

4. MATERIALE CONDUCTOARE. METALE

4.1 Caracteristici generale

Materialele conductoare se caracterizează prin valori mari ale conductivității electrice: $10^6 \dots 10^8 \text{ S / m}$ ($\rho = 10^{-8} \dots 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$).

După tipul purtătorilor mobili de sarcină care determină conducția electrică aceste materiale pot fi:

- cu conducție electronică (conductoare de ordinul I);
- cu conducție ionică (conductoare de ordinul II).

În *materialele conductoare de ordinul I* conducția se datorează mișcării ordonate în raport cu corpul a electronilor de conducție sub acțiunea câmpului electric. Ele nu suferă modificări de structură sub acțiunea curentului electric și rezistivitatea lor crește cu creșterea temperaturii. Din această grupă fac parte metalele (în stare solidă și lichidă), grafitul etc.

Conductoarele de ordinul II - numite și conductoare ionice sau electroliți - sunt soluțiile bazice și acide, sărurile în stare solidă sau lichidă, soluții ale acestora etc; conducția electrică în acestea se datorează deplasării ionilor pozitivi și negativi și are ca rezultat schimbarea treptată a compoziției electrolitului și separarea la electrozi a produselor electrolizei. Conductivitatea de tip electronic ia valori mai mari decât cea ionică.

Se prezintă numai materialele cu conducție electronică (îndeosebi metalele) pentru că numai ele au aplicații importante în industria electrotehnică.

Cum solicitările metalelor sunt foarte complexe - atât ca intensitate cât și ca natură (electrice, termice, mecanice, chimice, magnetice etc.) - și cum metalele pure nu pot suporta acțiunile combinate ale acestora decât în anumite condiții, în practică se utilizează, de cele mai multe ori, aliaje ale căror proprietăți pot să difere considerabil de cele ale metalelor componente.

Interesează, cu precădere, proprietățile electrice ale acestor materiale și factorii care le influențează.

4.2 Conducția electrică a metalelor

4.2.1 Teoria clasică a conductivității electrice

Teoria clasică a conducției electronice în metale - elaborată în anul 1900 de Drude și perfecționată apoi de Lorentz - are la bază modelul gazului electronic în care se presupune că electronii liberi din metale se comportă ca un gaz ideal. Deci, electronii se mișcă liber și interacționează cu rețeaua cristalină și între ei numai când se ciocnesc.

În lipsa unui câmp electric exterior, electronii se mișcă haotic, în toate direcțiile, datorită numeroaselor ciocniri dintre ei și dintre ei și ionii din nodurile rețelei cristaline, astfel că nu se realizează o deplasare netă a lor în conductor (fig.4.1,a). La stabilirea în corp a unui câmp electric exterior de intensitate microscopică \bar{e}_m , acesta acționează asupra electronilor liberi cu o forță $\bar{F}_e = -q_0 \bar{e}_m$ care le imprimă o viteză ordonată de translație (drift) \bar{v}_E , în raport cu corpul - suprapusă peste cea de agitație termică (fig. 4.1,b) - ceea ce determină apariția curentului electric de conducție.

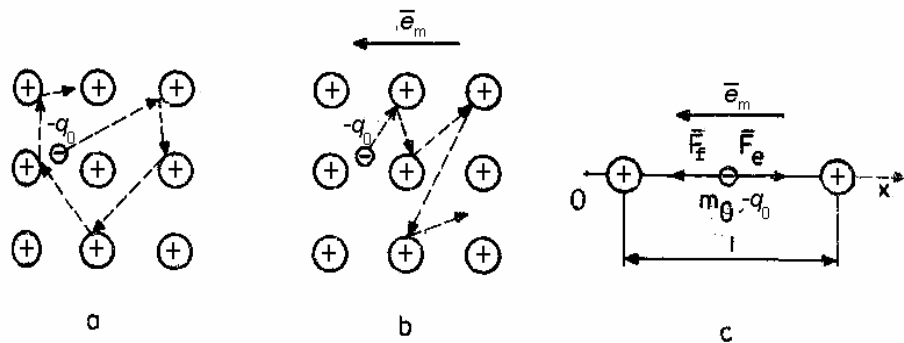


Fig.4.1 Mișcarea electronului în metal: a - în absența câmpului electric exterior; b - în prezența câmpului electric; c - forțele ce acționează asupra electronului

Din cauza ciocnirilor cu ionii din noduri sau dintre ei, mișcarea electronilor este frânată, în sensul că, datorită împrăștierii prin ciocniri, componenta vitezei după direcția câmpului electric se micșorează (fig.4.2).

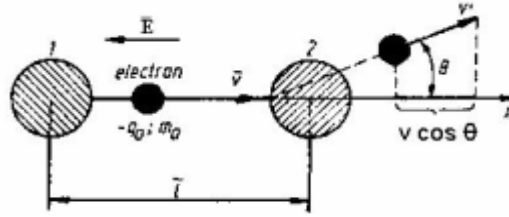


Fig. 4.2 Modificarea vitezei electronului datorită ciocnirii cu ionii rețelei cristaline

De frânare se ține seama definind o forță de frânare, F_f , proporțională cu viteza $F_f = b\bar{v}$, b fiind o constantă. Viteza electronului în câmp electric este egală cu suma dintre viteza ordonată \bar{v}_E și cea de agitație termică \bar{v}_T : $\bar{v} = \bar{v}_E + \bar{v}_T$. Viteza

medie \tilde{v} este egală cu \tilde{v}_E deoarece mișcarea de agitație termică este haotică și deci $\tilde{v}_T = 0$. În această situație, ecuația de mișcare a electronului liber este:

$$m_0 \frac{d\bar{v}}{dt} = -b\bar{v} - q_0\bar{e}_m \tag{4.1}$$

unde m_0, q_0 sunt masa inertă, respectiv sarcina electrică a electronului.

Proiectând ecuația (4.1) pe direcția câmpului electric și mediind-o, se obține - considerând că $\tilde{e}_m = \bar{E}$ (\bar{E} fiind intensitatea macroscopică a câmpului electric) - ecuația:

$$\frac{d\tilde{v}_E}{dt} + \frac{b}{m_0} \tilde{v}_E = -\frac{q_0}{m_0} E \tag{4.2}$$

Soluția generală a ecuației diferențiale (4.2) are forma:

$\tilde{v}_E = A \exp(-t/\tau) - \frac{q_0}{b} E$, în care $\tau = m_0/b$ este durată de relaxare a electronilor. Constanta de integrare A se determină punând condiția ca la momentul inițial, $t = 0$, când se stabilește (brusc) câmpul electric, viteza ordonată \tilde{v}_E să fie nulă. Rezultă, deci, $A = q_0 E/b = q_0 \tau E/m_0$, cu care, trecând din nou la mărimi vectoriale, avem:

$$\tilde{v}_E = \frac{q_0 \tau}{m_0} [\exp(-t/\tau) - 1] \bar{E} \tag{4.3}$$

Pentru calculul densității curentului electric de conducție se apelează la relația (2.77) $\bar{J} = N_0(-q_0)\tilde{v}_E$, care prin înlocuirea lui \tilde{v}_E cu expresia (4.3) devine: $\bar{J} = -N_0 \frac{q_0^2 \tau}{m_0} [\exp(-t/\tau) - 1] \bar{E}$.

În regimul permanent final, când $\exp(-t/\tau) = 0$ (ceea ce se stabilește, practic, foarte repede având în vedere că durata de relaxare a electronilor de conducție în metale este foarte mică: $\tau \cong 10^{-14}$ s) se obține:

$$\bar{J} = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0} \bar{E}, \text{ din care, ținând seama de legea conducției electrice}$$

$\bar{J} = \sigma \bar{E}$ (pentru medii fără câmpuri electrice imprimate) rezultă expresia conductivității metalelor:

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0} \quad (4.4)$$

Calculând mobilitatea electronului, pentru $t \rightarrow \infty$:

$$\mathcal{M} = \frac{\tilde{v}_E}{E} = -\frac{q_0 \tau}{m_0} \quad (4.5)$$

se poate scrie conductivitatea în funcție de mobilitate:

$$\sigma = N_0 (-q_0) \mathcal{M} \quad (4.6)$$

Cunoscând conductivitatea electrică a materialului, concentrația, masa inertă și sarcina electronilor, din relația (4.4) se poate calcula durata de relaxare a electronilor care, pentru cupru, are valoarea:

$$\tau = \frac{\sigma m_0}{N_0 q_0^2} = \frac{6,4 \cdot 10^7 \cdot 9,107 \cdot 10^{-31}}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2} \cong 2,7 \cdot 10^{-14} \text{ [s]}.$$

Dacă la procesul de conducție participă mai multe specii de purtători de sarcină (cazul conductorilor nemetalici), prin generalizare, relațiile (4.4) și (4.6) devin:

$$\sigma = \sum_i \frac{N_i q_i^2 \tau_i}{m_i} = \sum_i N_i q_i \mathcal{M}_i \quad (4.7)$$

4.2.2 Durata de relaxare clasică

Se poate stabili o relație între durata de relaxare τ și durata medie dintre două ciocniri succesive ale electronilor liberi cu ionii din nodurile rețelei cristaline metalice τ_c . În acest scop, se presupune că la un moment dat se suprimă câmpul electric \bar{E} din conductor. În urma ciocnirilor cu ionii rețelei cristaline, viteza ordonată a electronului scade cu timpul deoarece ciocnirile au un efect de împrăștiere a electronilor, schimbându-le, după unghiuri θ întâmplătoare, orientările vitezelor. Modulul vitezei

totale nu se modifică după ciocnire pentru că el este, practic, egal cu modulul vitezei de agitație termică \bar{v}_T , care este mult mai mare decât cel al vitezei de drift \bar{v}_E ($|\bar{v}_E| \cong 10^{-2}$ m/s și $|\bar{v}_T| \cong 10^6$ m/s) și care, practic, nu variază cu timpul (în medie) la temperaturile uzuale. Pentru simplificarea calculelor se presupune că electronul avea, înaintea ciocnirii cu ionul 2 (fig. 4.2), viteza orientată după axa Ox, deci $v = v_x$. După ciocnire, viteza electronului \bar{v}' ($|\bar{v}'| = |\bar{v}|$) face un unghi θ cu direcția Ox și proiecția vitezei pe această axă va fi $v_x \cos\theta$, deci scăderea vitezei după o ciocnire este egală cu $v_x (1 - \cos\theta)$. Dacă durata mijlocie dintre două ciocniri succesive este τ_c , în unitatea de timp, electronul suferă $1/\tau_c$ ciocniri și, deci, într-un interval mic de timp δt el suferă $\delta t/\tau_c$ ciocniri în decursul cărora componenta vitezei după Ox suferă, în medie, scăderea: $\delta v_x = (\delta t/\tau_c) v_x (1 - \cos\theta)$, de unde rezultă:

$$\frac{\delta v_x}{\delta t} = -\frac{v_x (1 - \cos\theta)}{\tau_c} \quad (4.8)$$

Din ecuația (4.2), proiectată pe axa Ox și pentru $\bar{E} = 0$, se obține $\delta v_x / \delta t = -bv_x / m_0 = -v_x / \tau$, și, prin comparare cu relația (4.8), rezultă:

$$\tau = \frac{\tau_c}{1 - \cos\theta}, \quad (4.9)$$

deci $\tau > \tau_c$. Dacă nu există motive ca împrăștierea, prin ciocniri, să se realizeze cu precădere după anumite direcții din cristal, rezultă $\cos\theta = 0$ și, în acest caz:

$$\tau = \tau_c \quad (4.10)$$

Durata τ_c dintre două ciocniri succesive se poate calcula cu relația $\tau_c = \tilde{l} / |\bar{v}|$, unde \tilde{l} este drumul liber mijlociu al electronului (distanța medie dintre două ciocniri succesive) și $|\bar{v}|$ - modulul vitezei totale, care este, aproximativ, egal cu cel al vitezei de agitație termică $|\bar{v}| \cong |\bar{v}_T| = v_T$, deci:

$$\tau = \tau_c = \tilde{l} / v_T \quad (4.11)$$

Înlocuind pe τ în relația (4.4) se obține:

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tilde{l}}{m_0 v_T} \quad (4.12)$$

În relația (4.12), la temperaturile uzuale, numai \tilde{l} variază cu temperatura, scăzând hiperbolic cu temperatura ($\tilde{l} \cong C/T$), și rezultă:

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 C}{m_0 v_T T} = \frac{const.}{T}, \quad (4.13)$$

unde $\rho = 1/\sigma = const. \cdot T$, deci rezistivitatea crește linear cu temperatura.

4.2.3. Dependența rezistivității electrice a metalelor de diverși factori

Rezistivitatea electrică a materialelor conductoare este influențată pe lângă temperatură și de alți factori precum: conținutul de impurități, defectele punctuale, compoziția chimică, tratamentele termice și mecanice etc.

4.2.3.1 Dependența rezistivității de temperatură

Conform celor stabilite în paragraful precedent, rezistivitatea variază linear cu temperatura. Acest mod de variație este, însă, valabil numai pentru temperaturi mai mari decât o temperatură caracteristică fiecărui metal, numită temperatură Debye, T_D .

Dependențele de temperatură ale rezistivității se pot scrie astfel:

- pentru temperaturi ridicate ($T \gg T_D$):

$$\rho = 1/\sigma = const. \cdot T \quad (4.14)$$

- pentru temperaturi scăzute ($T \ll T_D$):

$$\rho = 1/\sigma = const. \cdot T^5, \quad (4.15)$$

dependențe care se verifică experimental.

Temperatura Debye poate fi definită ca temperatura minimă peste care rezistivitatea metalelor depinde linear de temperatură, iar valorile lor pentru câteva metale, sunt indicate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1

Valorile temperaturii Debye

Metalul	Na	Au	Ag	Pt	Cu	Al	Ni	Fe	Be
T_D, K	158	160	214	240	320	428	450	470	1440
$\rho \cdot 10^{-8}, \Omega \cdot m$	4,75	2,2	1,61	10,4	1,72	2,74	7,0	9,8	3,25

Pentru $T \gg T_D$, de obicei se folosește relația:

$$\rho_\theta = \rho_0 [1 + \alpha_0 (\theta - \theta_0)] \quad (4.16)$$

unde ρ_θ , ρ_0 reprezintă rezistivitățile la temperaturile θ și θ_0 (temperatura de referință arbitrară - de multe ori $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$) iar α_0 este o mărime de material, dependentă de θ_0 , numită *coeficientul de temperatură al rezistivității electrice*, definit cu relația:

$$\alpha_0(\rho) = \frac{\rho_\theta - \rho_0}{\theta - \theta_0} \cdot \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} \quad (4.17)$$

La metalele pure (cristale ideale), cu excepția celor de tranziție, pentru temperatura de referință $T_0 = 273 \text{ K}$, $\alpha_0(\rho) \cong 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. De exemplu: $\alpha_{0\text{Cu}} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{0\text{Al}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{0\text{Fe}} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

În cristalele reale, datorită mecanismelor de împrăștiere a electronilor pe defectele rețelei cristaline și pe ionii de impuritate, apar abateri de la dependența liniară de forma (4.16). Practic, dependența de temperatură a rezistivității electrice a metalelor se exprimă printr-o relație de forma:

$$\rho = \rho_0 (1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3 + \dots), \quad (4.18)$$

unde coeficienții se determină pe cale experimentală pentru fiecare material în parte.

4.2.3.2 Dependența rezistivității de conținutul de impurități

Conform relației (4.15) rezultă că, la $T = 0 \text{ K}$, rezistivitatea metalelor ar trebui să fie nulă și este într-adevăr foarte mică pentru cristalele de mare puritate. În cazul metalelor de puritate tehnică și al aliajelor, se constată că rezistivitatea, la $T = 0 \text{ K}$, are o valoare net diferită de zero, valoare numită rezistivitate reziduală ρ_{rez} .

Din datele experimentale rezultă că rezistivitatea unui metal se poate scrie ca sumă între un termen ideal care depinde de temperatură ρ_T și unul independent de temperatură ρ_{rez} (fig. 4.3, curba 1).

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{rez}} \quad (4.19)$$

Această relație poartă numele de *legea lui Matthiessen*. Variația $\rho = f(T)$ pentru metalele tehnice este redată în figura 4.3.

Cum ρ_{rez} depinde de conținutul de impurități și de numărul de defecte de rețea, legea lui Matthiessen se poate scrie:

$$\rho = \rho_{\text{imp}} + \rho_{\text{def}} + \rho_T, \quad (4.20)$$

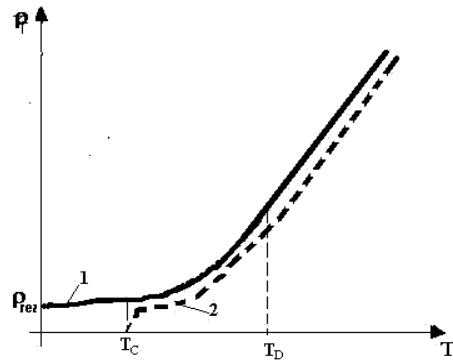


Fig. 4.3 Variația rezistivității cu temperatura la metalele tehnic pure

unde ρ_{imp} , ρ_{def} sunt rezistivitățile datorate impurităților, respectiv defectelor rețelei cristaline și ρ_T este rezistivitatea datorată ciocnirilor cu fononii rețelei.

Creșterea rezistivității cu impuritățile se explică prin faptul că prezența lor în rețeaua cristalină determină micșorarea timpului de relaxare și deci drumul liber mijlociu scade. Defectele de rețea au un efect similar.

4.2.3.3 Influența tratamentelor mecanice și termice asupra rezistivității

Tratamentele mecanice (laminare, forjare, trefilare etc) duc la o deformare mai accentuată a rețelei cristaline. Deci, un metal ecruisat (în stare *tare*) prezintă o rezistivitate mărită deoarece probabilitatea de ciocnire a electronilor cu ionii din nodurile rețelei cristaline crește. De obicei creșterea de rezistență este de (3...6) %.

Dacă, însă, metalul ecruisat este supus unui tratament termic, deci este readus în starea *moale*, fără tensiuni interne, se reduce gradul de deformare a rețelei cristaline și rezistivitatea sa scade. Acest lucru poate fi constatat în cazul mașinilor electrice bobinate cu bare sau sârme puternic ecruisate, netratate termic, care după un anumit număr de încălziri și răcirii în timpul funcționării, prezintă rezistivitate mai redusă decât în starea nouă, deși temperaturile realizate nu ating limitele de recoacere.

4.3 Supraconductibilitatea

4.3.1 Proprietățile stării de supraconducție

Conform celor prezentate în paragraful 4.2.3.2 rezultă că rezistivitatea electrică a metalelor trebuie să scadă continuu cu

temperatura, atingând la 0 K valoarea rezistivității reziduale ρ_{rez} . Experimental, se constată, însă, că la temperaturi foarte joase, în general mai mici de 20 K, și în câmpuri magnetice slabe pentru unele metale, aliaje sau combinații intermetalice, rezistivitatea este, practic, nulă.

Starea materialelor caracterizată prin lipsa totală a rezistenței electrice la trecerea curentului electric se numește *stare de supraconducție* iar materialele respective poartă numele de *supraconductori*.

Intervalul de temperatură în care are loc trecerea de la starea de conducție normală n la cea de supraconducție s este foarte mic, de câteva sutimi de grad (la staniu $\Delta T = 10^{-3}K$). Deci, se poate vorbi de o temperatură bine definită la care se face această trecere, numită *temperatură critică* T_c .

În tabelul 4.2 sunt indicate câteva materiale supraconductoare și temperaturile lor critice.

Tabelul 4.2

Temperaturile critice ale supraconductoarelor

Materialul	Hg	La	Pb	Nb	Ta	V	Nb ₃ Sn	NbN	V ₃ Si	Nb ₃ (Al _{0,8} Ge _{0,2})
T_c , [K]	4,1	5,8	7,2	9,2	4,3	5,1	18,2	14,7	17	20,05

S-a constatat că metalele feromagnetice nu sunt supraconductoare, ba chiar un procent mic de metal feromagnetic într-un material supraconductor scade mult valoarea temperaturii critice.

Metalele de tranziție ca vanadiul și niobiul, precum și compușii lor (V₃Si, Nb₃Sn, Nb₃(Al_{0,8}Ge_{0,2})) prezintă interes în aplicațiile tehnice deoarece au temperaturi critice mai ridicate și, deci, mai ușor de realizat practic. În materialele semiconductoare (Si, Ge etc.), starea supraconductoare se stabilește numai în straturi subțiri, la presiuni mari și pentru structuri cristaline care nu sunt stabile.

Experimental, s-a arătat că la trecerea din starea n în starea s nu se modifică structura rețelei cristaline și nici proprietățile mecanice sau optice. În schimb, rezistivitatea scade la zero iar conductivitatea termică și căldura specifică au un salt și se modifică proprietățile magnetice ale materialului.

Într-o probă supraconductoare sub formă de inel curentul electric indus pe cale electromagnetică se menține neschimbat timp îndelungat (prin calcul, 100000 de ani în condiții adecvate), după suprimarea

câmpului electric indus în corp, proba fiind parcursă de un curent electric persistent.

Un câmp magnetic constant, perpendicular pe direcția câmpului electric aplicat materialului, poate influența starea de supraconducție.

Dacă intensitatea câmpului magnetic stabilit din exterior depășește o anumită valoare critică H_c , dependentă de temperatură, starea de supraconducție se pierde ($H_c \cong 10^2 \dots 10^3$ Oe).

Dependența câmpului critic de temperatura critică (fig. 4.4) este dată de relația:

$$H_c(T) = H_{c0} \left(1 - \frac{T_c^2}{T_{c0}^2}\right) \quad H_c = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T_c}{T_{c0}}\right)^2\right], \quad (4.21)$$

unde H_{c0} este câmpul critic la $T = 0$ K iar T_{c0} este temperatura critică la $H = 0$. Domeniul de sub curbă corespunde stării supraconductive s iar cel de deasupra corespunde stării de conducție normală n .

Fig. 4.4 Dependența $H_c = f(T_c)$

Starea de supraconducție poate fi distrusă chiar de către curentul electric ce străbate supraconductorul, prin câmpul magnetic propriu când intensitatea lui depășește o anumită valoare. Se poate, deci, defini și o densitate de curent critică, J_c .

O altă proprietate a stării de supraconducție este aceea că în interiorul supraconductorilor masivi intensitatea câmpului magnetic este nulă, liniile acestuia fiind respinse în afara materialului (fig. 4.5).

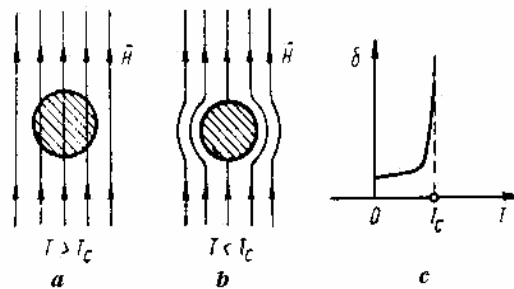


Fig. 4.5 Liniile câmpului magnetic în stările: a - normală; b - supraconductive; c - adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic în starea s .

Acest efect de expulzare a liniilor câmpului magnetic se numește efect *Meissner - Ochsenfeld*.

Inducția magnetică B , densitatea curentului J și intensitatea câmpului electric E sunt nenule numai într-un strat subțire, de lărgime δ .

Adâncimea de pătrundere δ are valori între 10^{-7} și 10^{-8} m și se poate calcula cu relația: $\delta = \sqrt{\Lambda / \mu}$ unde Λ este o constantă de material (constantă lui London) și μ este permeabilitatea magnetică relativă.

La frecvențe înalte (în infraroșu, $f = 10^{13} \dots 10^{14}$ Hz), metalul devine conductor normal chiar pentru temperaturi mai mici decât T_c .

4.3.2. Teoria microscopică a supraconducției

Deoarece structura cristalină nu se modifică la trecerea din starea normală în cea supraconductoare, rezultă că responsabil de modificarea proprietăților metalului în starea de supraconducție este gazul electronic care trece într-o altă stare cuantică.

Stabilirea, practic, brusc a stării supraconductoare (ΔT iare valori între 10^{-3} până la unități de grad Kelvin) indică faptul că la temperatura critică apare o corelație puternică între toți electronii, care în stare normală se comportă relativ independent. Această corelație apare datorită interacțiunii dintre electroni.

Teoria BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) a demonstrat existența simultană a electronilor normali și a electronilor supraconductori și oferă o descriere cuantică a comportării acestora din urmă. Conform acestei teorii, la temperaturile foarte joase la care se stabilește starea supraconductoare ($T < T_c$) oscilațiile rețelei cristaline sunt relativ mici și influența mișcării electronului asupra rețelei este mai pronunțată.

Este posibilă, prin intermediul rețelei cristaline, o interacțiune de atracție între doi electroni, care formează astfel o stare specifică legată, numită pereche Cooper. Această pereche apare doar atunci când forța de atracție dintre electroni este mai mare decât cea de respingere columbiană dintre ei. Distanța dintre electronii perechii Cooper la care se manifestă această atracție poartă denumirea de *lungime de coerență* ξ și este de valoare relativ mare ($10^{-7} \dots 10^{-6}$ m) față de drumul liber mijlociu al electronului.

Interacțiunea de atracție dintre electroni se stabilește prin intermediul rețelei cristaline astfel: la temperaturile foarte joase, sub T_c , un electron de conducție atrage ionii rețelei cristaline din apropiere. În acest fel, rețeaua se deformează și ionii se apropie de electron, crescând astfel concentrația de sarcină pozitivă în această zonă (fig. 4.6). Un al

doilea electron de conducție este atras de sarcina pozitivă în zona unde se află primul electron. Se formează deci o pereche de electroni (pereche Cooper) între care se manifestă o acțiune de atracție, prin intermediul rețelei cristaline.

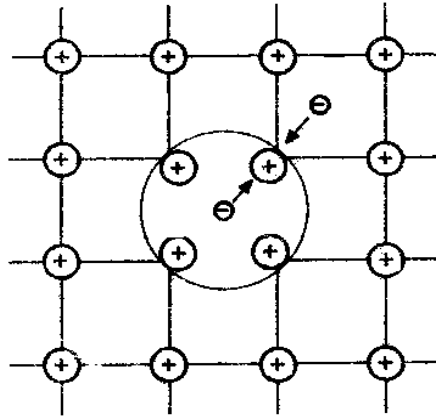


Fig. 4.6 Structura cristalină la formarea perechii Cooper

Electronii perechii Cooper au impulsuri egale și opuse și spinii antiparaleli deoarece această stare energetică (conform principiului lui Pauli) este mai stabilă decât cea cu spinii paraleli. Perechea având spinul egal cu zero nu se mai supune statisticii Fermi - Dirac ci statisticii Bose - Einstein. Conform acestei statistici numărul de particule care se găsesc într-o stare cuantică este nelimitat. Ca urmare, la $T < T_c$ majoritatea perechilor Cooper se găsesc în starea

fundamentală, de impuls total nul (fig. 4.7). Existența perechilor Cooper modifică spectrul energetic, deoarece acestea au energia mai mică decât electronii individuali, obținându-se o condensare a stărilor (fig. 4.7,b) și o modificare a structurii benzilor energetice (fig. 4.8).

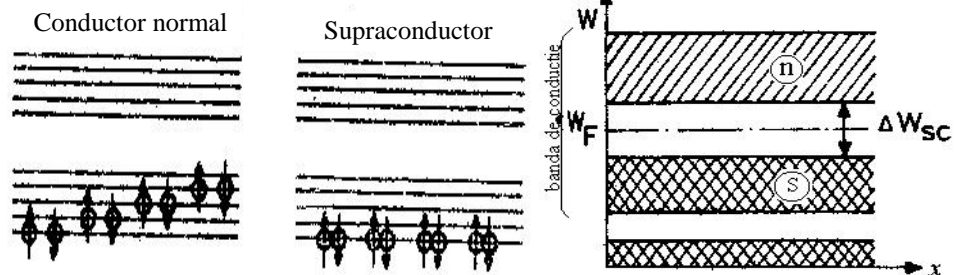


Fig. 4.7 Ocuparea cu electroni a nivelelor energetice în conductorul normal și în supraconductor Fig. 4.8 Structura benzilor de energie într-un supraconductor la 0 K

La temperaturi $T < T_c$ apare o bandă de energie interzisă, de lățime ΔW_{sc} , centrată pe nivelul Fermi w_F . Electronii supraconductorii ocupă stările cu energia $w < (w_F - \Delta W_{sc}/2)$ iar cei normali, pe cele cu $w > (w_F + \Delta W_{sc}/2)$. La 0 K toți electronii de conducție pot fi supraconductorii. La o temperatură dată, o parte dintre electroni sunt excitați și trec în

starea normală, escaladând banda interzisă. Lărgimea acestei benzi variază în funcție de temperatură, fiind nulă la T_{co} când starea de supraconducție dispare și crește când temperatura scade sub T_{co} .

Modul de stabilire a curentului electric de conducție într-un semiconductor se poate explica pe baza particularităților pe care le prezintă perechile Cooper. La aplicarea unui câmp electric cei doi electroni ai perechii Cooper cu impulsuri $\pm \bar{p}$ primesc un impuls suplimentar $\Delta\bar{p}$ astfel că impulsul total al perechii $(\bar{p} + \Delta\bar{p}) + (-\bar{p} + \Delta\bar{p}) = 2\Delta\bar{p}$ devine nenul și perechea Cooper se deplasează în spațiu împreună cu tot colectivul de perechi, determinând un curent electric de conducție macroscopic. Dacă densitatea acestuia nu depășește densitatea critică J_c atunci curentul electric este stabil, staționar.

Lipsa rezistenței electrice la supraconductori se explică prin faptul că perechile Cooper nu suferă un proces de împrăștiere pe fononii rețelei cristaline. La un astfel de proces, în urma căruia viteza ordonată v_E scade, se supun numai electronii individuali. Deci pentru a suferi un astfel de proces perechile Cooper ar trebui să se rupă, ceea ce se poate întâmpla numai dacă electronii trec din starea s în starea n , adică primesc o energie $w \geq \Delta w_{sc}$, care la $T < T_c$ nu poate fi furnizată. Ca urmare, întregul colectiv de perechi în interacțiune se deplasează în supraconductor fără ca acesta să-i opună rezistență.

4.3.3. Efectul Josephson

Acest efect a fost pus în evidență într-o joncțiune Josephson care este un ansamblu de doi supraconductori separați printr-o peliculă izolantă foarte subțire, de grosime $\delta = 1 \dots 3$ nm, mai mică decât lungimea de coerență ξ (distanța până la care se exercită o acțiune de atracție între doi electroni – ce formează o pereche Cooper -, prin intermediul rețelei cristaline).

O astfel de joncțiune se obține, practic, în felul următor: pe un substrat izolant (de exemplu: sticlă) se depune prin evaporare un prim strat supraconductor de Sn sau Pb, după care suprafața lui este oxidată pentru obținerea peliculei izolante și, apoi, este depusă a doua peliculă supraconductoare, perpendicular pe prima (fig. 4.9,a). Pentru obținerea

stării de supraconducție în peliculele depuse se introduce dispozitivul într-un criostat (instalație de producere a temperaturilor scăzute), cu ajutorul căruia temperatura se aduce sub temperatura critică a celor două supraconductoare.

Pentru studierea caracteristicii $I = f(U)$ se realizează montajul din figura 4.9,b unde joncțiunea se alimentează de la o sursă de tensiune continuă.

La temperaturi $T > T_c$ prin joncțiune circulă un curent slab, prin efect tunel, caracteristica curent - tensiune este aproximativ liniară și joncțiunea se comportă ca o rezistență.

Sub temperatura critică $T < T_c$ comportamentul joncțiunii se schimbă complet. Lungimea de coerență fiind mai mare decât grosimea izolanului ($\xi > \delta$) interacțiunea dintre electroni se produce traversând izolanul. Rezultă că un curent continuu, inferior unei valori limită I_c , poate traversa joncțiunea fără ca să apară o diferență de potențial între fețele izolanului. Acest fenomen constituie *efectul Josephson de curent continuu* (fig. 4.9,c - curba 1).

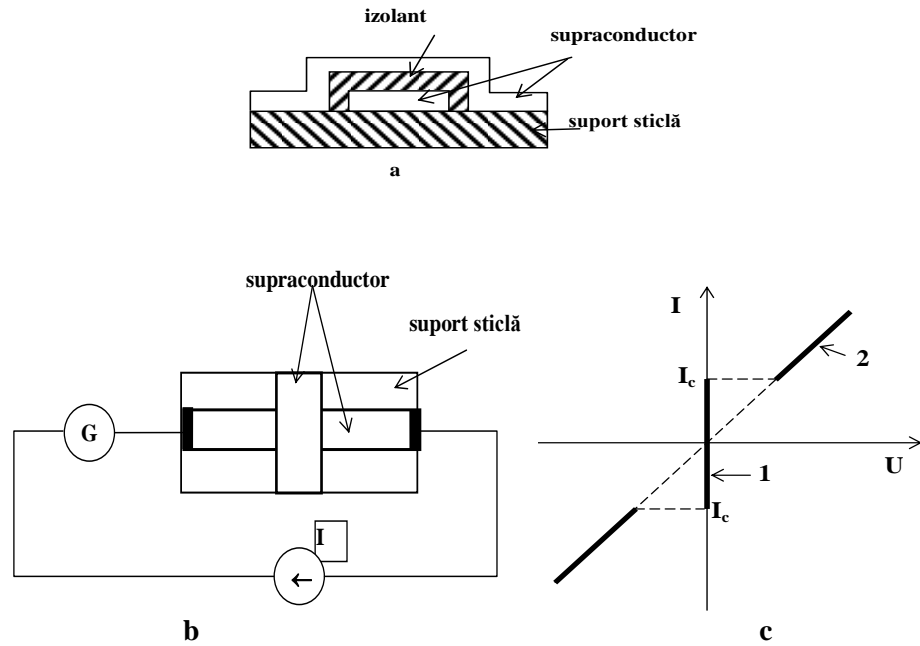


Fig. 4.9 *Efectul Josephson: a - realizarea joncțiunii Josephson; b - schema electrică pentru studiul efectului Josephson; c - caracteristica curent - tensiune*

Atunci când curentul depășește valoarea critică I_c apare brusc o diferență de potențial la bornele joncțiunii (fig. 4.9,c - curba 2). Josephson a arătat că această tensiune este legată de curentul I care circulă prin joncțiune prin expresiile:

$$I = I_c \sin \varphi \quad \text{și} \quad U = \frac{\hbar}{2q_0} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.22)$$

unde φ reprezintă diferența de fază între funcțiile de undă care descriu starea celor doi supraconductori. Acest comportament al joncțiunii este cunoscut sub denumirea de efectul Josephson de curent alternativ.

Înlocuind diferența de fază φ din (4.22) (relația a doua) în prima rezultă:

$$I = I_c \sin \left(\frac{2q_0}{\hbar} \int U dt \right) \quad (4.23)$$

ceea ce arată că dacă joncțiunea este alimentată cu o tensiune continuă, curentul ce o străbate este pur sinusoidal:

$$I = I_c \sin (\omega_0 t), \quad (4.24)$$

de frecvență $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2q_0}{h} U$; $\frac{2q_0}{h} = 483,6 \text{ MHz}/\mu\text{V}$

4.3.4. Aplicații ale stării de supraconducție

Proprietățile stării de supraconducție se utilizează pentru realizarea unor dispozitive electrotehnice cu performanțe deosebite. S-au realizat astfel electromagneți supraconductori ce pot produce câmpuri magnetice de inducții de peste 20 T și circuite supraconductoare pentru excitația mașinilor unipolare, turbogeneratoarelor și a generatoarelor magneto-hidro dinamice (MHD) cu inducții magnetice de 4 ... 6 T.

Conductoarele supraconductoare se realizează din mănunchiuri de filamente supraconductoare de NbTi sau Nb₃Sn cu diametre foarte reduse (0,12 ... 0,6 μm) înglobate într-o masă de metal (cupru sau aliaje CuNi), numărul filamentelor fiind de la sute la sute de mii. Se mai utilizează și benzi sau straturi subțiri (îndeosebi pentru fabricarea joncțiunilor). Un cablu supraconductor de dimensiuni 1,9 x 3,8 mm la 4,2 K, la inducții magnetice de sub 5 T poate transporta curenți electrici cu intensități de până la 2040 A.

Aplicațiile mai importante ale materialelor supraconductoare sunt: cabluri pentru transportul energiei electrice la distanțe mari, electromagneți cu câmpuri magnetice foarte intense (pentru acceleratoare și detectoare de particule, în fuziunea termonucleară controlată, transport feroviar pe perne magnetice etc.), alternatoare, transformatoare și motoare electrice de dimensiuni și greutate reduse, diode supraconductoare, calculatoare ultrarapide, detectoare de câmpuri magnetice foarte slabe (10^{-15} T), voltmetre (10^{-15} V) și galvanometre ultrasensibile, inele supraconductoare pentru stocarea energiei electrice, miniaturizarea circuitelor electronice etc.

Realizările industriale, încă modeste, vor crește, în viitor, pe baza cercetărilor ce se fac pentru obținerea de materiale supraconductoare cu temperaturi critice ridicate (MSTR).

4.4. Prezentarea materialelor conductoare

4.4.1 Funcțiunile materialelor conductoare

Materialele conductoare metalice au domenii largi de utilizare atât ca elemente chimice pure cât și sub formă de combinații (în special aliaje), în funcție de cerințele tehnice care se impun.

O clasificare importantă a lor poate fi făcută după funcțiunile pe care le pot îndeplini, funcțiuni dependente de proprietățile de conducție ale materialelor. Acestea sunt:

1. *Funcția de conducție a curentului electric* este îndeplinită de materialele ce opun o rezistență mică sau neglijabilă la trecerea curentului electric. Materialele ce îndeplinesc această funcție sunt utilizate pentru transportul energiei electrice, conductoare pentru dispozitive electronice (bobine, conexiuni între componente etc.), în construcția cablurilor de înaltă frecvență și a ghidurilor de undă metalice, ca armături pentru condensatoare etc.

2 *Funcția de control și limitare a curentului electric* se bazează pe rezistența controlabilă și stabilă (neinfluențată de factorii externi) pe care o opun unele conductoare la trecerea curentului electric. Materialele cu aceste proprietăți sunt utilizate în construcția rezistoarelor discrete bobinate (fixe sau variabile), a celor de precizie de mică putere, a celor din circuitele integrate hibride etc.

3. *Funcția de contactare – comutare* poate fi îndeplinită de materialele care au rezistivități de volum și de suprafață mici și stabile la coroziunea chimică și la arcul electric. Acestea sunt materialele pentru contacte electrice: *fixe* (aliaje de lipire a terminalelor componentelor electronice), *elastice* (conectori), *de rupere* sau cele ale releelor bimetalice.

4. *Funcția de memorare logică* se bazează pe efectul Josephson și pe proprietățile stării de supraconductibilitate. Materialele cu această funcție sunt utilizate pentru dispozitive logice și de memorare foarte rapide.

5. *Funcția de traductor termoelectric* se bazează pe efectul termoelectric ce apare în metale. Materialele în care acest efect este puternic pot fi utilizate în construcția traductoarelor de temperatură (termocuple).

6. *Funcția de traductor mecanoelectric* poate fi îndeplinită de materialele la care rezistivitatea de volum variază cu tensiunea mecanică aplicată. Aceste materiale sunt utilizate pentru traductoare de energie mecanică în energie electrică (mărci tensometrice).

Se vor prezenta mai pe larg proprietățile și domeniile de utilizare ale materialelor conductoare metalice care îndeplinesc primele patru funcțiuni.

4.4.2. Clasificarea materialelor conductoare

Materialele conductoare metalice au domenii largi de utilizare atât ca elemente chimice pure cât și sub formă de combinații, în funcție de cerințele tehnice care se impun. În funcție de proprietăți și utilizări ele se pot clasifica în:

- materiale de mare conductivitate;
- materiale de mare rezistivitate;
- materiale pentru contacte electrice;
- materiale pentru termobimetale;
- materiale pentru termocupluri;
- materiale pentru siguranțe fuzibile;
- materiale pentru mărci tensometrice.

4.4.2.1. Materiale de mare conductivitate

Materialele de mare conductivitate îndeplinesc funcția de conducție a curentului electric opunând o rezistență mică sau neglijabilă la trecerea curentului electric prin ele. Aceste materiale sunt în special metale pure dar și unele aliaje ale lor. Pentru a putea fi utilizat ca și conductor electric materialul trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să aibă rezistivitatea electrică foarte mică;
- efectul pelicular să fie neglijabil;
- densitatea maximă de curent admisibilă să fie cât mai mare;
- să aibă conductivitate termică mare;
- proprietățile mecanice să fie bune: rezistență mecanică mare, elasticitate ridicată etc;
- să se poată prelucra ușor prin laminare, trefilare și să se lipească și să se sudeze ușor;
- să prezinte rezistență mare la coroziune.

Principalele materiale conductoare sunt: Ag, Cu, Au, Al și Fe, din care Au și Ag, fiind metale prețioase, se utilizează mai rar.

În tabelul 4.3 sunt date valorile conductivității electrice a metalelor utilizate ca și materiale conductoare.

Tabelul 4.3

Valorile conductivității principalelor materiale conductoare

Metalul	Ag	Cu	Au	Al	W	Zn	Ni	Fe	Cr	Pb	Mn
$\sigma \cdot 10^7$, S/m	6,21	5,8	4,55	3,65	1,89	1,69	1,43	1,02	0,78	0,48	0,072
$\rho \cdot 10^{-8}$, Ωm	1,61	1,72	2,20	2,74	5,30	5,92	7,0	9,8	12,9	21,0	139

a) Cuprul și aliajele sale

Din punctul de vedere al conductivității cuprul urmează imediat după argint și prezentând proprietăți termice și mecanice bune este metalul folosit cu precădere în industria electrotehnică, sub formă de cupru electrolitic de mare puritate (99,6...99,9%) și ca element de aliere.

Se obține pe cale termică (prin reducere) din minereuri oxidice (cuprita, azurita, malachita) sau sulfuroase (calcopirita, calcozina, bornita). Cuprul obținut, de 94...97% puritate, nu este corespunzător pentru utilizările din industria electrotehnică și pentru a-l aduce la puritatea dorită este supus unei rafinări electrolitice obținându-se cuprul electrolitic CuE, de mare puritate (99,95%) și cu o structură cristalină

perfectă. Din acest cupru moale, prin prelucrare mecanică (ecruisare), se poate obține cuprul tare.

Caracteristicile electrice și mecanice ale cuprului depind de gradul de puritate și de starea materialului (recopt, ecruisat etc).

Cuprul conține, în general, următoarele impurități: O₂, Bi, S, P, Pb, As. Conductivitatea lui scade pronunțat în prezența P, Si, Fe, As, Be, Al în timp ce impurități ca Zn, Cd, Ag au o influență mai mică. Oxigenul, bismutul și sulful sunt impuritățile periculoase pentru el. *Oxigenul* are o mare afinitate pentru cupru, în special în stare lichidă. Prezența sa provoacă crăpături la prelucrarea la cald într-un mediu reducător (H₂, CO, CH₄). Aceste gaze pătrund, la temperaturi înalte, în cuprul solid și reacționează cu O₂ formând fie vapori de apă, fie CO₂, gaze insolubile în cupru care, la ieșirea din cupru produc fisuri foarte fine, transformate în crăpături la prelucrarea metalului. Fenomenul se numește *boala de hidrogen a cuprului*. Pentru a o evita se recomandă utilizarea cuprului dezoxidat. *Bismutul* este singurul element complet insolubil în cupru - având tendința de separare de fază - și formează la solidificare pelicule subțiri și ușor fuzibile în jurul grăunților, mărinđ fragilitatea cuprului (un procent de 0,002% Bi duce la compromiterea șarjei). *Sulful* atacă suprafața cuprului formând sulfuri de cupru care sunt permeabile pentru sulf.

Proprietățile cuprului. Cuprul are următoarele proprietăți: rezistivitate mică, rezistență mecanică suficient de mare, rezistență la coroziune satisfăcătoare, chiar și în ceea ce privește oxidarea la temperaturi înalte, precum și în ceea ce privește coroziunea electrochimică; este maleabil și ductil putând fi laminat în table și benzi și tras în fire până la grosimi și diametre de ordinul sutimilor de milimetru. Rezistivitatea sa electrică este cea mai mică, după argint, $\rho = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$ ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 S/m$) și variază cu temperatura $\alpha_{\rho} = 3,93 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. Densitatea masică este de 8960 Kg/m³ și temperatura de topire este ridicată 1083⁰C iar rezistența de rupere este 200...250 MN/m² la cuprul moale și de 400...490 MN/m² la cuprul tare. Conductivitatea termică a cuprului este ridicată ($\lambda = 393,3 W/mK$ la cuprul monocristalin) și dependentă de gradul de cristalinitate și de temperatură.

Având potențial de electrod standard pozitiv (+0,345 V) este protejat față de metalele uzuale cu care vine în contact (Fe, Al, Zn), ale căror potențiale sunt negative.

Cuprul este atacat - la temperaturi normale - de oxigen, oxizi de azot, amoniac, azot, sulful din cauciucul vulcanizat, acidul sulfuric concentrat și de clor la temperaturi ridicate. Grăsimile și uleiurile îl atacă în special în prezența oxigenului.

În electrotehnică cuprul este utilizat pentru:

- conductoare de bobinaj (cuprul moale);
- linii electrice de transport (cupru semitare);
- colectoare de mașini electrice,
- conectori, contacte, piese conductoare etc;
- acoperiri de piese ceramice;

-fabricarea unor materiale semiconductoare (Cu_2O), a aliajelor magnetice sau a celor de mare rezistivitate.

Cuprul prezintă și dezavantaje: este deficitar (fiind înlocuit cu aluminiul acolo unde este posibil sau cu aliajele sale), are rezistența mecanică relativ redusă, duritatea și elasticitatea sunt mici și se prelucrează greu prin așchiere. Aliajele cuprului, *alamele* sau *bronzurile*, au proprietăți mecanice mai bune, rezistență mai mare la coroziune și se pot prelucra mecanic prin așchiere.

Alamele sunt aliaje Cu - Zn care conțin peste 50% cupru. Proprietățile lor mecanice sunt superioare proprietăților cuprului, rezistența la coroziune este mai bună dar conductivitatea electrică este mai redusă; toate aceste proprietăți variază mult cu procentul de aliere. Dacă conținutul de cupru depășește 70% aliajul binar cupru - zinc este cunoscut sub denumirea de tombac care poate fi galben (70-72%Cu) sau roșu (80-90%Cu). Alamele pot fi prelucrate mecanic, așchiate, strunjite, laminate la cald și la rece, ștanțate. Ele au multiple utilizări în industria electrotehnică ca: piese nemagnetice, inele colectoare pentru mașini electrice, piese turnate (borne, palete de turbine etc), șuruburi, șaibe, piese arcuite etc.

Bronzurile sunt aliaje ale cuprului cu alte elemente: Mn, Sn, Cr, Be, Cd, Al, P etc, caracterizate prin duritate mare (dependentă de gradul de deformare plastică) și rezistență mare la coroziune. Sunt utilizate ca materiale de arc și materiale pentru contacte electrice. Cele cu cadmiu sau beriliu au o rezistență de rupere mare și o conductivitate satisfăcătoare, fiind utilizate la fabricarea conductorilor trași: linii de troleibuz, lamele de colector, contacte de întrerupătoare etc.

b) Aluminiul și aliajele sale

Aluminiul, ca și cuprul, este mult utilizat în industria electrotehnică datorită faptului că este mult mai ușor și mai ieftin decât cuprul deși conductivitățile electrică și termică sunt ceva mai mari și rezistența mecanică, prelucrabilitatea și rezistența la coroziunea electrochimică sunt inferioare celor ale cuprului. Se extrage din minereuri (bauxita, criolita) prin rafinare electrolitică și topire zonală obținându-se pentru utilizările electrotehnice un aluminiu de înaltă puritate (99,9%). Rezistivitatea electrică are valoarea $\rho = 2,74 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ ($\sigma = 3,65 \cdot 10^7 \text{S/m}$) iar coeficientul ei de variație cu temperatura este mare $\alpha_\rho = 4 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Are densitatea masică de 2700Kg/m^3 , temperatura de topire 658°C și rezistența la rupere $70 \dots 110 \text{MN/m}^2$ la aluminiul moale (recopt) și $150 \dots 250 \text{MN/m}^2$ la aluminiul tare (tras la rece) și este foarte maleabil și ductil. Rezistența lui la coroziune este ridicată datorită faptului că oxidul de aluminiu Al_2O_3 care acoperă suprafața sa este protector. Aluminiul rezistă la acțiunea apei, a substanțelor organice, a soluțiilor amoniacale, dar este atacat de clor, halogenuri, apă de mare și acizi organici. Având potențial de electrod negativ și mare ($-1,6\text{V}$) este distrus în contact cu metalele tehnice; de aceea clemele de legătură între conductoare din Cu și Al sunt de tip special.

În cazul a două conductoare de aceeași lungime și aceeași rezistență electrică raportul secțiunilor este de $S_{\text{Al}}/S_{\text{Cu}} = 1,62$ sau, în cazul secțiunii circulare $\Phi_{\text{Al}}/\Phi_{\text{Cu}} = 1,27$ și raportul greutateilor $G_{\text{Cu}}/G_{\text{Al}} = 2,03$.

Utilizarea aluminiului ca și conductor la liniile electrice aeriene (LEA) prezintă avantaje economice datorită greutateii de 2,03 ori mai mici - decât în cazul utilizării cuprului - (la stâlpi, fundație, izolatori) iar creșterea diametrului de 1,27 ori duce la creșterea tensiunii critice de apariție a fenomenului corona.

În electrotehnică aluminiul este utilizat pentru:

- conductoare de bobinaj;
- armături de condensatoare;
- carcase la mașini electrice, piese masive, șasiuri etc;
- fabricarea unor materiale semiconductoare, a aliajelor magnetice sau a celor conductoare de mare rezistivitate.

Principalele aliaje ale aluminiului, cu utilizări în electrotehnică, sunt.

-*duraluminiul* (Al+4%Cu+0,5%Mn+0,5%Mg) care prezintă proprietăți mecanice mai bune decât aluminiul dar rezistența la coroziune este mai mică și se utilizează protejat cu un strat de aluminiu pur;

-*siluminiu* (Al+10...13% Si) este utilizat pentru turnarea unor piese sau carcase cu forme geometrice complicate având coeficient de contracție la turnare foarte mic și rezistență la coroziune mărită;

-*alduro* (Al+0,7%Mg+0,6%Si+0,25%Fe), cunoscut și sub denumirea de Aldrey, se utilizează în construcția conductoarelor aeriene pentru transportul energiei electrice pentru că are conductivitatea electrică destul de bună și rezistența mecanică ridicată.

c) *Fierul*

Fierul, deși are o rezistivitate electrică ridicată ($\rho = 9,8 \cdot 10^{-8} \Omega m$) este utilizat, în anumite cazuri, în locul cuprului sau aluminiului, pentru fabricarea conductoarelor liniilor electrice de distribuție datorită prețului de cost mult mai redus, rezistenței mecanice superioare și prelucrabilității foarte bune.

Proprietățile mecanice, electrice și termice ale fierului depind foarte mult de procentul de aliere cu carbon sau de procentul de impurități conținute, în special Si, P, Al etc. Prezintă dezavantajul că oxidul de fier este permeabil și deci, fierul se corodează ușor și se distruge în timp.

Utilizările fierului sunt:

-conductoare pentru linii de distribuție de mică putere (telefonie, telegrafie cu fir, electrificări rurale etc);

-conductoare pentru linii electrice aeriene (LEA) care trebuie să suporte sarcini mecanice mari;

-contacte glisante în tracțiunea electrică, poduri rulante etc;

-în construcția prizelor de pământ și a centurilor de împământare;

-ca miez al conductoarelor bimetalice Fe - Al;

-în construcția conductoarelor oțel - cupru pentru înaltă frecvență.

Fierul tehnic de tip armco este utilizat de preferință pentru liniile de curent continuu iar oțelul cu 0,1...0,15% C și cu $\rho = 13 \cdot 10^{-8} \Omega m$ este utilizat în curent alternativ deoarece având rezistivitate mai mare prezintă un efect pelicular mai slab.

d) *Alte materiale de mare conductivitate*

Alte metale utilizate ca materiale conductoare sunt.

-argintul (foarte bun conductor) utilizat pentru siguranțele fuzibile;

-zincul utilizat ca electrod negativ la baterii (având potențial electrochimic foarte negativ), la fabricarea condensatoarelor și pentru acoperirea anticorozivă a oțelului;

-plumbul este un metal cu densitate masivă foarte mare, foarte maleabil și se utilizează numai sub formă de aliaj cu cuprul pentru creșterea rezistenței la rupere. Este utilizat ca strat de protecție în instalații de înaltă frecvență (Röntgen, surse radioactive), la fabricarea acumulatorilor, a aliajelor de lipire, a celor pentru fuzibilele siguranțelor de mare putere de rupere, ca manta de cablu la cablurile subterane, pentru protecția împotriva pătrunderii umezelii.

-staniul (cositorul) are temperatura de topire scăzută (232°C) și este utilizat la fabricarea aliajelor de lipit;

-wolframul și molibdenul sunt metale care rezistă bine la temperaturi foarte ridicate ($\sim 2500^{\circ}\text{C}$) și sunt utilizate ca electrozi în tuburi electronice, filamente pentru lămpi cu incandescență, electrozi de sudură .

4.4.2.2. Materiale de mare rezistivitate

Materialele de mare rezistivitate opun o rezistență mare la trecerea curentului electric și îndeplinesc astfel funcția de control și limitare a curentului electric. Ele trebuie să prezinte următoarele caracteristici:

-rezistivitate electrică cât mai mare, pentru a obține valori ridicate ale rezistenței electrice cu un volum cât mai redus de material;

-coeficient de temperatură al rezistivității α_{ρ} cât mai redus pentru ca influența temperaturii asupra rezistenței electrice să fie cât mai mică;

-tensiunea termoelectromotoare (t.t.e.m) față de cupru ε_{Cu} să fie cât mai mică, în special la materialele utilizate la fabricarea șunturilor, pentru ca să nu apară t.t.e.m la contactul șunt - conductor de legătură, tensiuni ce ar duce la modificarea indicațiilor aparatului de măsură;

-proprietăți electrice și mecanice stabile în timp;

-stabilitatea proprietăților cu temperatura până la temperaturi ridicate: $200\dots 250^{\circ}\text{C}$ pentru materialele utilizate în construcția reostatelor și $1000\dots 1500^{\circ}\text{C}$ pentru rezistențele de încălzire.

Condițiile enumerate nu pot fi îndeplinite de metalele pure care au ρ mic și α_ρ mare. Creșterea rezistivității se obține prin impurificarea controlată a metalelor pure ceea ce duce și la scăderea lui α_ρ .

În funcție de utilizări materialele de mare rezistivitate pot fi:

- materiale pentru rezistențe de precizie și etalon;
- materiale pentru reostate;
- materiale pentru elemente de încălzire;
- materiale utilizate în construcția echipamentului electronic.

a. *Materialele pentru rezistențe de precizie și etalon, șunturi și rezistențe adiționale pentru aparate de măsură* sunt aliaje de tip soluție dezordonată din sistemele Cu - Mn, Cu - Ni și aliajele pe bază de metale prețioase: Pt, Au, Ag.

Manganinele sunt compuse din următoarele elemente: Cu, Mn, Ni, Al, Fe. Pentru stabilizarea proprietăților în timp se face un tratament termic (recoacere, răcire lentă și decapare). Proprietățile lor electrice și mecanice depind de % de Mn (cu creșterea % de Mn crește rezistivitatea și α_ρ iar rezistența mecanică și stabilitatea proprietăților în timp scad). Temperatura admisibilă de funcționare este de 60°C și se prelucrează ușor.

Manganina clasică (86%Cu+12%Mn+2%Ni) are următoarele caracteristici: $\rho = 43 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\alpha_\rho = (5 \dots 10) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ și $\epsilon_{Cu} = 1 \mu V / ^\circ C$.

Aliajele pe bază de metale prețioase (Au - Cr, Au - Co, Ag - Mn, Ag - Sn) au o mare stabilitate a proprietăților în timp, temperatura de funcționare mai mare decât a manganinei și α_ρ foarte mic și constant până la 500 °C dar au dezavantajul prețului de cost ridicat. *Aliajul Au+2%Cr* are $\rho = 33 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\alpha_\rho = 10^{-6} K^{-1}$ și $\epsilon_{Cu} = 7 \dots 8 \mu V / ^\circ C$ și *aliajul Ag+10%Mn+8%Sn* (după îmbătrânire la 175 °C) are proprietățile: $\rho = 50 \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\alpha_\rho = 0$ și $\epsilon_{Cu} = 0,5 \mu V / ^\circ C$.

b. *Materialele pentru reostate* sunt aliaje pe bază de Cu și Ni, eventual cu adaosuri de Zn, Fe, Al, aliaje care au proprietăți mai puțin stabile decât manganinele dar care sunt mult mai ieftine.

Constantanul este aliajul cel mai folosit în construcția reostatelor fiind compus din 60% cupru și 40% nichel (sau proporții apropiate). Poate fi utilizat până la temperaturi de 400...500 °C (pentru reostate sunt necesare temperaturi până la 260 °C). Încălzit la 900 °C în aer și răcit lent se acoperă cu un strat de oxid foarte aderent și compact care este și izolant electric, ceea ce permite utilizarea firelor de constantan bobinate pe un suport, spiră lângă spiră, în construcția reostatelor cu cursor.

Rezistivitatea $\rho=50 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ este suficientă pentru majoritatea regimurilor iar $\alpha_{\rho}=14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ este foarte mic și determină o rezistență invariabilă practic cu temperatura. Având $\varepsilon_{\text{Cu}}=40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ mare, el este recomandat în construcția termocuplelor.

*Nichelinel*e sunt aliaje Cu - Ni cu cel mult 35% Ni. Au o rezistivitate de $\rho = 43 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ și $\alpha_{\rho} = 16 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, proprietăți mai slabe decât ale constantanului dar sunt mai ieftine și se prelucreează mai ușor.

Neusilberul (aurul alb) este un aliaj de 65%Cu+15%Ni+20% Zn și are rezistivitatea $\rho = 30 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, $\alpha_{\rho} = 31 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$, rezistență mecanică scăzută însă stabilitatea termică la temperaturi scăzute este bună și prețul de cost este mai mic. Nu se oxidează, dar după încălzire la 300°C devine casant. Este utilizat ca material de mare rezistivitate dar și în construcția carcaselor.

Fonta turnată aliată cu siliciu și carbon are $\rho=(80...150) \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ și $\alpha_{\rho} = 0,001 \text{K}^{-1}$ și este utilizată pentru reostate de sarcină, la funcționarea în regim de șocuri de curent, unde este mai puțin importantă variația rezistenței cu temperatura (α_{ρ} este mare), fiind foarte ieftină.

Alte aliaje utilizate în construcția reostatelor sunt cele de Cu + Ni + Zn, cu 15% Ni, cunoscute sub denumirile comerciale de Alpaca, Mallechart, Reotan, toate având α_{ρ} mai mare decât al constantanului.

c. *Materialele pentru elemente de încălzire* trebuie să aibă, în special, o rezistență bună la oxidare și la temperaturi ridicate și coeficient de temperatură al rezistivității redus. Din această grupă fac parte metale pure, aliaje de tip constantan, aliaje pe bază de Ni, de Fe etc.

1. *Metalele tehnic pure* se utilizează în funcție de rezistența la oxidare sau la diferitele gaze din atmosferele industriale speciale, rezistență care depinde de stabilitatea, duritatea și structura produselor de corodare (oxizi etc). Ele prezintă dezavantajul unui α_{ρ} mare (0,004...0,007), rezistența elementelor de încălzire crescând de 2...4 ori la o temperatură de $300...500^{\circ}\text{C}$ și pentru menținerea unei temperaturi constante în cuptor sunt necesare dispozitive speciale de reglaj. Cele mai utilizate metale sunt: W, Mo, Ta, Nb.

Wolframul este un material dur, casant, greu prelucrabil și se oxidează la 500°C dacă nu se află în atmosferă protectoare (vid, gaze inerte). Se utilizează la fabricarea lămpilor cu incandescență, a tuburilor electronice, a rezistoarelor de încălzire a cuptoarelor electrice de topire și tratamente termice etc. *Molibdenul* are caracteristici asemănătoare cu

wolframul, se oxidează la peste 600 °C, este rezistent la acizi și este utilizat la fabricarea lămpilor cu incandescență, a tuburilor electronice, a electrozilor de sudură etc. *Tantalul* cu rezistență la coroziune foarte ridicată se utilizează în construcția cuptoarelor pentru temperaturi ridicate, a tuburilor electronice etc. *Niobiul* are rezistivitate mare ($\rho=1420 \cdot 10^{-8} \Omega m$) și este utilizat în construcția cuptoarelor, a filamentelor, a tuburilor electronice etc.

2. *Aliajele de tip constantan* (aliaje Cu - Ni) sunt utilizabile numai până la temperaturi de 400 ... 500 °C.

3. *Aliajele pe bază de nichel* - numite *nicromi* - sunt soluții solide ale nichelului cu cromul (acesta poate fi introdus în cantitate suficientă pentru creșterea domeniului temperaturilor de lucru, a rezistenței la căldură, a rezistivității electrice și pentru scăderea coeficientului de temperatură al rezistivității). Pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice și scăderea prețului de cost o parte din crom este înlocuită cu fier, aliajele Fe - Ni - Cr poartă numele de *feronicromi*. Se utilizează la fabricarea elementelor de încălzire, a aparatelor electrocasnice etc. Au $\rho=(105...115) \cdot 10^{-8} \Omega m$, $\alpha_{\rho} = (0,2...0,9) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ și $t_{max} = 1000...1280^{\circ}C$.

4. *Aliajele pe bază de fier* sunt mult mai ieftine decât cele pe bază de nichel. Adăsurile de Cr, Ni, Al și Si cresc rezistivitatea, iar cele de Cu, Mn, sau Co le micșorează coeficientul de temperatură al rezistivității. În general, aceste aliaje prezintă variații mari ale rezistivității cu temperatura ($\alpha_{\rho} = 10^{-4} K^{-1}$) și o înrăutățire a proprietăților mecanice la temperaturi ridicate. Cele cu conținut redus de crom (*feronichel*: 0,5% Cr, *fecralul*: 15% Cr) au temperaturi de utilizare mai reduse (600°C, respectiv 875°C) dar se pot prelucra ușor. Cele cu conținut mai mare de crom (*kanthal*: 21% Cr, *cromal*: 30% Cr, *aliaj Kornilov*: 65...67% Cr) au temperaturile maxime de funcționare ridicate (1250, 1300 respectiv, 1500°C) și sunt utilizate în construcția aparatelor electrocasnice și la cuptoarele pentru tratamente termice.

Pentru încălzirea cuptoarelor electrice (în metalurgie, chimie etc) se utilizează și *silitele*. Acestea sunt produse din SiC care suportă sarcini mai ridicate decât aliajele amintite, dar rezistivitatea lor variază mult cu temperatura și ele prezintă fenomenul de îmbătrânire.

d. În construcția echipamentului electronic sunt necesare deseori rezistoare electrice cu valori foarte ridicate ($>1\text{M}\Omega$) comparativ cu posibilitățile de realizare utilizând metalele tehnice și aliajele acestora. În echipamentele electronice se utilizează pe lângă rezistoarele bobinate alte două tipuri de rezistoare, distincte prin tehnologia de fabricație, și anume: rezistoare peliculare și de volum (fig. 4.10).

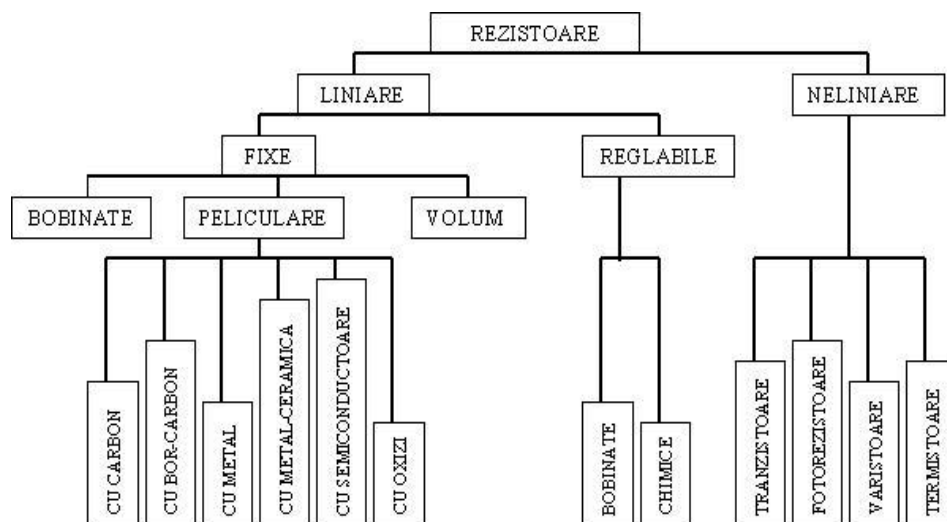


Fig. 4.10 Clasificarea rezistoarelor utilizate în industria electronică după tehnologia de obținere și materialul utilizat

Rezistoarele peliculare se realizează prin depunerea unei pelicule rezistive din carbon aglomerat, carbon cristalin, bor - carbon, metal sau oxizi metalici pe un suport ceramic sau din sticlă. Rezistoarele obținute prin această tehnologie au puteri disipative de până la 2 W, precizie destul de mare dar coeficientul de stabilitate termică este mic: $-2,5 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$.

Rezistoarele de volum sunt formate din carbon, sub formă de grafit sau negru de fum, în adaos cu material izolant de umplură (bioxid de titan, bioxid de zirconiu, talc, mică presată etc), în proporție de 50...55%. La aceste rezistoare puterea nominală nu poate depăși 10 W, toleranțele valorilor nominale ale rezistențelor sunt de $\pm 10\%$ și coeficientul de temperatură este de ordinul $(2...3) \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Au marele dezavantaj că tensiunea electromotoare de zgomot - puternic dependentă de frecvență - are valoare mare.

4.4.2.3. Materiale pentru contacte electrice

Alegerea materialelor pentru confecționarea contactelor electrice este deosebit de dificilă atunci când se iau în considerare toți factorii ce intervin în procesul de funcționare al acestora: natura circuitului, frecvența curentului, tipul și frecvența acționărilor, viteza de acționare, mediul ambiant, existența solicitărilor mecanice și termice, siguranța în funcționare etc. Materialele din această categorie îndeplinesc funcția de contactare - comutare și trebuie să aibă următoarele proprietăți:

-rezistivitate electrică foarte mică, pentru ca rezistența de contact să fie cât mai redusă;

-rezistență mare la coroziune, eroziune și sudare, stabilitate mare la oxidări iar în cazul formării peliculelor de oxizi superficiali aceștia să aibă conductivitățile electrice și termice apropiate de cele ale metalului de bază;

-temperatură de topire ridicată, pentru a nu se forma arc la întreruperea contactului;

-proprietăți elastice bune și duritate mare pentru a rezista la un număr mare de deconectări (uzură mecanică redusă);

-să fie ușor prelucrabile.

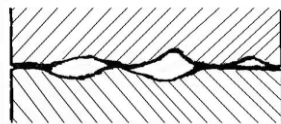


Fig. 4.11 Referitoare la punctele de contact

Rezistența de contact ($R = kp^{-n}$) depinde de presiunea de contact p precum și de conductivitatea electrică și rezistența la compresiune a materialelor care formează contactul. Coeficientul n , cu valori între 0,5 și 1, depinde de numărul de puncte în contact între cele două piese (fig. 4.11), număr dependent la rândul lui de gradul de curățenie, de șlefuire a suprafețelor de contact, de duritatea materialului etc. Deoarece materialele moi se deformează mai ușor, piesele în contact din materiale dure se acoperă cu staniu sau cadmiu. *Coroziunea* este acțiunea chimică sau electrochimică exercitată la suprafața corpurilor de către aer, umezeală sau unele substanțe chimice. Coroziunea contactelor se manifestă îndeosebi prin oxidarea contactelor (cu formarea unor pelicule de oxid de mare rezistivitate) sau prin reacții chimice ale acestora cu impuritățile din mediul ambiant (activate de temperaturile ridicate pe care le produce arc electric). *Eroziunea* sau *uzura electrică* se manifestă în special în curent continuu și constă într-un transport de material topit dinspre o piesă de contact spre cealaltă. *Sudarea* apare

îndeosebi la contactele de curent continuu formate din metale nobile pure: ele rămân lipite atunci când curentul electric depășește o valoare limită. *Uzura mecanică* apare ca urmare a frecărilor dintre piesele de contact și are ca rezultat creșterea rezistenței de contact. Aceste fenomene nu sunt întotdeauna prezente, în totalitate, în timpul funcționării contactelor și de aceea la alegerea materialelor se ține seama de condițiile reale în care funcționează contactul.

Contactul electric este legătura care trebuie realizată între diversele părți componente ale unei instalații, mașini sau aparat electric. După poziția și modul de lucru contactele pot fi grupate în:

-*contacte fixe*, care asigură o legătură permanentă. Ele pot fi *de strângere* (între cleme și conductoare sau între două conductoare, realizate prin șuruburi, nituri, manșoane) sau *masive* (între două conductoare prin lipire sau sudare);

-*contacte de rupere*, care servesc la deschiderea și închiderea periodică a circuitelor electrice (contactoare, întrerupătoare, rele etc). Se caracterizează prin puterea de rupere, tensiunea și curentul nominal și sunt contacte de *mică, medie sau mare putere de rupere*.

-*contacte glisante (alunecătoare)* sau *contacte mobile*, în care părțile în contact alunecă una pe alta (periile cu colectorul sau cu inelele de contact, troleul și firul de troleu în tracțiunea electrică etc).

1. *Materialele pentru contacte fixe* mai des utilizate sunt: cuprul și argintul - pentru contacte de strângere - sau cuprul și aluminiul - pentru contacte masive. *Argintul* prezintă avantajul că stratul de oxid cu care se acoperă în atmosferă normală este foarte subțire, neizolant și protector împotriva coroziunii. La *cupru* oxidul este izolant și grosimea sa crește în timp. Din acest motiv, contactele de cupru se acoperă cu Ag sau Sn. Se mai utilizează și: Al, Zn, Fe, Au, oțelul (în atmosfere uscate), Pt, In, Mo. Pentru a le proteja împotriva coroziunii contactele de strângere se acoperă cu lacuri, emailuri, vaseline sau se înglobează în compounduri (de obicei epoxidice).

Contactele masive se realizează din Cu sau Al prin lipire sau sudare. Rezistența de contact depinde de natura aliajului de lipire sau sudare și nu de presiunea de contact ca în cazul contactelor de strângere. Aliajele de lipire sunt aliaje cu temperatura de topire scăzută pentru a se topi înaintea metalelor pe care le lipesc și pentru ca, difuzând în ele, să formeze un strat intermediar care - după răcire - să aibă conductivitate

electrică și rezistență mecanică satisfăcătoare. În funcție de caracteristicile mecanice ele se împart în:

- aliaje de lipit moi, cu $T_t < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $\sigma_r = 50 \dots 70\text{ MN/m}^2$;
- aliaje de lipit tari, cu $T_t > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $\sigma_r = 500\text{ MN/m}^2$.

Conductoarele din cupru sau alamă se lipesc cu aliaje Sn - Pb (simbol Lp 37, Lp 40, Lp 50, Lp 60 unde Sn este în procent de 37, 40, 50 respectiv 60%, restul fiind Pb și mici adaosuri de Sb, Cu, Fe, Al, Zn); pentru capetele de bobine ale mașinilor electrice se utilizează însă aliaje de lipit tari pe bază de Zn - Cu sau Cu - Ag cu adaosuri de Cd. Pentru lipirea conductoarelor de aluminiu se utilizează aliajele Sn - Cd - Zn (40%Sn+20%Cd+25%Zn+15%Al) pentru lipiri moi și aliaje Al - Si (86%Al+10%Si+4%Cu) pentru lipiri tari.

2. *Materialele pentru contacte de rupere* sunt materiale cu proprietăți speciale, elementele contactelor fiind supuse unor solicitări complexe de: eroziune, coroziune, uzură mecanică etc.

Contactele electrice de mică putere de rupere se realizează din aliaje ale metalelor nobile (Au - Ag, Au - Pt, Pt - Ir, Pt - Ag etc) sau ale metalelor nobile cu alte metale (Ag - Ni, Cu - Au, Ni - Pt, Ag - Cu) precum și aliaje pe bază de W, Mo etc. Nu se pot utiliza metale nobile pure deoarece acestea prezintă pericolul de sudare al contactelor, au rezistență redusă la eroziune, uzură mecanică mare deși au rezistivitate mică și rezistență la coroziune mare.

Contactele de medie putere de rupere se realizează din Cu, Ag, W, Cd precum și din combinații ale acestora (alame, bronzuri, Cu - Ag, Ag - Cd etc) obținute prin procedee clasice de aliere sau prin sinterizare. Se mai utilizează bimetalele: Cu sau Al cu Ag, Pt, Pd etc laminate împreună.

Contactele electrice de mare putere de rupere sunt de joasă tensiune (120...500V) și curenți intenși (100...3000A) sau de înaltă tensiune (6...1000kV). Materialele utilizate în acest caz sunt materiale sinterizate obținute din pulberi de materiale (care nu se aliază) supuse la presiuni mari și temperaturi ridicate (65...70% din temperatura de topire a metalului mai greu fuzibil) și se aplică sub formă de plăcuțe pe piesele de contact. Cele mai utilizate sunt combinațiile Cu - W, Cu - Ni, Cu - Cr, Ag - Cd, Ag - CdO. *Combinațiile Ag - Cd, Ag - CdO* au conductivitate electrică și termică mare și rezistență de contact mică chiar la presiuni reduse. La temperatura arcului electric ($\approx 900^{\circ}\text{C}$) oxidul de cadmiu se descompune, gazele rezultate (O_2 și vapori de cadmiu) împiedicând

dezvoltarea arcului electric. *Combinările Cu - W* au conductivitatea electrică mare, duritate și temperatură de topire ridicate și se utilizează pentru contacte cu presiuni de contact mari și care funcționează în ulei.

Funcționarea corespunzătoare a contactelor depinde și de materialul suportului de contact care trebuie să aibă conductivitatea electrică și termică ridicată, temperatură de topire mare, proprietăți anticorozive bune și să fie elastic. Se utilizează: cuprul, fierul, nichelul și aliajele lor.

3. *Materialele pentru contacte glisante (alunecătoare)* sunt solicitate atât mecanic cât și la coroziune și arc electric. Contacte glisante apar între perii și colector sau inelele colectoare, între troleu și firul de troleu, la anumite tipuri de întrerupătoare etc.

Lamelele de colector se realizează din Ag, Cu electrolitic tare, bronzuri cu Cd și Be etc; *inelele de contact* din bronzuri, alame, oțel etc, iar *firele de troleu* din bronzuri cu Cd și Be. Pentru realizarea *periilor colectoare* ale mașinilor electrice materialul de bază este grafitul (cărbune grafitat, amestecuri de grafit cu cupru sau bronz etc).

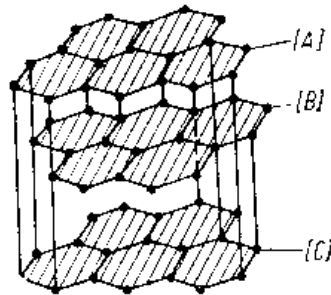


Fig. 4.12 Sistemul de cristalizare al grafitului

Grafitul cristalizează în sistemul hexagonal (fig. 4.12), distanțele dintre planele reticulare A și B fiind de 3,40 Å iar între doi atomi din același plan sunt de 1,42 Å. Din acest motiv, forțele de legătură între atomii din același plan sunt mult mai puternice decât cele dintre atomii care aparțin la două plane diferite, ceea ce are ca urmare, în timpul funcționării contactelor, desprinderea unor porțiuni mici sub formă de solzi care se deplasează

paralel cu planele A, B și care umplu microgolurile suprafeței de contact, dând naștere unor suprafețe de alunecare netede. Aceste suprafețe au rezistență electrică de contact mică și constantă și uzură mecanică redusă. Grafitul mai are avantajul că nu se oxidează, are temperatura de topire ridicată (3000°C), tensiunea minimă de apariție a arcului electric mai mare decât cea a metalelor și eroziune redusă.

În funcție de structura lor fizico - chimică, periile se împart în trei grupe (tab. 4.4):

- perii tari (din pulbere de cocs sau cărbune de retortă);
- perii moi (din grafit natural sau electrografit);

-metalografitice (din grafit cu pulbere de bronz sau cupru).

Tabelul 4.4

Caracteristicile unor categorii de perii colectoare

Caracteristici	Perii moi	Perii tari	Perii metalografitice
Presiunea de contact pe colector, MN/m ²	15	20	30
Rezistivitatea electrică, μΩm	10 - 40	60	0,05 - 30
Densitatea de curent, A/cm ²	10	6 - 8	15 - 20
Viteza periferică, m/s	40 - 60	10 - 15	20 - 30

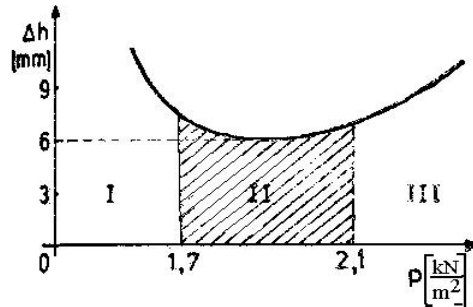


Fig. 4.13 Caracteristica uzură - presiune specifică pe perie pentru perii tip metal - grafit MGR

La alegerea sortului de perie pentru un anumit tip de mașină electrică se încearcă mai multe rețete de materiale deoarece pentru a avea o durată mare de funcționare a periei trebuie optimizate caracteristicile electrice și mecanice ale acesteia. Uzura ei implică și alegerea unui regim optim de lucru, astfel: la presiuni specifice prea mici (zona I din figura 4.13) apar uzuri electrice care scot din funcțiune, foarte repede, colectorul; la presiuni ridicate (zona a III- a) - apar uzuri mecanice mari; zona a II - a (zona hașurată) este zona optimă a presiunilor specifice pe perie pentru rețeta de material aleasă.

4.4.2.4. Materiale pentru termobimetale

Termobimetalele - ca și materialele pentru contacte electrice - îndeplinesc funcția de contactare - comutare. Ele au proprietatea de a transforma o variație de temperatură într-o mișcare datorită deformării. Se utilizează pe scară largă în construcția aparatelor electrice: la întrerupătoare automate, la protecția motoarelor electrice, protecția transformatoarelor, la relee de timp, regulatoare, termometre pentru lichide și gaze, termocompensatoare etc. Se realizează din două benzi subțiri de metale sau aliaje cu coeficienți de dilatare liniară diferiți, sudate pe întreaga lungime a lor (fig. 4.14).

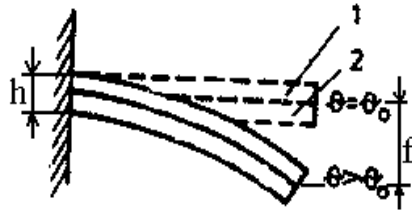


Fig. 4.14 Forma bimetalului nede-format și deformat: 1 - componenta activă; 2 - componenta pasivă

componenta activă.

Materialele pentru bimetale trebuie să satisfacă următoarele cerințe:

-materialele pentru componenta activă să aibă un coeficient de dilatare liniară cât mai mare $\alpha_l \geq 5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ pentru un domeniu cât mai larg de temperaturi;

-materialele pentru componenta pasivă să aibă un coeficient de dilatare liniară cât mai mic $\alpha_l \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ pentru un domeniu cât mai larg de temperaturi;

-componentele activă și pasivă să se poată suda împreună în bune condițiuni pentru a se deforma împreună, ceea ce impune ca materialele să aibă temperatură de topire ridicată ($>1000^\circ\text{C}$), modul de elasticitate mare ($> 10^5 \text{MN/m}^2$), coeficientul de temperatură al modulului de elasticitate mic și rezistențe mecanice mari și comparabile;

-să aibă căldura specifică și conductivitatea termică cât mai mari pentru ca termobimetalul să absoarbă o cantitate cât mai mare de căldură necesară deformării;

-pentru bimetalele cu încălzire electrică directă, materialele să aibă rezistivitatea cât mai mare.

Sensibilitatea termobimetalurilor (creșterea săgeții f când temperatura crește cu un grad Kelvin) este cu atât mai mare cu cât diferența dintre coeficienții de dilatare liniară $\alpha_{l1} - \alpha_{l2}$ lungimea termobimetalului, ℓ este mai mare și grosimea lui h mai mică. Ca materiale cu α_l mic se utilizează aliajele Ni - Fe cum este *invarul* (63,1% Fe + 36,1% Ni + 0,4% Mn + 0,4% Cu) care are $\alpha_l = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ iar componenta activă se realizează din Fe, Ni, Cu, constantan, alamă care au α_l între 10^{-5} și $2 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$.

La încălzire, una din componente se dilată mai puternic decât cealaltă și termobimetalul se încovoiaie cu atât mai mult cu cât este mai mare diferența dintre coeficienții de dilatare. Elementul cu coeficientul de dilatare mai mic este componenta pasivă iar cel cu coeficientul de dilatare mai mare este

4.4.5. Materiale pentru termocuple

Funcționarea termocuplurilor se bazează pe fenomenul termoelectric Seebeck care constă în apariția unui curent electric într-un circuit închis format din două metale sau aliaje diferite ale căror joncțiuni se află la temperaturi diferite (fig. 4.15).

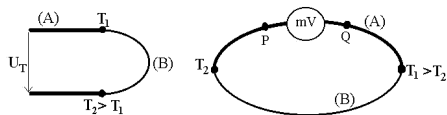


Fig. 4.15 Schema unui termocuplu

Considerând două metale diferite (A) și (B) și notând cu N_A , respectiv, N_B , concentrațiile electronilor în ele și cu T_1 și T_2 temperaturile celor două joncțiuni atunci diferența de potențial U_T ce apare, numită tensiune termoelectromotoare (t.t.e.m) este dată de relația:

$$U_T = (T_1 - T_2) \frac{k}{q_0} \ln \frac{N_A}{N_B} = k_T (T_1 - T_2) \quad (4.25)$$

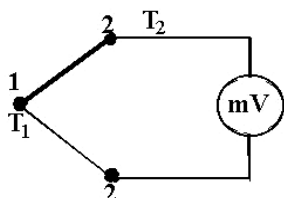


Fig. 4.16 Reprezentarea convențională a termocuplului

unde k este constanta lui Boltzman, q_0 - sarcina electronului și k_T - constanta termocuplului. Cunoscând temperatura T_2 și k_T (printr-o etalonare) se poate măsura temperatura T_1 corespunzătoare, de obicei, zonei calde. Termocuplul se obține, în principiu, prin deschiderea circuitului într-un punct și conectarea capetelor libere la un milivoltmetru care, după etalonare, este gradat direct în unități de temperatură. Acest lucru este posibil deoarece din legile efectului termoelectric rezultă că dacă între două puncte P, Q ale unui circuit temperatura este uniformă

atunci suma t.t.e.m. corespunzătoare întregului circuit este independentă de porțiunea PQ - fiind identică valoric cu tensiunea obținută când P și Q ar fi puse în contact. Deci între P și Q se poate conecta un voltmetru fără ca t.t.e.m. să fie afectată. Reprezentarea convențională a termocuplului este cea din figura 4.16. La utilizarea sa în practică se menține constantă temperatura T_2 (poate fi chiar nulă) astfel încât tensiunea măsurată de mV este funcție numai de temperatura punctului cald (1) introdus în incinta a cărei temperatură se măsoară.

Materialele utilizate pentru termocuple trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- t.t.e.m. să aibă valori mari;
- caracteristica $U_T = f(T_1)$ să fie liniară.

Dintre metale se utilizează Fe, Cu, Pt, Ag, Ni, Ir, W, Cr, Mo, Nb etc iar dintre aliaje: constantanul, copelul (56%Cu + 44%Ni), alumulul (95%Ni + 2%Al + 2%Mn + 1%Si), cromelul (90%Ni + 10%Cr), aliaje Pt - Rh (90%Pt + 10%Rh) etc.

Perechile de materiale (metale, aliaje) alese în practică depind de valoarea temperaturii ce urmează a fi măsurată:

- termocuplul Cu - constantan măsoară temperaturi între -250°C și 600°C ;
- termocuplul Fe - constantan măsoară temperaturi între -200°C și 1050°C ;
- termocuplul cromel - constantan și cel de cromel - alumul măsoară temperaturi între 0°C și 1100°C ;
- termocuplul Pt - (Pt - Rh) dă indicații precise până la 1400°C ;
- termocuplul W - Mo, Nb - Mo măsoară temperaturi până la 2000°C ;
- W - Rh, W - C măsoară temperaturi peste 2000°C .

4.4.6. Materiale pentru siguranțe fuzibile

Siguranțele fuzibile au rolul de a proteja instalațiile electrice împotriva efectelor termice și dinamice ale curenților de suprasarcină și scurtcircuit și înlocuiesc, în anumite condiții, întrerupătoarele - pentru curenți sub 630 A. Elementul de protecție, fuzibilul, format din unul sau mai multe fire sau lamele conductoare în paralel se montează în serie cu obiectul protejat.

Materialul pentru fuzibil trebuie să răspundă următoarelor cerințe:

- să aibă temperatura de topire cât mai scăzută; în ordinea temperaturilor de topire avem următorul șir: Ni (1460°C), Cu (1083°C), Ag (960°C), Al (658°C), Zn (419°C), Pb (327°C), Sn (231°C);
- să aibă densitate masică cât mai mică pentru ca masa de material să fie mică și deci timpul de acționare redus;
- să fie suficient de dur;
- să aibă preț de cost redus;
- temperatura de ionizare a vaporilor metalici să fie cât mai ridicată pentru ca stingerea vaporilor să se facă ușor; în ordinea

descrescătoare a temperaturilor de ionizare avem următorul șir: W, Zn, Cd, Ag, Cu, Pb, Mg, Ni, Sn, Al.

Nici unul din materialele utilizate nu îndeplinește toate aceste condiții, ele fiind utilizate în anumite domenii.

Argintul este utilizat în construcția fuzibilelor pentru curenți mici, deși are preț de cost ridicat, dar se prelucrează ușor, este aproape inoxidabil și degajă puțini vapori la topire.

Cuprul electrolitic este cel mai utilizat material pentru siguranțe fuzibile. Pentru valori mari ale curenților nominali lamelele de cupru se argintează pentru evitarea oxidării.

Plumbul deși are temperatura de topire scăzută, având însă densitate masică mare și fiind moale este utilizat numai pentru siguranțe de tensiune redusă.

Zincul având densitatea și rezistivitatea mari este puțin utilizat.

Aluminiul nu prea este utilizat pentru că formează oxizi solizi la temperatura de topire și are temperatură de ionizare scăzută.

4.4.7. Materiale pentru mărci tensometrice

Materialele pentru mărci tensometrice îndeplinesc funcția de traductor mecano - electric, prezentând o dependență a rezistivității electrice de deformarea mecanică. Marca tensometrică este astfel un traductor care transformă deformarea mecanică într-un semnal electric. Din punct de vedere constructiv marca tensometrică este un rezistor constituit din unul sau mai mulți conductori legați în serie, de diametre foarte mici (0,015...0,02 mm), având o rezistență de 50 ... 1000 Ω (fig. 4.17). Rezistorul este lipit pe un suport (hârtie sau material sintetic)

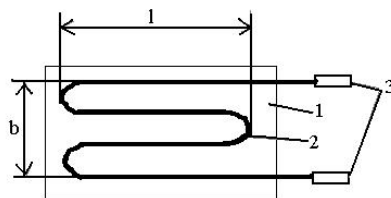


Fig. 4.17 Tip constructiv de marcă tensometrică: 1 - suport; 2 - rezistor electric; 3 - terminale

sau este înglobat în acesta. Traductorul lipit pe piesa supusă încercărilor mecanice urmărește fidel deformațiile acesteia și din această cauză rezistența sa electrică se modifică.

Pentru firul rezistiv cu rezistența:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (4.26)$$

unde ρ este rezistivitatea electrică, ℓ și S - lungimea, respectiv secțiunea firului, variația de rezistență este:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\ell}{\ell} - \frac{dS}{S}, \quad (4.27)$$

relație obținută prin logaritmare și derivare.

Pentru o variație finită a mărimilor, relația 4.27 devine.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta\ell}{\ell} - \frac{\Delta S}{S} \quad (4.28)$$

unde $\frac{\Delta\ell}{\ell} = \varepsilon$ este deformarea specifică, $\frac{\Delta S}{S} = -2\mu\varepsilon$, unde μ este

coeficientul lui Poisson și $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi E \varepsilon$ - pentru solicitarea monoaxială a firului rezistiv - π fiind coeficientul de piezorezistivitate și E modulul de elasticitate.

Deci:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi E)\varepsilon, \quad (4.29)$$

cu care se definește coeficientul de tensosensibilitate al firului:

$$k = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R} = 1 + 2\mu + \pi E \quad (4.30)$$

Acest coeficient depinde de materialul tensorezistiv dar și de modul de prelucrare termică și mecanică a lui.

Ca materiale pentru tensorezistențe se utilizează acele metale sau aliaje care satisfac următoarele cerințe:

-au o dependență liniară a rezistenței electrice de deformarea mecanică într-un domeniu cât mai larg;

-au coeficientul de tensosensibilitate mare;

-au rezistivitatea mare și coeficientul ei de variație cu temperatura mic;

-nu prezintă histerezis;

-au coeficientul de dilatare liniară apropiat de cel al materialului supus cercetării.

Nu sunt materiale care să satisfacă toate aceste cerințe.

Nichelul - are un coeficient de tensosensibilitate mare dar prezintă histerezis în modificarea rezistenței funcție de deformație.

Aliajul Cr - Ni are un coeficient de variație al rezistenței cu temperatura ridicat.

Constantanul îndeplinește aproape toate cerințele, cu excepția unei valori reduse pentru k ($k \cong 2$). Prin tratare termică de recoacere la 650°C timp de 3 ore se obține o creștere a acestui coeficient și a domeniului de liniaritate.