notiek sārmainu vielu ūdens šķīdumā (polimerizācija ūdens emulsijā). Polivinilhlorīds ir termoplastisks materiāls. Viniplasta izstrādājumiem ir liela mehāniskā izturība, sevišķi pret triecienslodzēm, kā arī labas elektroizolācijas īpašības.

Viniplasta galvenie raksturlielumi: blīvums 1350 kg/m^3 ; $\sigma_{st} = 40 \dots 50 \text{ MPa}$; $a = 100 \dots 120 \text{ kJ/m}^2$; siltumizturība (pēc Martensa) $60 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$; aukstumizturība – ($15 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}$); ūdensabsorbējamība $0,4 \dots 0,6\%$ (masas %); $\rho_v = 10^{10} \dots 10^{12} \Omega\cdot\text{m}$; $\epsilon_r = 3 \dots 4$; $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,02$; $E_c = 20 \dots 22 \text{ MV/m}$.

Viniplastu viegli veidot metāla veidnēs $150 \dots 160 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā. Viniplasta izstrādājumus var apstrādāt, izmantojot jebkuru mehāniskās apstrādes paņēmieni (slīpēšanu, frēzēšanu u. c.), kā arī viegli sametināt vai salīmēt. No polivinilhlorīda izgatavo akumulatoru tvertnes un dažādas elektroizolācijas detaļas (plāksnes u. c), kas izturīgas pret triecienslodzēm. Viniplasta trūkumi ir tā zemā aukstumizturība un relatīvi mazā siltumizturība.

Polivinilhlorīda plastikāts ir lokans ruļļu materiāls, ko iegūst no polivinilhlorīda pulvera, kas sajaukts ar plastifikatoriem – bieziem, eļļai līdzīgiem šķīdriem (dibutylfālātu u. c). Plastifikatora piedeva var būt $30 \dots 45 \%$ no kopējās masas. Lokšņu plastikātu izgatavo $600 \times 100 \text{ mm}$ lielās, $1 \dots 5 \text{ mm}$ biezās loksnes. Plastikāta galvenie raksturlielumi: blīvums $1300 \dots 1400 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_{st} = 18 \dots 25 \text{ MPa}$; aukstumizturība – ($40 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$); ūdensabsorbējamība $0,2 \dots 0,5 \%$ (masas %);

sadalīšanās temperatūra 200 ... 250 °C; $\rho_v=10^8 \dots 10^{12} \Omega \cdot m$; $\epsilon_r = 4 \dots 6$; $\text{tg}\delta = 0,05 \dots 0,08$; $E_c = 15 \dots 25 \text{ MV/m}$. No polivinilhlorīda plastikāta izgatavo lokanas izolācijas caurules un lipīgo izolācijas lenti. Polivinilhlorīda materiālu raksturīga īpašība ir tā, ka tie deg tikai atklātā liesmā.

3.3.5.4. Poliformaldehīds

Poliformaldehīds ir ciets termoplastisks materiāls, kas veidojas gāzveida formaldehīda polimerizācijas rezultātā. Poliformaldehīdam raksturīga paaugstināta cietība, liela nodilumizturība un mazs berzes koeficients. Šo īpašību dēļ no poliformaldehīda var izgatavot beztrokšņu zobparvadus un gliemežpārvadus, ka arī gultņus. No tā izgatavo izolācijas plāksnes (plāksnes), sarežģīta profila spoļu karkasus u.c. Poliformaldehīda galvenie raksturlielumi: blīvums 1400 kg/m³; $a = 80 \dots 90 \text{ kJ/m}^2$; siltumizturība (pēc Martensa) 100 °C; aukstumizturība -50 °C; ūdensabsorbējamība 2 %; $E_c = 25 \text{ MV/m}$.

3.3.5.5. Organiskais stikls

Organiskais stikls (polimetilmetakrilāts) ir termoplastisks caurspīdīgs materiāls, ko viegli nokrāsot dažādas krāsas. Ražo pulverveida organisko stiklu vai organiskā stikla loksnes ar biezumu no 0,8 mm līdz 24 mm un vairāk un laukumu no 400x500 mm līdz 1400X1600 mm. Organiskais stikls ir amorfas struktūras materiāls. Tam raksturīga ļoti augsta optiskā caurspīdība (organiskais stikls laiž cauri līdz 92 % starojuma spektra redzamajā daļā).

Plastifikatori samazina organiska stikla trauslumu. Organiskā stikla galvenie raksturlielumi: blīvums 1180 kg/m³; $\sigma_{st} = 60 \dots 70 \text{ MPa}$; $a = 12 \dots 18 \text{ kJ/m}^2$; siltumizturība (pēc Martensa) 60 ... 80 °C; aukstumizturība – (50 ... 60) °C; $\rho_v=10^{10} \dots 10^{11} \Omega \cdot m$; $\epsilon_r = 3,6$; $\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-2}$; $E_c = 15 \dots 18 \text{ MV/m}$.

Organiskais stikls ir izturīgs pret atšķaidītām skābēm un sārmjiem, kā arī pret benzīnu un minerāļļiem. Tas šķīst aromātiskajos ogļūdeņražos (benzolā, toluolā, ksilolā), hlorētajos ogļūdeņražos (dihloretānā, hlorbenzolā u. c), acetona un dažos citos šķīdinātajos. Ja organiskais stikls sakarsēts līdz 115 ... 135 °C, tas kļūst viegli veidojams.

Organiskais stikls pakļaujas visiem mehāniskās apstrādes veidiem: urbšanai, frēzēšanai u.c. Lai pasargātu organisko stiklu no ieskrabājumiem mehāniskās apstrādes laikā, to iepriekš aplīmē ar papīru. Organiska stikla detaļas var viegli salīmēt ar dihloretāna līmi. Organisko stiklu un tā izstrādājumus var sametināt 140 ... 150 °C temperatūrā īpašās iekārtās, kur uz metināmajām virsmām iedarbojas paaugstināts spiediens.

3.3.5.6. Fluoroplasts

Fluoroplastu-4 iegūst, polimerizējot sašķidrinātu gāzi – tetrafluoretilēnu. Iegūtais polimērs ir irdens pulveris, no kura, presējot īrauda spiedveidnēs, iegūst dažādus izstrādājumus. Istabas temperatūrā presētās detaļas saķepina krāsnī. Strauji atdzesējot līdz 370 °C temperatūrai sakarsētas sagataves vai detaļas, iegūst materiālu ar amorfu struktūru, bet, atdzesējot lēni, materiāls iegūst mikrokristālisku struktūru. Fluoroplasta-4 galvenā īpatnība ir tā sevišķi augstā termoizturība (250 °C) un aukstumizturība (-269 °C). Fluoroplasta-4 lielās termoizturības iemesls ir molekulā eksistējošo ķīmisko saišu fluors—ogleklis lielā enerģija (448 kJ/mol). Sakarsējot fluoroplastu-4 līdz 327 °C temperatūrai, tā kristāliskā struktūra pāriet amorfā struktūrā un materiāls kļūst caurspīdīgs. Paaugstinot temperatūru līdz 415 °C, materiāls mīksts nekļūst, bet sākas tā termiska sadalīšanas, kuras rezultātā izdalās brīvs fluors, kas ir ļoti indīgs. Fluoroplastam-4 ir liela ķīmiskā izturība. Tas nešķīst nevienā šķīdinātājā ne istabas temperatūrā, ne arī sildot. Uz fluoroplastu-4 neiedarbojas neviena koncentrēta skābe, ne sārms. Fluoroplasts-4 ūdeni neadsorbē un ūdens to neslapina. Fluoroplasta-4 galvenie raksturlielumi: blīvums 2100 kg/m³; a = 100 ... 130 kJ/m²; ρ_v, = 10¹⁵ ... 10¹⁷ Ω·m; ε_r = 2,0; tgδ = (2 ... 4)10⁻⁴; E_c = 30 MV/m (plēvēm E_c = 100 ... 180 V/m).

Fluoroplasts-4 ir nepolārs dielektriķis, un tāpēc tā elektriskie raksturlielumi ir stabili plašā frekvenču diapazonā. Fluoroplastus izmanto arī kā gultņu materiālus darbam ūdenī, jo tiem ir zema berze un laba slidamība.

3.3.6. Cietie polikondensācijas dielektriķi

Polikondensācija ir monomēru (parasti divu dažādu) savienošanās process lielmolekulāras vielas molekulās. Polikondensācijas reakcijas vienmēr noris pakāpeniski: savienojas divas monomēru molekulas, tām pievienojas trešā utt.

Polikondensācijas reakciju rezultātā iegūto dielektriķu elektroizolācijas īpašības salīdzinājumā ar polimerizācijas rezultātā iegūto dielektriķu elektroizolācijas īpašībām ir nedaudz sliktākas. Galvenie cēloņi tam ir reakcijas blakusproduktu – ūdens un skābju rašanās polikondensācijas procesā, jo šie blakusprodukti, disociējot jonos, palielina materiāla elektrovadītspēju un arī dielektriskos zudumus. No polikondensācijas dielektriķiem elektronikā visplašāk lieto rezolsveķus, novolaksveķus, poliestersveķus un epoksīdsveķus.

3.3.6.1. Rezolsveķi un novolaksveķi

Rezolsveķi ir termoreaktīvas vielas, kas apstrādes procesa pēdējā stadijā kļūst termostabilas. Rezolsveķu pāreja termostabilā stāvoklī notiek trīs stadijās. Tikko kā pagatavoti sveķi atrodas sākotnējā stadijā A (rezols). Šie sveķi sildot kļūst mīksti un šķīst šķīdinātajos. Sildīšanu turpinot, rezolsveķi pāriet B stadijā, kad, sveķus sildot (95 °C), tie vēl kļūst mīksti, bet šķīdinātajos vairs nešķīst. Sildīšanu turpinot vēl tālāk,

sveķi pāriet savā galīgajā – C stadijā. Sājā stadijā rezolsveķi sastāv no lielām telpiskām molekulām; sildot tie vairs nekūst un tos nevar izšķīdināt. So rezolsveķu īpašību izmanto termoreaktīvo materiālu (fenoplastu, getinaksa, tekstolīta u.c.) ražošanā. Rezolsveķi veidojas polikondensācijas reakcijā starp kristālisko fenolu C_6H_5-OH un formalīnu (40 % gāzveida formaldehīda CH_2O šķīdumu ūdenī) sārmaino katalizatoru bārija hidroksīda $Ba(OH)_2$ vai amonija hidroksīda NH_4OH (25% amonjaka šķīdums ūdenī) klātbūtnē.

Rezolsveķi ir polāri dielektriķi, tāpēc to dielektriskā caurlaidība $\epsilon = 5 \dots 6$. Polimerizācijai sasniedzot gala stadiju C, rezolsveķi kļūst izturīgi pret minerālējām un ūdeni, bet to dzirksteļizturība nav liela. Dzirksteļizlādes ietekmē rezolsveķu virsma kļūst bagātāka ar oglekli un veidojas ar oglekli piesātināti, strāvu vadoši celiņi. Tāpēc plastmasu izstrādājumus, kas izgatavoti uz rezolsveķu bāzes, nav ieteicams lietot tur, kur iespējama elektrisko dzirksteļu rašanās.

Novolaksveķus, tāpat kā rezolsveķus, iegūst polikondensācijas reakcijā starp fenolu un formaldehīdu, tikai reakcijai pārākumā ņem fenolu. Reakcijā lieto skābu katalizatoru – sālskābi. Iegūtie novolaksveķi ir bieza, gaiši brūna masa, ko sakarsētu izlej kausos. Atzdesēti novolaksveķi ir cieta, trausla viela, kas šķīst etilspirtā un acetona. Novolaksveķu elektroizolācijas īpašības ir sliktākas nekā rezolsveķu īpašības.

Novolaksveķi ir termoplastiskas vielas. To kūstamība un šķīdība saglabājas, sveķus ilgstoši uzglabājot vai pat uzkaršējot līdz 200 °C temperatūrai. Novolaksveķi kļūst termostabili, ja tos karsē kopā ar formaldehīdu vai urotropīnu. No iegūtā maisījuma sakarsētās tērauda spiedveidnēs presē zemsprieguma aparātu plastmasas detaļas (slēdžu pamatnes un vāciņus, spuldžu ietveres), kā arī konstruktīvas detaļas (vadības pogas, rokturus u. c.).

3.3.6.2. Gļiftālsveķi

Gļiftālsveķi pieder pie poliestersveķu grupas, kurus iegūst daudzvērtīgo spirtu (glikolu, glicerīna u. c.) un divvērtīgo organisko skābju (ftalskābes, maleīnskābes u. c.) polikondensācijas reakcijā. Gļiftālsveķus iegūst glicerīna un ftalskābes anhidrīda polikondensācijas reakcijā, kas norisinās ftalskābes anhidrīda pārākumā. Lai iegūtie gļiftālsveķi būtu pietiekami lokani, tos modificē, polikondensācijas procesā pievienojot tiem taukskābes un augu eļļas, piemēram, rīcineļļu. Gļiftālsveķu īpatnība ir to augstā adhēzijas (līmēšanas) spēja; turklāt tiem ir labi elektriskie raksturlielumi, laba izturība pret izlādes procesiem un paaugstināta termoizturība – līdz 130 °C temperatūrai (B klase). Elektrotehnikā gļiftālsveķus izmanto par bāzi līmējošām, piesūcināšanas un pārklājumu lakām, kuru plēvītes (pēc saķepšanas) ir izturīgas pret karstu minerālējļu.

3.3.6.3. Lavsāns

Lavsāns ir caurspīdīgs lielmolekulārs materiāls ar kristālisku vai amorfu struktūru. Tāpat kā gliptālsveķi, tas pieder pie poliesteriem. Lavsānu iegūst tereftalskābes un etilēnglikola polikondensācijas reakcijas rezultātā. No tā izgatavotās caurspīdīgās lavsāna plēves, kuru biezums ir 30 ... 100 μm, plaši lieto elektrisko mašīnu rievu izolācijai. Lavsāna (plēves) galvenie raksturlielumi: blīvums 1400 kg/m³; siltumizturība 70 ... 75 °C; aukstumizturība -60 °C; ūdensabsorbējamība 1,5 % (masas %); σ_{st} = 180... 200 MPa; ρ_v = 10¹² ... 10¹³ Ω·m; ϵ_r = 3,5; $tg\delta$ = (2 ... 6) 10⁻³; E_c = 130 ... 150 MV/m.

3.3.6.4. Kaprons

Kaprons ir balts vai gaiši dzeltens ciets materiāls. To iegūst, polikondensējot kaprolaktāmu – pulverveida vielu, kuras kušanas temperatūra ir 70 °C. Iegūto polimēru – kapronu izspiež šauras lentes veidā pa spraugu autoklāva dibenā. Izspiestā kaprona lente nokļūst vannā ar caurtekošu ūdeni. Šajā vannā no kaprona izmazgā mazmolekulārās vielas, kas pasliktina kaprona īpašības. Ūdenī izmazgāto un atdesēto kaprona lenti griešanas mašīnā sagriež 10 mm garos un 2 ... 3 mm biezos gabaliņos (drupatās). Iegūtās drupatas papildus mazgā ar siltu ūdeni, bet pēc tam žāvē. Tāpat kā polietilēns, arī kaprons sastāv no kristāliskās fāzes un stiklveida fāzes. Tāpēc arī kapronam novērojama izteikta kušanas temperatūra (215 °C). Kaprons ir ļoti izturīgs pret pelējumsēņu iedarbību, bet tā atmosfērizturība nav liela.

Kaprona galvenie raksturlielumi: blīvums 1140 kg/m³; σ_{st} = 50 ... 70 MPa; a = 100 ... 150 kJ/m²; siltumizturība (pēc Martensa) 50 ... 60 °C; ūdensabsorbējamība 3,0 % (masas %); p_y = 10¹¹ ... 10¹² Ω·m; ϵ_r = 4,0; $tg\delta$ = 0,04; E_o = 18 ... 20 MV/m. Kaprona šķiedru, ko iegūst, izvelkot caur filjērām lieto kaprona šķiedru ieguvei. Kapronu arī lieto vieglu elektromontāžas un konstruktīvo detaļu ražošanā.

3.3.6.5. Epoksīdsveķi

Epoksīdsveķi ir sīrupveida šķidrās vai cietas vielas dzeltenā vai gaiši brūnā krāsā. Šķīdrie epoksīdsveķi ir mazmolekulāras vielas, bet epoksīdsveķi, kuru molekulas ir liela (lielāka par 1000), ir cietas vielas. Epoksīdsveķus iegūst glicerīna epihlorhidrīna (hlorēta glicerīna) un rezorcīna vai difenilolpropāna polikondensācijas reakcijā. Epoksīdsveķus plaši lieto elektrotehnikā par komponentu elektroizolācijas aizliešanas kompaundiem, kā arī līmējošām lakām un līmēm. Epoksīdsveķu kompaundu priekšrocība ir ļoti mazs tilpuma rukums (0,6 ... 1,0 %) sacietēšanas procesā. Sacietējušiem epoksīdsveķiem bez tam piemīt liela mehāniskā izturība un mitrumizturība. Epoksīdsveķu galvenie raksturlielumi: blīvums 1200 kg/m³; σ_{st} = 30 ... 60 MPa; a = 8 ... 18 kJ/m²; ūdensabsorbējamība 0,05 %; siltumizturība (pēc Martensa) 100 ... 110 °C; ϵ_r = 3,8; E_c = 20 ... 25 MV/m.

3.3.6.6. Silīcijorganiskie dielektriķi

Silīcijorganiskie dielektriķi termiski ir daudz izturīgāki par iepriekš aplūkotojiem organiskajiem dielektriķiem. Ja dielektriķus ekspluatācijas procesā sakarsē līdz tādai temperatūrai, kurā siltuma enerģija pārsniedz ķīmiskās saites enerģiju, noris to termiskā destrukcija (noārdīšanās). Šo molekulu skeletu veido tā saucamās siloksāna atomu ķēdes —Si—O—Si, kuru Si—O saites enerģija ir 375 kJ/mol.

Silīcijorganiskos elektroizolācijas materiālus (plastmasas, gumijas, lakas u. c.) var ilgstoši ekspluatēt temperatūru intervālā no -60 °C līdz +180 °C, bet dažus no tiem pat temperatūrā līdz 220 °C. Bez tam silīcijorganiskos dielektriķus raksturo liela izturība pret ūdeni, minerāleļļām, kā arī elektriskās izlādes procesiem. To elektriskie raksturlielumi ir šādi: $\rho^{\wedge}=10^{14} \dots 10^{15} \Omega\cdot\text{m}$; $\epsilon_r = 2,6 \dots 1,5$; $\text{tg } \delta = 0,0003 \dots 0,005$; $E_c = 30 \dots 55 \text{ MV/m}$ (lakas plēvēm $E_c = 80 \dots 120 \text{ MV/m}$).

3.3.6.7. Poliimīdi

Poliimīdi ir termoizturīgi organiskie dielektriķi, ko iegūst piromelītskābes anhidrīda un dažu aromātisko diamīnu polikondensācijas reakcijas rezultātā. Poliimīdi ir ilgstoši ekspluatējami 200 ... 220 °C temperatūrā. Poliimīdu elektroizolācijas izstrādājumus var lietot -155 °C un vēl zemākā temperatūrā, bet poliimīdu elektroizolācijas plēves var ilgstoši izturēt zemas temperatūras (-190 °C) nenārdoties. Poliimīdi ir ķīmiski izturīgi dielektriķi. Tie nešķīst vairumā organisko šķīdinātāju, uz tiem neiedarbojas atšķaidītas skābes, minerāleļļas un ūdens. Poliimīdu noārdīšanas izraisa koncentrētas skābes, sārmu un pārkarsēts ūdens tvaiks. No poliimīdiem gatavo lokanas puscaurspīdīgas elektroizolācijas plēves gaiši dzeltenā vai brūnā krāsā. Poliimīdu plēvju biezums ir 100 μm un vairāk. Plēvju galvenie raksturlielumi: $E_c = 100 \dots 150 \text{ MV/m}$. Poliimīdu plēves lieto arī par rievu izolāciju elektriskajās mašīnās, kas izgatavotas termoizturīgā izpildījumā. Poliimīdu plastmasām raksturīga liela termoizturība (220 ... 250 °C), labi elektriskie raksturlielumi un lielas mehānisko raksturlielumu skaitliskās vērtības. Tā poliimīdiem bez pildvielām triecienstīgība $a = 35 \dots 50 \text{ kJ/m}^2$, bet poliimīdiem ar stikla šķiedras pildījumu $a = 110 \dots 130 \text{ kJ/m}^2$. Poliimīdu plastmasu izstrādājumu ūdensabsorbejamība pēc 24 stundu vārīšanas ūdenī nepārsniedz 0,8 %. Visām plastmasām, kas veidotas uz poliimīdu bāzes, piemīt ļoti liela izturība pret radiāciju.

3.3.7. Lakas, emaljas un kompaundi

Lakas ir plēvi veidotāju vielu koloīdi šķīdumi īpaši izraudzītos organiskos šķīdinātājos. Pie plēvi veidotājām vielām pieder sveķi (dabiskie un sintētiskie), žūstošās augu eļļas, celulozes ēteri un esteri u. c. Par plēvi veidotāju vielu šķīdinātājiem lieto viegli iztvaikojošus (gaistošus) šķīdumus: benzolu, toluolu,

ksilolu, spirtus, acetonu, terpentīnu u. c. Sabiezējušu laku atšķaidīšanai tām pievieno atšķaidītājus, kas atšķiras no šķīdinātājiem ar to, ka tie ir mazāk gaistoši. Par atšķaidītājiem lieto benzīnu, laku petroleju, terpentīnu un dažus citus šķidrums. Lakas sastāvā vēl var būt plastifikatori un sikatīvi.

Plastifikatori ir vielas, kas lakas plēvīti padara elastīgu; pie tiem pieder rīcineļļa, lineļļa taukskābes u.c. Sikatīvi ir šķidrās vai cietas vielas, ko pievieno dažām lakām, lai paātrinātu to žūšanu. Žāvējot lakas slāni, kas uzklāts kādai virsmai, no tā iztvaiko organiskie šķīdinātāji, bet plēvi veidotājās vielas izveido cietu lakas plēvi. Sī plēve atkarībā no plēvi veidotājās vielas (lakas bāzes) īpašībām var būt lokana (elastīga) vai cieta un trausla. Pēc izmantošanas veida elektroizolācijas lakas iedala piesūcināšanas lakās, pārklājumu lakās un līmējošās lakās.

Piesūcināšanas lakas izmanto elektromašīnu un elektroaparātu tinumu piesūcināšanai, lai sacementētu (sasaistītu) tinuma atsevišķos vijumus citu ar citu, kā arī lai novērstu tinuma izolācijas porainību. Iespiežoties tinuma izolācijas porās, piesūcināšanas laka izspiež no turienes gaisu un pēc sacietēšanas padara tinumu izturīgu pret ūdeni. Vienlaikus palielinās tinuma izolācijas elektriskā izturība un tās siltumvadītspējas koeficients. Viens no galvenajiem piesūcināšanas laku raksturlielumiem ir piesūcināšanas spēja. Jo mazāka lakas viskozitāte, jo lielāka tās piesūcināšanas spēja.

Pārklājumu lakas lieto, lai izveidotu mitrumizturīgus un eļļas izturīgus pārklājumus uz jau piesūcinātu tinumu virsmām. Pie pārklājumu lakām pieder arī emaljas, kuras lieto tinumu vadu izolācijai (emaljēšanai), kā arī lakas, kuras lieto elektrotehniskā tērauda lokšņu un citu detaļu izolācijai.

Līmējošās lakas lieto dažādu elektroizolācijas materiālu – vizlas plāksnīšu (slāņainās vizlas izolācijas ražošanas procesā), keramikas, plastmasu un citu materiālu salīmēšanai. Galvenās prasības, ko izvirza līmējošām lakām, ir laba pielipšana (adhēzija) un izturīga savienojuma veidošanās. Pēc žāvēšanas paņēmienu lakas iedala divās grupās: aukstžūstošās lakas un karstžūstošās lakas.

Aukstžūstošām lakām plēves izveidošanās (sacietēšana) notiek istabas temperatūrā. Pie šīm lakām pieder šellaka, celulozes ēteru un esteru lakas un dažas citas.

Karstžūstošo laku plēves sacietēšana iespējama tikai temperatūrā, kas ievērojami augstāka par istabas temperatūru (100 °C un vairāk). Karstžūstošās lakās lieto termoreaktīvas plēvi veidojošas vielas (gliftālsveķus, rezolsveķus un citus sveķus); tās sacietē saķepšanas procesos, kuru norisei nepieciešama paaugstināta temperatūra.

Elektroizolācijas emaljas ir lakas, kurām pievienotas sīki sasmalcinātas krāsvielas – pigmenti; pie tām pieder arī visas pārklājumu lakas, kas paredzētas vadu izolācijai. Emalju žūšanas procesā pigmenti ķīmiski reaģē ar lakas bāzi, veidojot paaugstinātas cietības blīvu pārklājumu. Daudzu elektroizolācijas emalju pamatā ir eļļas gliftāllakas, kurām raksturīgas ļoti labas līmēšanas spējas un palielināta termoizturība. Elektroizolācijas emaljas uz silīcijorganisko laku bāzes raksturojas ar sevišķi augstu termoizturību (līdz 180 ... 200 °C temperatūrai).

Kompaundi ir elektroizolācijas sastāvi, kurus izgatavo no vairākām izejvielām: sveķiem, bitumeniem u. c. Atšķirtībā no lakām un emaljām kompaundu sastāvā nav gaistošu šķīdinātāju, kas novērš poru veidošanos pēc sacietēšanas. Pēc lietošanas veida kompaundus iedala piesūcināšanas kompaundos, aizliešanas kompaundos un pārklājumu kompaundos. Lai palielinātu epoksīdsveķu kompaundu siltumvadītspējas koeficientu un uzlabotu to mehāniskos raksturlielumus, šķidrājiem izejvielu sastāviem pievieno minerālu pildvielas: kvarca putekļus, samaltu talku u. c. Tīru silīcijorganisko kompaundu sacietēšana noris pakāpeniski – sākumā 150 °C, bet pēc tam 200 °C temperatūrā (tilpuma rukums 5 ... 6 %). To viskozitāte ir maza un piesūcināšanas spēja liela. Ar šiem kompaundiem piesūcina to elektrisko mašīnu tinumus, kuras izgatavotas termoizturīgā vai mitrumizturīgā izpildījumā. Sacietējušos kompaundus var ekspluatēt -60 ... +200 °C temperatūrā. Tiem ir labi elektriskie raksturlielumi: $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \Omega\cdot m$; $\epsilon_r = 3,0 \dots 3,5$; $\text{tg}\delta = 0,003$; $E_c = 50 \dots 60 \text{ MV/m}$.

3.3.8. Papīri un kartoni

No skujkoku (priežu, egļu) koksnes, to ķīmiski pārstrādājot, iegūst celulozi, ko lieto par izejvielu dažādu elektroizolācijas papīru un kartonu izgatavošanai. Elektroizolācijas papīru un kartonu izgatavošanai galvenokārt izmanto sulfātcelulozi, no kuras iegūst papīru ar labākam elektriskajām, mehāniskajām un termiskajām īpašībām.

Kabeļpapīrs ir augstsprieguma kabeļu galvenā izolācija. Pēc uztīšanas uz kabeļa to piesūcina ar elektroizolācijas eļļu. Uztinot papīra lenti kabeļa dzīslai, lenti mehāniski stiep. Tāpēc kabeļpapīram jābūt ar pietiekami lielu mehānisko izturību stiepē. Bez tam gatavā kabeļmontāžas procesā papīrs var tikt locīts, tāpēc tam jābūt pietiekami izturīgam pret locīšanu. Kabeļpapīru galvenokārt izgatavo no trekna maluma sulfātcelulozes, lai nodrošinātu tam labas mehāniskās īpašības. Nepiesūcināta kabeļpapīra elektriskā izturība ir 6 ... 9 MV/m, bet ar transformatoreļļu piesūcināta papīra elektriskā izturība sasniedz 70 ... 80 MV/m.

Kondensatorpapīru, kas piesūcināts ar šķidro dielektriķi, lieto papīra kondensatoros. Kondensatorpapīra izgatavošanai lieto vistīrāko trekna maluma

sulfātcelulozi. Tie ir visplānākie vienmērīga biezuma papīri, kuru biezums ir 4... 30 μm. Pēc piesūcināšanas ar naftas kondensatoreļļu kondensatorpapīru elektriskā izturība palielinās līdz 250 ... 300 MV/m.

Piesūcināmais papīrs paredzēts slāņainā elektroizolācijas plasta – getinaksa izgatavošanai. Piesūcināmo papīru izgatavo no sulfātcelulozes, un tā biezums ir 0,09; 0,11 un 0,13 mm, bet blīvums 600 ... 800 kg/m³. Tāpēc piesūcināmo papīru gaiscaurlaidība un piesūcināšanas spēja ir lielāka nekā citiem papīriem, jo tas nepieciešams, lai panāktu labu papīra piesūcināšanu getinaksa ražošanas procesā.

Uztinamo papīru lieto uztītu elektroizolācijas izstrādājumu – transformatoru un elektrisko aparātu cilindru un izolācijas cauruļu izgatavošanai. Uztinamo papīru izgatavo no nebalinātas trekna maluma celulozes, tā blīvums ir 750 kg/m³, biezums – 0,05 un 0,07 mm, elektriskā izturība – ne mazāka par 8 MV/m. Lai izgatavotu elektroizolācijas cilindrus, papīrs no vienas puses jāpārklāj ar elektroizolācijas laku.

Mikalentes papīru lieto lokanas vizlas lentes izgatavošanai, uzlīmējot uz mikalentes papīra lentes vizlas plāksnītes. Mikalentes papīram jānodrošina mikalentes lokanums, jāpalielina tās mehāniskā izturība stiepē un vienlaikus jābūt plānam, lai nepasliktinātu mikalentes elektriskos raksturlielumus. Bez tam papīram jābūt stipri porainam, lai to varētu labi un ātri piesūcināt ar lakām.

Kreppapīru lieto izvadu un tinumu savienojumu vietu izolācijai transformatoros un citos ar eļļu pildītos aparātos. Kreppapīru izgatavo no nebalinātas sulfātcelulozes. Tā biezums ir 0,17 mm (bez krokojuma) un 0,5 mm (ar krokojumu), bet blīvums – 230 kg/m³. Papīru ražo ruļļos, kuru platums 500 mm.

Elektroizolācijas kartonus izgatavo tāpat kā papīrus, tikai tie ir biežāki (0,1 ... 6,0 mm). Par izejvielu kartonu izgatavošanai lieto sulfātcelulozes masu vai celulozes maisījumu ar kokvilnas šķiedrām (kokvilnas šķiedras uzlabo kartonu elektroizolācijas un mehāniskās, īpašības). Kartonus, ko lieto ar eļļu pildītās mašīnās, transformatoros un izgatavo no sulfātcelulozes un kokvilnas šķiedru maisījuma bez papildu apstrādes valčos. Šiem kartoniem ir neredzama struktūra, tāpēc tie labi piesūcināmi ar eļļu. Gaisā izmantojamus kartonus lieto zemsprieguma elektrisko mašīnu rievu un starpvijumu izolācijai. Eļļā ekspluatējamo kartonu biezums ir 0,5 ... 3 mm, blīvums – 900 ... 1200 kg/m³, stiprība stiepē – 0,4 ... 0,6 MPa (šķērsvirzienā). Piesūcināta kartona elektriska izturība ir 38 ... 60 MV/m.

Fibru izgatavo no papīra, kam nav pievienota līmes piedeva un kura sastāva ir 50 % kokvilnas šķiedras un 50 % koksnes celulozes. Papīru laiž caur vannu, kurā atrodas līdz 50 °C temperatūrai sasildīts cinka hlorīda šķīdums, bet pēc tam uztin uz tērauda veltna līdz noteiktam biezumam. Papīru apstrādājot ar cinka hlorīda šķīdumu,

uz tā virsmas izveidojas lipīga viela. Uztinot uz veltņa, papīra loksnes kārtas savā starpā salīmējas, veidojot blīvu materiālu – fibru, ko sagriež loksnēs un presē. Fibras blīvums ir 1150 kg/m^3 . Tās stiprība stiepē σ_{st} (50 ... 70 MPa garenvirzienā un 30 ... 45 MPa šķērsvirzienā) ir ļoti augsta. Fibru lieto augstsprieguma pārsprieguma novadītājos, kuros no fibras cilindra sienām elektriska loka ietekmē intensīvi izdalās gāzes. Arvien pieaugošā gāzu spiediena rezultātā elektriskais loks cauruļveida pārsprieguma novadītājos nodziest.

3.3.9. Lakaudumi un ruļļu materiāli

Lakaudumi ir lokani ruļļu materiāli, kuri sastāv no pamatnes auduma, kas piesūcināts ar elektroizolācijas laku. Par pamatnes audumiem lieto kokvilnas, zīda, kaprona un stikla (stikla šķiedras) audumus. Laka, ar kuru piesūcina pamatnes audumu, pēc sacietēšanas izveido uz lakauduma lokanu plēvi, kas nodrošina materiālam labas elektroizolācijas īpašības. Lakaudumus plaši lieto par rievu un starpvijumu izolāciju transformatoros un zemsprieguma elektriskajās mašīnās, kā arī spoļu un atsevišķu vadiem.

Zemsprieguma iekārtās bieži lieto **lipīgo polivinilhlorīda lenti**. To ražo rītuļos, kuru diametrs ir (80 ± 10) mm. Lentas platums ir 15, 20, 25 vai 50 mm un biezums 0,2 ... 0,45 mm. Šo lenti var lietot temperatūrā, kas nepārsniedz 60 ... 65 °C, jo augstāka temperatūrā tā kļūst mīksta.

Lipīgo termoizturīgo stikla lenti izgatavo no bezsārnu stikla lentes, kas piesūcināta ar termoizturīgu silīcijorganisko laku. Lenti i ražo rītuļos, kuru diametrs ir (150 ± 25) mm. Lentas platums 20 vai 25 mm un biezums 0,12 ... 0,15 mm. To lieto elektrisko mašīnu un aparātu tinumu pieres daļu izolācijai ar darba temperatūru līdz 180 °C.

Lakotās lavsāna caurulītes ir lavsāna šķiedru caurulītes, kas piesūcinātas ar poliesteru lakām. Caurulīšu iekšējais diametrs ir 0,5 ... 10,0 mm un sieniņu biezums - 0,4 ... 0,8 mm. Lakotās lavsāna caurulītes salīdzinājumā ar linoksīna caurulītēm ir mehāniski daudz izturīgākas; to nodilumizturība ir lielāka.

Lakotas stikla **šķiedras caurulītes** izgatavo no stikla šķiedras audumiem, kas piesūcināti ar eļļas laku, epoksīdlaku vai termoizturīgu silīcijorganisko laku. Lakotas stikla šķiedras caurulīšu iekšējais diametrs ir 0,5... 10 mm un sieniņu biezums – 0,4 ... 0,6 mm. Lakotās stikla šķiedras caurulītes nav tik elastīgas kā linoksīna vai lavsāna caurulītes, bet to mitrumizturība ir lielāka, un tās var lietot elektriskajās mašīnās un aparātos, kuru darba temperatūra ir -50 ... +180 °C.

3.3.10. Plastmasas un lokšņu materiāli

Plastmasu izstrādājumus visbiežāk iegūst no prespulveriem, kas sildīšanas un spiediena ietekmē kļūst mīksti un plūstoši. Presējot vai lejot var iegūt dažādas formas plastmasu izstrādājumus (elektrisko aparātu un mērinstrumentu korpusus un pamatnes, pogas, rokturus, vāciņus utt.). Plastmasas parasti ir daudzkomponentu materiāli, kas sastāv no saistvielām, pildvielām, plastifikatoriem, stabilizatoriem, eļļotājiem, cietinātājiem, krāsvielām, poru veidotājiem un citiem komponentiem. Atsevišķu veidu plastmasas sastāv no tīriem polimēriem – saistvielām, piemēram, polivinilhlorīds, polietilēns u. c. Šos materiālus sauc par plastmasām bez pildvielām.

Saistvielas ir sintētiskie sveķi (rezolsveķi, epoksīdsveķi, silīcijorganiskie sveķi u.c.). Tie piesūcina pildvielas un citus plastmasu komponentus, piešķirot tiem plastiskumu un nodrošinot plastmasu izstrādājumu viengabalainību (monolītumu). Par saistvielām var būt termoplastiskas vai termoreaktīvas vielas. Ja saistviela ir termoplastiska viela (polivinilhlorīds u.c), tad arī plastmasas izstrādājums ir termoplastisks, t.i., sasildot to līdz noteiktai temperatūrai, tas kļūst mīksts. Termoreaktīvas saistvielas (rezolsveķi, silīcijorganiskie un citi sveķi) piešķir izstrādājumiem termoreaktīvas īpašības – izstrādājumus pēc saķepšanas sildot, tie mīksti nekļūst.

Pildvielas ir pulverveida vai šķiedrainas vielas, kas palielina izgatavojamo plastmasas izstrādājumu mehānisko izturību un samazina to tilpuma rukumu. Šķiedrainās pildvielas (stikla, azbesta, kokvilnas šķiedras) ievērojami palielina plastmasu mehānisko izturību. Neorganiskās pildvielas (kvarca un vizlas pulveri, stikla šķiedra) palielina plastmasu siltumvadītspējas koeficientu un termoizturību. Plastmasu sastāvā parasti ir 40 ... 60% pildvielu. Pildvielas parasti ir daudz lētākas par saistvielu un tātad padara arī plastmasu lētāku.

Plastifikatori ir biezi eļļām līdzīgi sintētiski šķidrums, ko pievieno plastmasām, lai samazinātu to trauslumu un palielinātu aukstumizturību.

Stabilizatori ir vielas, ko pievieno plastmasām, lai palielinātu to izturību pret gaismas iedarbību un termoizturību; tie palēnina saistvielas termisko novecošanu.

Eļļotājus (stearīnu, oleīnskābi) pievieno plastmasām, lai panāktu plastmasas izstrādājumu labāku atdalīšanos no tērauda spiedveidņu virsmas.

Cietinātāji ir vielas, ko pievieno dažām plastmasām, lai paātrinātu to sacietēšanu. Šo procesu pamatā ir saistvielas saķepšanas reakcijas.

Krāsvielas ir vielas, kas plastmasu izstrādājumiem piešķir vienmērīgu krāsu. Pievienojot krāsvielas, plastmasas iegūst dekoratīvu izskatu, kā arī lielāku noturību pret gaismas starojumu.

Lokšņu materiālos parasti izmanto reaktīvos sveķus ar pildvielu – papīru, audekla, stiklaudumu. Getinaksu izgatavo no termoreaktīviem sveķiem un papīra pildvielas, salikumu saspiežot presēs. Getinaksu var lietot temperatūrā, kas nepārsniedz 105 °C (atbilst termoizturības A klasei). Tā aukstumizturība ir -65 °C. Tekstolīts no getinaksa atšķiras ar to, ka pildviela tajā ir kokvilnas vai poliesteršķiedru audums. Tekstolīta ražošana būtībā neatšķiras no getinaksa ražošanas. A, B un F marku tekstolītu ražo uz rupja kokvilnas auduma bāzes, bet augstfrekvences tekstolītu – uz šifona bāzes. J1T markas tekstolītam, kas paredzēts darbam mitrā vidē, bāze ir poliesteršķiedras (lavsāna) audums.

Tekstolīta elektriskie raksturlielumi ir nedaudz sliktāki nekā getinaksam, bet izturība pret plaisāšanu slāņu garenvirziena tekstolītam ir lielāka nekā getinaksam. Tekstolīta triecienstīgrība sasniedz 20 ... 30 kJ/m². Tekstolīts ir mehāniski vieglāk apstrādājams nekā getinaks, bet ir arī ievērojami dārgāks par getinaksu. Tekstolītu ražo loksnēs, kuru biezums ir 0,5 ... 50 mm un 0,5 ... 8 mm. Lokšņu platums 450 ... 980 mm un garums 600 ... 1480 mm. Tekstolīta termoizturība nepārsniedz 105 °C (A klase), aukstumizturība -65 °C. Tāpat kā getinaksam, arī tekstolītam ir neliela lokizturība, jo tā saistviela rezolsveķi elektrisko dzirksteļu iedarbības rezultātā viegli apogļojas.

3.3.11. Dielektriskās gumijas

Raksturīga visu gumiju īpašība ir lielā elastība, t.i., gumiju spēja stiepjot stipri pagarināties, bet, slodzi noņemot, atgūt savu sākotnējo garumu bez paliekoša pagarinājuma. Jāatzīmē arī gumiju lielā ūdensizturība, gāzu necaurlaidība un labās elektroizolācijas īpašības. Galvenā sastāvdaļa visās gumijās ir dabiskais kaučuks vai sintētiskais kaučuks. Rezultātā iegūst ļoti elastīgu, ūdensizturīgu un gāzu necaurlaidīgu materiālu.

Vadu kailo dzīslu var pārklāt ar jēlgumiju, jo tā ir plastiska un viegli pārklājama, veidojot vada pamatizolāciju. Uz vadiem uzklātā jēlgumijas slāņa termiskās apstrādes process, jeb vulkanizācija notiek 140 ... 200 °C temperatūrā, atkarībā no jēlgumijas sastāva. Tā, piemēram, gumijas uz silīcijorganiskā kaučuka bāzes vulkanizē 180 ... 200 °C temperatūrā, bet pats vulkanizācijas process noris divos posmos. Vairumu pārējo gumiju vulkanizē 140 ... 160 °C temperatūrā.

Daļa sēra, kas neizreaģē ar kaučuka molekulām, var brīvā veidā izdalīties uz gumijas virsmas un, saskaroties ar vara dzīslas virsmu, reaģēt ar to, veidojot vara sulfīdu (CuS), kas kaitīgi iedarbojas uz gumiju. Lai no tā izvairītos, vara vadus pirms gumijas izolācijas uzklāšanas alvo. Alumīnija vadiem gumijas izolāciju var uzklāt tieši. Vulkanizācijas rezultātā iegūst elektroizolācijas jeb dielektriskās gumijas ar šādiem galvenajiem raksturlielumiem: $a_{st} = 3,5 \dots 4,5 \text{ MPa}$; $\rho_v = 10^u \dots 10^{12} \Omega\text{-m}$; $\epsilon_r =$

3,5 ... 4,5; $\text{tg}\delta = 0,008 \dots 0,01$; $E_c = 20 \dots 45 \text{ MV/m}$. Dzīslu izolācijai kabeļiem, kas paredzēti spriegumiem virs 1000 V, lieto gumijas ar paaugstinātiem elektriskajiem un mehāniskajiem raksturlielumiem. Uz dabiskā un sintētisko kaučuku bāzes izgatavotās gumijas izolācijas darba temperatūra ir no $(-50 \dots 70) \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $(65 \dots 85) \text{ }^\circ\text{C}$. Izņēmums ir gumijas uz silīcijorganiskā kaučuka bāzes, kuru darba temperatūru intervāls ir ļoti plašs: $-100 \dots +200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Citas nozīmīgas gumijas maisījumu sastāvdaļas ir pildvielas. Aktīvās pildvielas, kas palielina gumiju mehānisko izturību, ir cinka baltais un kvēpi. No neaktīvajām pildvielām visplašāk lieto krītu, talku un kaolīnu, kurus pievieno, lai pazeminātu gumiju cenu. Gumijas izejvielu maisījumiem vēl pievieno mīkstinātājus (stearīnskābi, parafīnu u. c.) un pret novecošanas līdzekļus (neozonu). Mīkstinātāji uzlabo jēlgumiju plastiskumu, kas atvieglo gumijas izolācijas uzklāšanu vadu dzīslām, kā arī pazemina vulkanizācijas temperatūru. Pret novecošanas līdzekļi palielina gumijas izolācijas izturību pret oksidēšanos, termisko novecošanos un fotonovecošanos. Siltuma, gaismas un oksidētāju (skābekļa, ozona) iedarbības rezultātā gumijas izolācija kļūst trausla un saplaisā. Gumijas izejvielu maisījumam dažreiz pievieno krāsvielas: dzelzs mīniju, cinka balto u. c. Krāsvielas pazemina gumiju elektroizolācijas īpašības.

3.3.12. Cieto dielektriķu elektrovadītspēja un elektriskā izturība

Cietajos dielektriķos galvenokārt novērojama jonu elektrokondukcija. Caurplūdes strāvu šajā gadījumā izraisa brīvo jonu orientēta pārvietošanās. Brīvie joni veidojas, disociējot (sadaloties) piemaisījumu molekulām, kas nelielā daudzumā atrodas dielektriķī. Tādi piemaisījumi var būt organiskas skābes, sārmu metālu oksīdi (Na_2O ; K_2O), mitrums un citas vielas, kuru molekulas disociē jonus. Paaugstinātā temperatūrā cieto neorganisko dielektriķu elektrokondukcijā var piedalīties arī paša dielektriķa joni. Tādā gadījumā dielektriķa īpatnējā tilpuma vadītspēja, sasniedzot kādu noteiktu temperatūru, krasi pieaug. Tā elektrotehniskajam porcelānam īpatnējās tilpuma vadītspējas krass pieaugums novērojams, sākot ar $100 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūru.

Pakļaujot cietos dielektriķus ļoti lieliem spriegumiem, tajos veidojas arī brīvie elektroni. Kopā ar brīvajiem joniem tie izraisa cietā dielektriķa tilpuma vadītspējas palielināšanos.

Cieto dielektriķu virsmas elektrovadītspēja ir atkarīga no virsmas mitruma pakāpes un piemaisījumu daudzuma uz tās. Jo virsma nefīrāka un mitrāka, jo mazāka ir cietā dielektriķa īpatnējā virsmas pretestība. Tas rada nepieciešamību pasargāt cieto dielektriķu virsmu ar hidrofobām, ūdenī nesaslapināmām aizsarglakām un emaljām.

Cieto dielektriķu caursite ir elektrisks vai termisks process. Elektriskā caursite sākas ar triecienjonizācijas parādību, ko izraisa dielektriķim pieslēgtais liels spriegums. Triecienjonizācijas process cietā dielektriķī ir līdzīgs triecienjonizācijas

procesam gāzēs, bet tā norisei nepieciešama daudz lielāka elektriskā lauka intensitāte. Biežo sadursmju rezultātā starp brīvajiem elektroniem un dielektriķa molekulām un atomiem atbrīvojas jauni elektroni. Tie veido elektronu lavīnas, kas caururbj cieto dielektriķi visā tā biežumā. Tā rezultātā dielektriķī veidojas vadošs kanāls, kas sastāv no plazmas (dielektriķis zaudē elektroizolācijas īpašības).

Kontroljautājumi

1. Kādi ir būtiska atšķirība starp polimerizācijas un polikondensācijas procesu?
2. Kādas polikondensācijas procesa iegūto polimēru stermiskās īpašības?
3. Kas nosaka polimēru termoizturību?
4. Kuriem polimēriem ir vislielākā termoizturība?
5. No kādām pildvielām sastāv plastmasas. Kāda ir atsevišķo plastmasas sastāvdaļu nozīme?
6. Kāda ir būtiska atšķirība starp lakām un emaljām?
7. Kā iedalās lakas pēc to lietošanas jomas?
8. Kādas ir kompaundu sastāvdaļas un pielietošanas jomas?
9. Kādas ir slāņaino plastu ieguves tehnoloģijas?
10. Kādas getinaksa un tekstolīta kopīgās un atšķirīgās īpašības?
11. Kas ir elektrokeramiskie materiāli, un kādās grupās tos iedala?
12. Kādi caursītes veidi var rasties cietajos dielektriķos?

4. Vadītāji materiāli

Vadītāju materiālus var klasificēt pēc to elektrovadītspējas vai arī pēc tai apgrieztā parametra, t.i. pretestības. Vislielākā vadītspēja ir tīriem metāliem, pie kam zemās temperatūrās (tuvu absolūtai nullei) metāli iegūst supravadītāja īpašības. Savukārt daudziem metālu sakausējumiem elektrovadītspēja ir pazemienāta un tos sauc par augstas pretestības materiāliem. Daudzi temperatūrās iegūst daļējas supravadītāju īpašības pie temperatūrām, kas ir nedaudz augstākas par absolūto nulli un šādus sakausējumus sauc par kriovadītājiem. Visbiežāk elektrotehnikā kāvadītāji tiek izmantoti metāli vai tosakausējumi. Pēc ķīmiskā sastāva metālus iedala tīros metālos un sakausējumos. Kā vadītāju materiālu var izmantot arī ogli.

4.1. Materiāli ar lielu vadītspēju

Praktiski visnozīmīgākie ir cietie vadītāji materiāli, pie kuriem pieder galvenokārt metāli un to sakausējumi. Cietie vadītāji materiāli sastāv no kristāliskā režģa un elektronu gāzes. Tajos praktiski brīvi ir visi atomu ārējās čaulas elektroni, tādēļ metāliem un to sakausējumiem raksturīga elektronu vadītspēja un ļoti liela lādiņnesēju koncentrācija. Šķidrie vadītāji materiāli ir izkausēti metāli, to sakausējumi un elektrolīti. Izkausētajos metālos novērojama elektronu vadītspēja. Normālos apstākļos šķidrns ir vienīgi dzīvsudrabs (kušanas temperatūra ap $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$), bet pārējie metāli un to sakausējumi kūst tikai paaugstinātā temperatūrā. No materiāliem, kam ir liela elektrovadītspēja, izgatavo vadus, kopnes, kabeļu dzīslas un citas elektrotehnisko un radiotehnisko iekārtu strāvu vadošās daļas.

4.1.1. Varš

Varš ir viens no vislabākajiem vadītājiem, jo mazāka īpatnējā pretestība ir tikai sudrabam. Tīrs varš ir mīksts, ļoti plastisks materiāls, kas labi velmējams, tādēļ no tā var izgatavot ļoti tievus vadus un plānas folijas. Ar atbilstošu mehānisko un termisko apstrādi var iegūt varu, kam ir dažāda struktūra un īpašības. Varu stiepjot vai velmējot aukstā stāvoklī, tam veidojas sīkgraudaina struktūra, tādēļ palielinās vara cietība un mehāniskā izturība, taču vienlaikus palielinās arī īpatnējā pretestība. Atkvēlinot varu, rodas rupjgraudaina struktūra, tādēļ varam ir mazāka cietība un mehāniskā izturība, bet lielāks plastiskums un elektrovadītspēja. Atkarībā no apstrādes veida izšķir cieto varu un mīksto varu. No mīkstā vara izgatavo vadus, folijas un kabeļu dzīslas, no cietā vara – izstrādājumus, kuriem nepieciešama palielināta cietība un mehāniskā izturība, piemēram, kontaktvadus, sadales iekārtu kopnes, elektrisko mašīnu kolektoru plāksnītes. Vara īpašības ļoti atkarīgas no piejaukumu daudzuma. Tādēļ par vadītāju

materiālu var lietot tikai ļoti tīru metālu. Varš ir labi metināms un lodējams. Nozīmīgākie vara sakausējumi, kurus var izmantot par lielas elektrovadītspējas materiāliem, ir bronzas un misiņi.

4.1.2. Alumīnijs

Alumīnijs pēc īpatnējās elektrovadītspējas lieluma ieņem ceturto vietu aiz sudraba, vara un zelta. Alumīnijs ir sudrabbalts, mīksts metāls, kuram raksturīgs mazs blīvums un maza mehāniskā izturība. Salīdzinot alumīnija un vara vadus, kuriem ir vienāds garums un pretestība, var konstatēt, ka alumīnija vadam ir 1,63 reizes lielāks šķērsriezums un tilpums, bet 2 reizes mazāka masa nekā vara vadam. Arī alumīnija īpašības ļoti atkarīgas no tīrības pakāpes. Īpatnējo pretestību it sevišķi palielina vara, sudraba un magnija piejaukumi, kuri stipri izkropļo alumīnija kristālisko režģi. Tādēļ par vadītāju materiālu lieto tikai ļoti tīru alumīniju.

Alumīnijam ir ļoti liela korozijas izturība, jo uz tā virsmas veidojas ļoti blīva oksīda kārtiņa, kurai raksturīga laba adhēzija ar metāla virsmu, liela īpatnējā pretestība, kā arī liela mehāniskā un termiskā izturība.

Elektroenerģijas pārvades gaisvadu līnijām ar reti izvietotiem balstiem vadus izgatavo arī no alumīnija sakausējumiem. To mehāniskās īpašības ir daudz labākas, taču īpatnējā pretestība gandrīz vienmēr daudz lielāka nekā tīram alumīnijam. Vienīgais sakausējums, kuru var izmantot par lielas elektrovadītspējas materiālu, ir aldrejs, kas satur dažas procenta desmitdaļas magnija, silīcija un dzelzs. Pēc mehāniskajām īpašībām aldrejs līdzīgs cietajam varam, bet īpatnējā pretestība un blīvums ir gandrīz tādi paši kā tīram alumīnijam.

Mazjaudas elektroenerģijas pārvades līniju vadu izgatavošanai lieto arī dzelzi mīksta tērauda veidā, kas satur 0,1 ... 0,15 % oglekļa. Dzelzs īpatnējā pretestība gan ir 6 reizes lielāka nekā varam, toties dzelzs ir ļoti lēts un nedeficīts metāls ar ļoti lielu mehānisko izturību. Korozijas izturība dzelzij ir ļoti maza, tādēļ tērauda vadus var lietot tikai piemērotā vidē un zemā temperatūrā. Lai tērauda vadus aizsargātu pret koroziju, tos pārklāj ar cinku, kas ne tikai veido mehānisku aizsargkārtiņu, bet arī nodrošina protektoraizsardzību. Par strāvas vadītājiem izmanto arī elektrificētā transporta tērauda slīdes.

Lai ekonomētu krāsainos metālus un pilnīgāk izmantotu dažādu vadītāju materiālu pozitīvas īpašības, izgatavo kombinētos bimetāla un tērauda-alumīnija vadus. Bimetāla vads sastāv no tērauda stieples, kurai cieši uzklāta vara kārtiņa tā, lai starp abiem metāliem būtu labs elektrisks kontakts. Vada šķērsgriezumā jābūt vismaz 50 % vara. Tērauda serde piešķir bimetāla vadam lielu mehānisku izturību, bet varš aizsargā tēraudu pret koroziju un nodrošina lielu elektrovadītspēju, it sevišķi skinefakta gadījumā. Jau 5 kHz frekvencē strāvu praktiski vada tikai vara kārtiņa.

Bimetāla vadus izmanto elektroenerģijas pārvades un sakaru līnijās. No bimetāla izgatavo arī sadales iekārtu kopnes, slēdžu nažus un citas elektrisko aparātu strāvu vadošās detaļas.

Vadītāju bimetālu nedrīkst sajaukt ar termisko bimetālu, kas sastāv no diviem metāliem ar dažādiem lineārās izplešanās temperatūras koeficientiem un paredzēts automātiskai temperatūras regulēšanai elektriskajās sildierīcēs.

Tērauda-alumīnija vads sastāv no tērauda stieples – serdes, kas savīta kopā ar vairākām alumīnija dzīslām. Tērauda serde nodrošina kombinētā vada mehānisko izturību, bet alumīnija dzīslas – lielu elektrovadītspēju.

4.1.3. Supravadītāji un kriovadītāji

Pazeminoties temperatūrai, metālu un to sakausējumu pretestība samazinās. Tādēļ teorētisku un praktisku interesi izraisa metālu elektrovadītspēja kriogēnās (ļoti zemās) temperatūrās, kas tikai nedaudz pārsniedz absolūto nulli. Kriogēno temperatūru iegūšanai lieto aukstuma pārnēsētājus – sašķidrinātas gāzes. Viszemāko temperatūru nodrošina hēlijs, kura viršanas temperatūra ir 4,2 K. Pieejamāki un lētāki aukstuma pārnēsētāji ir ūdeņradis un slāpekļis, kuru viršanas temperatūra ir attiecīgi 20,4 K un 77,4 K. Kriogēnā temperatūrā (nedaudz virs 0 K) daudzos metālos notiek īpatnējās pretestības lēcienveida samazināšanās līdz. Ļoti niecīgai vērtībai, kas praktiski vienāda ar nulli, metāls kļūst par ideālu vadītāju. Tādu parādību sauc par supravadītspēju, bet materiālus, kam šī īpašība piemīt, – par supravadītājiem. Temperatūru, kurā materiāls iegūst supravadītāja īpašības, sauc par supravadīšanas pārejas kritisko temperatūru *T_{kr}*.

Supravadītspējas parādību 1911. gadā atklāja holandiešu zinātnieks Kamerlings-Onnes. Pētot dzīvsudraba elektrisko pretestību zemās temperatūrās, noskaidrojās, ka 4,2 K temperatūrā dzīvsudraba pretestība strauji samazinās praktiski līdz nullei un to vairs nav iespējams izmērīt. Ja ņemtu noslēgtu metāla ķēdi (gredzenu) supravadīšanas apstākļos kritiskajā temperatūrā un ierosinātu šajā ķēdē strāvu, tad strāva ķēdē plūstu neierobežoti ilgi. Pašreiz ir zināmi 35 metāli un vairāk nekā tūkstoš sakausējumu un dažādu elementu ķīmisko savienojumu ar supravadītāju īpašībām. Tādi elektriskās strāvas vadītāji kā sudrabs, varš un zelts, kā arī feromagnētiskie materiāli dzelzs, niķelis, kobalts un to sakausējumi nav supravadītāji, ir metāli, kam ir samērā zema elektriskā pretestība zemās temperatūrās, kas tomēr ir augstākas par supravadītāju kritiskajām temperatūrām. Šo materiālu elektriskā pretestība krasi samazinās šķidra ūdeņraža (20,4 K), šķidra neona (27,3 K) un šķidra slāpekļa (77,4 K) temperatūrā. Tas izskaidrojams ar kristāliskā režģa svārstību intensitātes krasi samazināšanos, kā rezultātā samazinās elektronu izkliede, kuri ir strāvas veidotāji metālu vadītājos. Elektronu izkļiedes pakāpi šajā gadījumā nosaka vienīgi piemaisījumu daļiņas, ko satur metāliskais kriovadītājs. Par kriovadītājiem lieto

ķīmiski ļoti tīrus metālus.

4.2. Materiāli ar lielu pretestību

Par vadītājiem materiāliem ar lielu pretestību racionāli lietot cieta šķīduma tipa sakausējumus. Atbilstoši izvēloties komponentu daudzuma attiecību, var panākt, ka šo materiālu īpatnējā pretestība ir daudz lielāka nekā atsevišķu komponentu īpatnējā pretestība. Atkarībā no izmantošanas veida šiem sakausējumiem nepieciešamas dažādas mehāniskās, elektriskās, termiskās un tehnoloģiskās īpašības. Visus lielas pretestības sakausējumus iedala divās grupās – **rezistoru** materiālos un **sildierīču** materiālos.

Rezistoru materiāliem savukārt ir divas apakšgrupas – sakausējumi etalonrezistoriem un sakausējumi reostatiem.

Sakausējumiem, kuri paredzēti etalonrezistoru un mērinstrumentu pretestību izgatavošanai, līdz ar lielu īpatnējo pretestību nepieciešamas arī vairākas citas īpašības: minimāli mazs īpatnējās pretestības temperatūras koeficients (lai temperatūrai mainoties pretestība ir stabila); mazs īpatnējais termo-EDS dotajam materiālam kontaktējoties ar varu (lai mērījumu ķēdēs nerastos parazītiski pirmspriegumi); liels plastiskums (lai varētu izgatavot tievas stieples un plānas lentas). Materiāla īpašībām jābūt stabilām, lai tās ar laiku nemainītos. Šīm prasībām vislabāk atbilst vara un mangāna sakausējums manganīns. Tas ir oranždzeltens plastisks materiāls. No manganīna var izgatavot stiepli, kuras diametrs ir 0,02 mm, un lentu, kuras biezums ir 10 μm. Jaunajiem manganīniem ir labākas elektriskās īpašības, bet nestabilāki raksturlielumi.

Sakausējumiem, kuri paredzēti reostatu izgatavošanai, īpašību stabilitāte (neatkarība no laika un temperatūras) ir mazāk svarīga, tāpat maza nozīme īpatnējā termo-EDS vērtībai, toties materiālam jābūt termiski izturīgākam un lētākam. Šīm prasībām atbilstošākais materiāls ir vara un niķeļa sakausējums konstantāns. Darba temperatūra daudz augstāka nekā manganīnam, tādēļ konstantānu var lietot arī zemas temperatūras elektrisko sildierīču izgatavošanai.

4.3. Kontaktu materiāli

Elektrisks kontakts ir strāvas pārejas vieta no vienas strāvu vadošas detaļas otrā. Pēc darbības režīma izšķir nepārtraucamos (nekustīgos) kontaktus, komutējošos kontaktus un slīdkontaktus.

Nepārtraucamie kontakti parasti ir sametināti, mehāniski saspiesti vai salodēti.

Lodes. Lodēto kontaktu izgatavošanai lieto speciālus vadītājus sakausējumus – lodes jeb lodalvas. To kušanas temperatūra ir daudz zemāka nekā salodējamo metālu kušanas temperatūra. Izkausētā lode slapina šos metālus, daļēji šķīdina tos un atdziestot veido salodējamo detaļu mehāniski izturīgu savienojumu, kam ir maza elektriskā pretestība. Izšķir divus ložu veidus – mīkstlodes (lodalvas) un cietlodes.

Mīkstložu kušanas temperatūra nepārsniedz 400 °C, turpretim cietložu kušanas temperatūra ir daudz augstāka (virs 450 °C). Mīkstlodēm raksturīga mazāka cietība. Vara un tā sakausējumu lodēšanai plašāk lietotās mīkstlodes ir alvas-svina lodes (dažreiz to sastāvā ietilpst kadmija, antimona vai vara piedeva). Marku apzīmējumos ietilpstošais skaitlis norāda alvas daudzumu procentos. Atsevišķos gadījumos lieto arī svina vai kadmija lodes, kuru sastāvā ietilpst sudrabs un kuru kušanas temperatūra ir augstāka. Alumīnija lodēšanai lieto mīkstlodes, kuru sastāvā ietilpst Sn, Cd un Zn, dažreiz arī Al.

No **cietlodēm** biežāk lieto sudraba lodes (sudraba sakausējumus ar Cu, Zn un Cd) un vara lodes (vara sakausējumus ar P un Zn).

Kušņi. Lodēšanas procesu atvieglo speciāli palīgmateriāli – kušņi. Tie notīra lodējamās virsmas (šķīdina oksīdus) un aizsargā tās pret vides oksidējošo iedarbību lodēšanas procesā. Bez tam kušņi bieži vien samazina arī izkausētās lodes virsmas spraugumu, tādēļ lode labāk izplūst pa lodājamo virsmu.

Pēc sastāva izšķir aktīvos kušņus jeb skābju kušņus, kuru galvenais komponents ir sālsskābe vai cinka hlorīds ($ZnCl_2$), un bezskābju kušņus, kurus izveido galvenokārt uz kolofonija bāzes. Aktīvie kušņi nodrošina labāku lodējuma kvalitāti, bet sakarā ar to, ka no lodējuma vietas rūpīgi jānomazgā skābes pārpalikums, kas var izraisīt intensīvu koroziju, elektrisko shēmu montāžā šos kušņus lietot nedrīkst.

Aktivizētos bezskābju kušņus ar salicilskābes vai anilīna hlorīda piedevu var lietot arī nenotīrītu virsmu salodēšanai. Tā kā alumīnijs gaisā ļoti ātri oksidējas, tā lodēšanai lieto speciāla sastāva kušņus. Lodējot ar cietlodēm, par kušņiem lieto maisījumus, kuru galvenais komponents parasti ir boraks ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) vai borskābe (H_3BO_3).

Komutējošos kontaktus, ar kuriem saslēdz vai atslēdz elektrisko ķēdi, iedala stiprstrāvas kontaktos un vājstrāvas kontaktos. Šo kontaktu izgatavošanai lieto materiālus, kas nodrošina minimālu kontaktpretestību, kā arī nepieciešamo mehānisko, termisko un ķīmisko izturību. Nelīdzenā virsmas mikroreljefa dēļ kontaktdetaļas saskaras tikai atsevišķos laukumīņos. Kontakta mehāniskā dilšana atkarīga galvenokārt no materiāla īpašībām un kontaktspiediena, jo lielāks spēks ar kādu kontaktdetaļas piespiež vienu pie otras, jo vairāk tās dilst. Elektrisko dilšanu var radīt elektriskā loka termiskā un elektrodinamiskā iedarbība vai citi elektriski faktori.

Vājstrāvas kontaktiem piemērotākie materiāli ir cēlmetāli (platīns, zelts,

sudrabs), stiprstrāvas kontaktiem – metālkeramiskie sakausējumi, kuriem piemīt vairāku metālu pozitīvās īpašības. Vājstrāvas komutējošajiem kontaktiem parasti raksturīgs mazs kontaktspiediens, caur tiem plūst mazas strāvas, tādēļ galvenā prasība, kas jāievēro, izvēloties materiālu, ir maza kontaktpretestība. Šai prasībai vislabāk atbilst platīns, rodijs, pallādijs, zelts un sudrabs.

Platīns gaisā neoksidējas un neveicina loka rašanos, taču tam raksturīga erozija – adatu veidošanās. Tādēļ biežāk lieto platīna sakausējumu ar irīdiju. No šī sakausējuma izgatavo atbildīgus precīzus kontaktus. Rodijs ir ļoti ciets, mehāniski grūti apstrādājams metāls. No tā izgatavotiem precīzajiem kontaktiem ir ļoti labas īpašības. Pallādijs pēc īpašībām līdzīgs platīnam, bet lētāks, tādēļ to lieto platīna aizstāšanai. Bieži izmanto pallādija sakausējumu ar sudrabu. Zeltu tīrā veidā nelieto, jo tas veicina loka rašanos un ir neizturīgs pret eroziju. Parasti izmanto zelta sakausējumus ar platīnu, sudrabu, niķeli un cirkoniju. Sudrabs gaisā oksidējas, tādēļ mazāk pakļauts erozijai.

Stiprstrāvas komutējošajiem kontaktiem lieto cieto varu, bet galvenokārt metālkeramiskos materiālus (kompozīcijas: sudrabs-kadmija oksīds, sudrabs-vara oksīds, varš-grafīts, sudrabs-niķelis, sudrabs-grafīts, sudrabs-niķelis-grafīts, sudrabs-volframs-niķelis, varš-volframs-niķelis utt.). Tos izgatavo pēc pulvermetallurģijas metodēm, kuru pamatprocesi ir analogiski keramikas izgatavošanas tehnoloģijas procesiem. Vispirms komponentus sasmalcina pulverī un sajauc. No sajauktās masas normālā temperatūrā presē kontaktdetaļu sagataves. Apdedzinot šīs sagataves augstā temperatūrā (1000 – 1400 °C), kas zemāka par vismaz viena komponenta kušanas temperatūru, iegūst keramikai līdzīgu materiālu ar nehomogēnu struktūru, kas sastāv vismaz no divām fāzēm.

Metālkeramisko kontaktu materiālu izgatavošanai parasti izmanto divus komponentus. Tos izvēlas tā, lai vienam komponentam būtu zema kušanas temperatūra, maza cietība un liela īpatnējā elektrovadītspēja. Salīdzinājumā ar sudraba, vara, volframa vai metālu sakausējumu kontaktiem, metālkeramiskie kontakti ir nodilumizturīgāki, tiem pieļaujami lielāki kontaktspiedieni, tie ir izturīgāki pret eroziju (kontakta virsmas noārdīšana elektriskā loka un dzirksteļu ietekmē), pēc izgatavošanas nav mehāniski jāapstrādā. Sudraba-kadmija oksīda kontakti ir plastiski un viegli apstrādājami. Tiem raksturīga maza kontaktpretestība un liela izturība pret eroziju un sametināšanos.

Līdzīgas īpašības ir arī sudraba-vara oksīda kontaktiem, tikai tiem gāzveida produkti izdalās augstākā temperatūrā, tādēļ šos kontaktus ieteicams izmantot par lieljaudas kontaktiem, kuros loka temperatūra ir augstāka. Sudraba-grafīta un vara-grafīta kontaktiem piemīt maza kontaktpretestība, tie ir droši pret sametināšanos un izturīgi pret dilšanu, it sevišķi tad, ja kompozīcijā ietilpst arī niķelis. Sudraba-niķeļa

metālkeramikas kontakti ir plastiski, tiem piemīt maza kontaktpretestība. Šie kontakti ir izturīgi pret eroziju, bet viegli sametinās. Lai to novērstu, vienu sudrab-niķeļa kontakt detaļu bieži vien lieto pārī ar sudraba-grafīta vai sudraba-kadmija oksīda kontakt detaļu. Sudraba-volframa un vara-volframa kontakti ir ļoti izturīgi pret eroziju un dilšanu, taču tiem ir relatīvi liela kontaktpretestība un nepieciešams liels kontaktspiediens.

Slīdkontaktu izgatavošanai lieto divas materiālu grupas elektrotehniskos ogles materiālus un atsperīgos metāla materiālus. Atsperīgo slīdkontaktu izgatavošanai lieto galvenokārt kadmija bronzu un kadmija-alvas bronzu. Mehāniskās īpašības tām ir sliktākas nekā, piemēram, berilija bronzei, toties īpatnējā pretestība ir daudz mazāka un nodrošina mazu kontaktpretestību.

4.4. Elektrotehniskie ogles materiāli

Elektrotehniskās ogles izstrādājumus izgatavo no oglekļa materiālu – grafīta, koksas, kvēpu un antracīta – maisījuma ar pulvertehnoloģijas metodēm. Dažu elektrotehniskās ogles izstrādājumu izejvielu sastāvam vēl pievieno metālu (vara, svina, alvas u. c.) pulverus. Elektrotehniskie ogles materiāli sastāv no vairāk vai mazāk tīra oglekļa. Pēc elektrovadītspējas mehānisma tie pieder pie pusvadītājiem, taču dažām šo materiālu modifikācijām ir liela īpatnējā elektrovadītspēja, tādēļ tās praktiski lieto par vadītājiem materiāliem. Galvenie elektrotehniskie ogles materiāli ir grafīts, kvēpi un pirolītiskais ogleklis. Grafīts ir dabā atrodamā oglekļa kristāliska modifikācija, kurai raksturīga augsta kušanas temperatūra (3900 °C). Kristāliskā struktūra ir rupjgraudaina, ļoti anizotropa. Oglekļa atomi tajā izvietoti paralēlās plaknēs. Šo plakņu virzienā grafītam ir labas mehāniskās īpašības un liela elektrovadītspēja. Grafīta īpatnējā pretestība $\rho = 8 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$. Augstā temperatūrā skābekļa klātbūtnē grafīts oksidējas. Kalnraktuvēs iegūtais grafīts satur dažādus piejaukumus un vismaz 90 % oglekļa. Nozīmīgākie elektrotehniskie ogles izstrādājumi ir elektrisko mašīnu suku, ogles elektrodi, mikrofonu pulveri un membrānas, kā arī oglekļa rezistori.

No elektrotehniskās ogles izstrādājumiem visplašāk lieto elektrisko mašīnu suku un kontakt detaļas. Izšķir šādus suku veidus: grafīta suku, ogles-grafīta suku, metālgrafīta suku un elektrografītētās suku.

4.5. Magnētiskie materiāli

Atkarībā no vielas magnētiskajām īpašībām, visus materiālus iedala šādās grupās.

Diamagnētiķi, kas ir vielas, kuras ārējā magnētiskajā laukā magnetizējas pretēji ārējā lauka virzienam, magnētiskie momenti ir kompensēti, tādēļ atoma summārais magnētiskais moments ir vienāds ar nulli.

Paramagnētiķi, kas ir vielas, kuras ārējā magnētiskajā laukā magnetizējas tā virzienā, tādēļ paramagnētiķi magnēts pievelk. Paramagnētiķi ir alumīnijs, volframs, skābeklis. Paramagnētiķos elektronu magnētiskie momenti nav pilnīgi kompensēti, tādēļ arī atomiem ir magnētiskie momenti.

Feromagnētiķi, kas ir vielas, kam ir kristāliskas neliela izmēra daļiņas - domēni, kuru magnētiskie momenti spontāni orientējas vienā virzienā. Ja ārēja magnētiskā lauka nav, feromagnētiķa domenu momenti vērsti kristallogrāfisko asu virzienos un savstarpēji kompensējas, tādēļ makroskopiskā paraugā summārais magnētiskais moments vienāds ar nulli. Ievietojot paraugu ārējā magnētiskajā laukā, domenu magnētiskie momenti cenšas orientēties ārējā lauka virzienā, jo šāds stāvoklis atbilst minimālai potenciālajai enerģijai un tātad arī sistēmas maksimālai stabilitātei. Materiālus, kas viegli magnetizējami un atmagnetizējami, sauc par **magnētiski mīkstiem materiāliem**, turpretim materiālus, kuros magnetizēšanās notiek tikai spēcīgā magnētiskajā laukā, patērējot lielu enerģijas daudzumu, bet atmagnetizēšanās ir aizkavēta un tādēļ magnetizētais stāvoklis var saglabāties ilgstoši, – **par magnētiski cietiem materiāliem**. Magnētiski mīkstos materiālus izdevīgi lietot transformatoru un spoļu serdēm un citiem izstrādājumiem, kuros ekspluatācijas procesā pastāvīgi pārmagnetizē. Turpretim pastāvīgo magnētu izgatavošanai piemērotāki ir magnētiski cietie materiāli, kuros atmagnetizēšanās ir aizkavēta un tādēļ var ilgstoši saglabāties liela magnetizēšanas pakāpe. Materiāla magnetizēšanas procesu raksturo likne, kas attēlo indukcijas atkarību no magnētiskā lauka intensitātes (magnetizēšanas likne). Vājā magnētiskajā laukā, kad notiek domenu sienīņu elastīga deformācija, indukcija pieaug proporcionāli lauka intensitātei. Palielinoties lauka intensitātei, novērojams straujš indukcijas pieaugums, kas atbilst domenu sienīņu neelastīgajai deformācijai, un relatīvi mazāk straujš indukcijas pieaugums, kas atbilst domenu magnētisko momentu pagriešanās procesam. Spēcīgā magnētiskajā laukā magnetizēšanas process beidzas, jo, lauka intensitātei sasniedzot kādu vērtību H_s , ko sauc par piesātinājuma magnētiskā lauka intensitāti, magnētiskais moments un magnetizētība sasniedz maksimālo iespējamo piesātinājuma vērtību.

Kontroljautājumi

1. Kādas ir būtiska atšķirība ir starp augstas vadītspējas un lielas pretestības vadītājiem?
2. Kādas ir supravadītāju un kriovadītāju īpašības?
3. Kādās grupās var iedalīt kontaktu materiālus?
4. Kāpēc lodējot ir nepieciešami kušņi?
5. Kāda ir atšķirība starp cietlodēm un mīkstlodēm?
6. Kādus materiālus ieteicams izmantot a) – pretestībām; b) - sildelementiem?
7. Kādas ir jeļektrotehnisko ogles materiālu nozīme?
8. Kuriem polimēriem ir vislielākā termoizturība?
9. Kādas ir ferromagnētiķu atšķirības no parastās dzelzs izstrādājumiem.
10. Nosauciet magnētisko izstādājumu pielietojuma piemērus un raksturojiet to īpatnības.

Izmantotā literatūra

1. Dobelis M. Elektrotehniskie materiāli. Rīga: Jumava, 1997.
2. Kļaviņš. Elektrotehniskie un radiotehniskie materiāli. Rīga: Zvaigzne, 1975.
3. Ņikuļins N. Elektrotehnisko materiālu mācība. Rīga, 1988.
4. Greivulis J., Raņķis I. Modernās elektronikas pamati. Rīga, 1992.
5. Popovs V., Nikolajevs S. Elektrotehnika. Rīga, 1971.
6. Žukova Z. Kompozīti – nākotnes materiāli. Rīga, 1988.
7. Ulpe J., Kupče L. Koka un plastmasu konstrukcijas. Rīga, 1991.
8. Rolovs B. Par fiziku un fiziķiem. Rīga, 1989.
9. Fizikas rokasgrāmata. E. Šiltera redakcijā. Rīga, 1988.