

# ALIAJE METALICE SUPRACONDUCTOARE

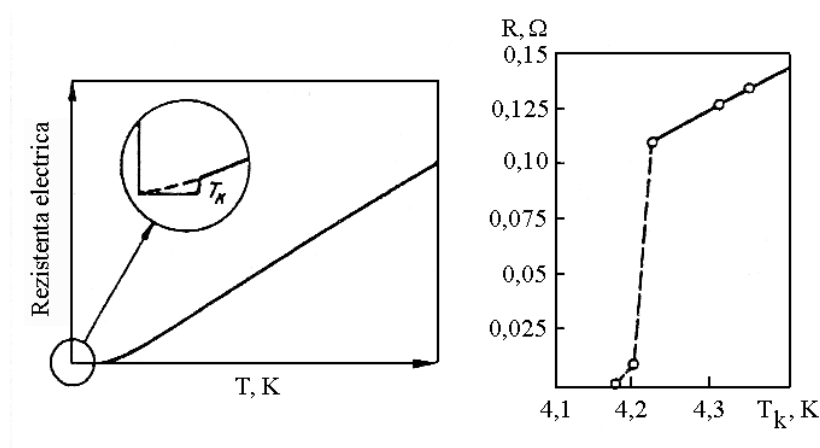
## *1 – Supraconductibilitatea*

Se stie ca rezistenta electrica a unui material scade monoton odata cu scaderea temperaturii. In jurul lui zero absolut multe metale si aliaje sufera o scadere brusca a rezistentei electrice, devenind supraconductoare - figura 31.

Supraconductibilitatea reprezinta capacitatea materialelor de a nu opune rezistenta curentului electric la temperaturi mai scazute decat temperatura lor critica –  $T_k$ . Acest fenomen a fost descoperit in 1911 de cercetatorul olandez Haike Kamerling-Onnes care studia disparitia rezistentei electrice a mercurului la temperatura de 4,2K - figura 32.

*Figura 31 - Influenta temperaturii asupra rezistentei electrice la materialele supraconductoare*

*Figura 32 - Efectul de supraconductibilitate a mercurului in experimentul lui Kamerling-Onnes (1911)*



La ora actuala, fenomenul de supraconductibilitate s-a pus in evidenta la majoritatea metalelor pure, fiind o stare care apare mult mai usor in metalele cu o conductibilitate scazuta. Se cunosc de asemenea in jur de 3000 de aliaje supraconductoare si compusi intermetalici, numarul acestora fiind in continua crestere. Metalele pure sunt considerate supraconductoare de ordinul I, iar aliajele si compusii chimici - supraconductoare de ordinul II.

Campul magnetic din volumul supraconductor este nul la temperaturi  $< T_k$ . Metalul devine diamagnetic - un material ce se incarca cu un moment magnetic in campul magnetic exterior, orientat impotriva campului de magnetizare. De aceea, la trecerea materialului in starea supraconductoare, campul magnetic exterior "iese" din volumul materialului si ramane

doar într-un strat subțire exterior de grosime  $\sim 10^{-8}$  m. Acest fenomen se numește efectul Meysner.

O dovadă a faptului că supraconductorul devine diamagnetic este și cunoscutul experiment de plutire liberă în aer a unui magnet permanent deasupra unei plăci de Pb supraconductoare. Acest experiment este denumit experimentul sicriului lui Mahomed deoarece, conform legendei, sicriul cu trupul neînsuflit al prorocului Mahomed plutea în aer fără nici o susținere.

Trecerea unui material în starea supraconductoare este legată de transformarea de fază. Noua stare fazică se caracterizează prin aceea că electronii liberi încetează să interacționeze cu ionii rețelei cristaline începând să interacționeze între ei. Electronii cu spini opuși se unesc în perechi rezultând un moment de spin nul.

Într-o stare obișnuită electronii se distribuie după impuritățile existente în metal sau după variațiile termice ale rețelei cristaline - fononii. Dispersia electronilor duce la apariția rezistivității electrice. Perechile de electroni cu spin nul nu se dispersează, deoarece energia fononilor pe care aceste perechi o pot primi în urma interacțiunii cu aceștia, sau cu defectele de rețea la temperaturi criogenice, este prea mică. Neîntâlnind dispersate, perechile de electroni cu spin nul se deplasează liber de-a lungul rețelei cristaline, ceea ce duce de fapt la apariția supraconductibilității.

Starea supraconductoare se poate distruge atât prin încălzirea materialului la o temperatură  $> T_k$ , cât și ca urmare a acțiunii unor câmpuri magnetice exterioare puternice ce depășesc o valoare critică  $H_k$ . Câmpul magnetic critic, ca și temperatura critică reprezintă caracteristica de bază a materialului supraconductor. Prin depășirea valorilor  $T_k$  sau  $H_k$  are loc revenirea bruscă a rezistenței electrice și câmpul magnetic pătrunde în metal.

Unul din avantajele supraconductorilor îl reprezintă posibilitatea atingerii unor densități de curent foarte mari. Cu cât este mai mare densitatea de curent, cu atât instalația este mai compactă, utilizarea de materiale supraconductoare scumpe este mai redusă și deci și masa de material ce trebuie răcită este mai mică.

## ***2 - Materiale supraconductoare și tehnologia lor de obținere***

Dintre toate metalele pure capabile să treacă în starea supraconductoare, temperatura critică cea mai ridicată de trecere la această stare o are niobiul - Nb ( $T_k = 9,2\text{K}$ ). În schimb niobiul prezintă valori scăzute ale câmpului magnetic critic ( $\sim 0,24$  Tesla) ceea ce împiedică largă sa

utilizare in acest sens. O imbinare fericita a parametrilor critici  $T_k$  si  $B_k$  o au aliajele si compusii intermetalici ai niobiului cu Zr, Ti, Sn, Ge. In tabelul 23 sunt indicati parametrii critici ai materialelor supraconductoare cu interes practic.

Aliajele si compusii pe baza de Nb trec in starea supraconductoare la temperaturi relativ ridicate. Acestia pot suporta campuri magnetice destul de puternice si se caracterizeaza printr-o densitate de curent inalta. In heliu lichid, pentru un camp exterior cu o inductie de 2,5 Tesla, densitatea critica a curentului este: pentru Nb-Zr  $\rightarrow 1 \text{ kA/mm}^2$ ; pentru Nb-Ti  $\rightarrow 2,5 \text{ kA/mm}^2$ ; pentru Nb<sub>3</sub>Sn  $\rightarrow 17 \text{ kA/mm}^2$ ; pentru V<sub>3</sub>Ga  $\rightarrow 5 \text{ kA/mm}^2$ ;

***Tabelul 23** - Parametrii critici pentru cateva materiale supraconductoare de interes practice*

<b>Material supraconductor</b>	<b>Parametru critic</b>	
	<b>T<sub>k</sub>, K</b>	<b>B<sub>k</sub> pentru T<sub>k</sub>=4,2K, [Tesla]</b>
Nb-Zr	9-11	7-9
Nb-Ni	8-10	9-13
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	22-25
Nb <sub>3</sub> Al <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	20,3-20,5	40
Nb <sub>3</sub> Ga	20,2	34
V <sub>3</sub> Ga	23,2	37
V <sub>3</sub> Si	14,5-15,0	21

Aliajul Nb-46,5%gr.Ti face parte din categoria celor mai raspandite materiale supraconductoare. Acest aliaj se caracterizeaza printr-o tehnologitate ridicata. Prin metodele obisnuite de turnare, prelucrare prin presiune, tratament termic se pot obtine cabluri, sarme, sine. Compusii intermetalici, desi prezinta parametri critici mai ridicati, sunt foarte fragili, fapt ce ingreuneaza prelucrarea acestora in cabluri lungi prin metodele traditionale metalurgice.

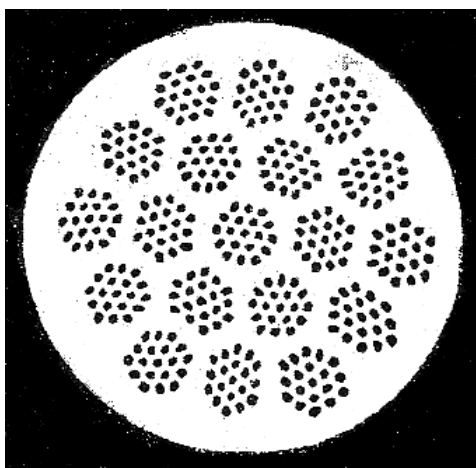
Pentru a obtine un cablu supraconductor, intr-o bara de cupru se practica o multitudine de orificii in care se introduc miezuri foarte mici de Nb- Ti. Bara se lamineaza in sarma subtire care este taiata in bucati scurte si din nou introduse in noi bare de cupru. Repetand de mai multe ori aceasta operatie, se obtine un cablu cu un numar foarte mare de intarsuri supraconductoare, cabluri din care se confectioneaza electromagnetii - figura 33.

Daca intr-un intars se distruge fenomenul de supraconductibilitate, conductibilitatea electrica si termica mare a matricei de cupru ofera posibilitatea unei stabilizari termice a supraconductorului intr-un regim subcritic.

Utilizarea compusilor intermetalici fragili ingreuneaza simtitor fabricarea cablurilor.

Pentru obtinerea acestora pe baza compusului supraconductor  $Nb_3Sn$  se utilizeaza asa numita tehnica a bronzului, bazata pe difuzia selectiva din faza solida. Fibre subtiri de niobiu plastic sunt presate intr-o matrice din bronz cu continut de 10 - 13% Sn. Dupa multiple trefilari si presari amintite, cu recoaceri intermediare si tratamente termice ulterioare, are loc difuzia staniului in niobiu si formarea la suprafata acestuia a unei pelicule subtiri de  $Nb_3Sn$ . Datorita unei solubilitati foarte scazute, cuprul practic nu difuzeaza in niobiu. Schema acestei tehnologii a bronzului este ilustrata in figura 34. Sarmele obtinute prin aceasta tehnica sunt suficient de plastice, putand fi impletite in cabluri, nedistrugandu-se peliculele de  $Nb_3Sn$ .

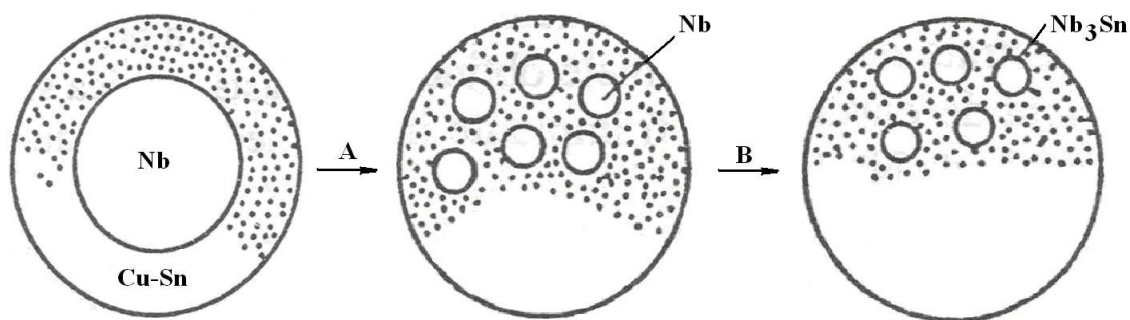
*Figura 33 - Sectiune transversala a unui compozit supraconductor cu 361 de intarsuri din Nb intr-o matrice de cupru*



Pentru obtinerea de benzi supraconductoare din compusi intermetalici se mai utilizeaza de asemenea si metoda precipitarii chimice din faza gazoasa. Aceasta metoda permite obtinerea prin sinteza a compusului  $Nb_3Ge$ , compus care prezinta o temperatura critica relativ ridicata de trecere la starea supraconductoare.

Supraconductorii pe baza solutiei solide Nb - Ti sunt recomandati ca materiale de baza pentru aceasta caracteristica, in campuri cu  $T_k = 4,2$  K si intensitati ale campului magnetic de pana la  $B_k = 8$  Tesla, datorita usurintei tehnologiei de obtinere, costului relativ scazut, cat si datorita unei imbinari fericite a proprietatilor electrice cu cele mecanice. Pentru campuri mult mai puternice, cand densitatea de curent scade simtitor, se utilizeaza compusii intermetalici de tipul  $Nb_3Sn$ .

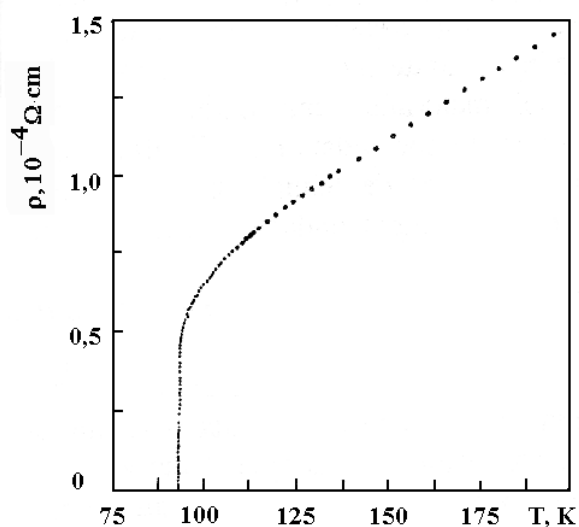
*Figura 34 - Schema tehnologiei bronzului de obtinere a cablurilor cu multiple intarsuri de  $Nb_3Sn$ : a) introducerea intarsului, trefilarea si recoacerea; b) tratamentul termic*



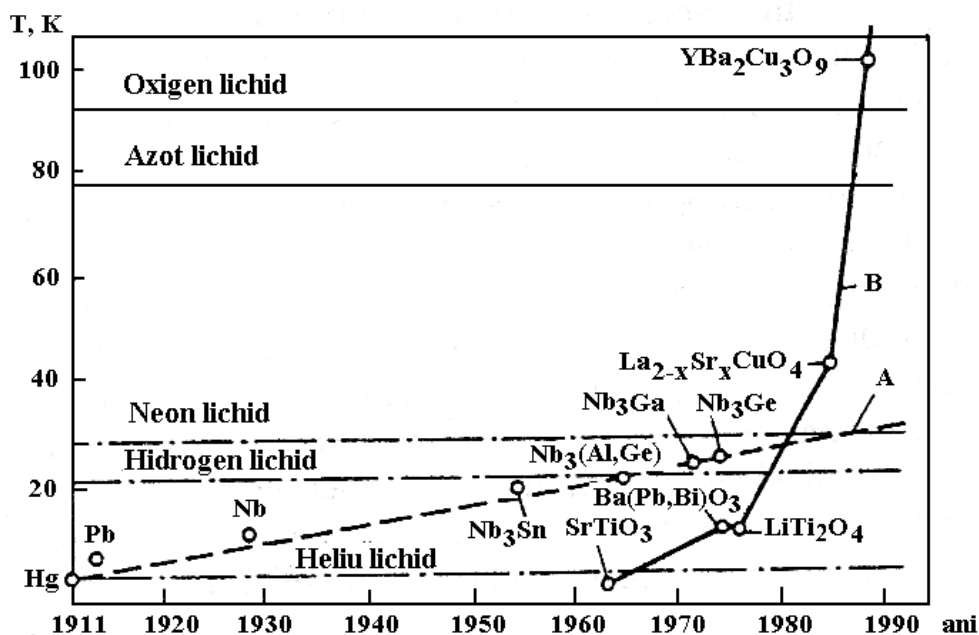
La sfarsitul anilor '80 a fost descoperita supraconductibilitatea de temperatura inalta a materialelor ceramice.

In 1986 fizicienii elvetieni G. Bednortz si K. Muller au obtinut pentru prima data probe din oxizi ceramici cu proprietati supraconductoare din sistemul La-Ba-Cu-O, avand temperatura de trecere la supraconductibilitate de  $T_k = 35$  K. Pentru aceasta descoperire, care a pus bazele cercetarii supraconductibilitatii la temperaturi inalte, acestia au primit in 1987 Premiul Nobel pentru fizica. Ulterior, in SUA, Japonia si Rusia, s-au obtinut ceramice supraconductoare cu ytriu din sistemul Y - Ba - Cu - O, avand o temperatura critica  $T_k$  apropiata de 90 K, material care a oferit posibilitatea utilizarii azotului lichid, cu mult mai ieftin ca agent de racire - figura 35.

*Figura 35 – Trecerea la supraconductibilitate a monocristalului  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  unde  $0 < x < 0,5$*



*Figura 36 – Dinamica obtinerii de materiale supraconductoare: A – materiale metalice; B – materiale ceramice;*



Ceramica pe baza de oxid de cupru cu oxizi de strontiu, bismut si elemente alcalino-pamantoase, cum ar fi de exemplu  $2\text{SrO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CuO}$ , prezinta o temperatura critica  $T_k$  si mai mare - pana la 100-115 K. In figura 36 se arata dinamica descoperirii materialelor supraconductoare.

La ora actuala, se cunosc deja o serie intreaga de materiale ceramice cu temperaturi critice  $T_k = 250$  K sau chiar egale cu temperatura camerei. Din pacate, dintre acestea, numeroase materiale sunt instabile si prezinta fragilitate mecanica ridicata.

Cautarea de noi materiale supraconductoare continua, desi aceasta problema ramane deocamdata pur stiintifica. In perspectiva, se pune problema elaborarii de tehnologii de fabricatie la scara industriala pentru utilizarea supraconductorilor de temperaturi inalte.

### **3 - Perspectivele utilizarii materialelor supraconductoare**

Domeniile cele mai importante de utilizare a supraconductorilor sunt cele pentru crearea de campuri magnetice puternice si cele care-si propun obtinerea si transmiterea energiei electrice.

Un solenoid din material supraconductor poate lucra nelimitat in timp, fara aport de energie din exterior, deoarece curentul odata indus in acesta nu mai dispare. Mentinerea

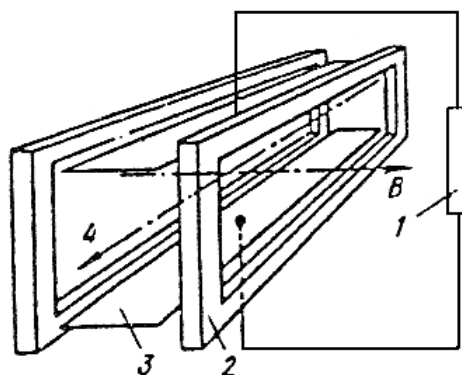
solenoidului in stare supraconductoare nu necesita cheltuieli energetice mari. Pentru o rezistivitate nula, problema conductibilitatii termice este rezolvata. In plus, magnetii supraconductori sunt mult mai compacti decat cei obisnuiti. Fiecare kilogram de masa a unui magnet supraconductor creaza un camp magnetic echivalent ca putere cu un electromagnet cu miez feromagnetic de 20 tone.

Magnetii supraconductori se utilizeaza pentru cercetari in domeniul fizicii energiilor inalte, pentru crearea de acceleratori circulari magnetici puternici de particule si a unui sistem de ghidare a fluxului de particule la iesirea din accelerator. Sistemele magnetice supraconductoare se utilizeaza in camere cu hidrogen lichid, in care, dupa curba traiectoriei bulelor de lichid care fierbe, se stabileste semnul sarcinii si impulsul particulelor proiectate.

Problemele energeticii termonucleare nu pot fi solutionate fara utilizarea unor magneti supraconductori puternici. Pentru realizarea sintezei termonucleare dirijate a nucleelor de heliu din nuclee de deuteriu este necesara mentinerea in spatiul de reactie a plasmei fierbinti cu temperaturi de  $10^8 - 10^9$  °C. In acest caz, numai magnetii supraconductori sunt capabili sa creeze campuri de asemenea putere. Reactoarele nucleare cu perspectiva cea mai larga o reprezinta cele de tip "Tokamak", produse de cercetatori din tari precum SUA, Rusia si Japonia.

Intr-un viitor foarte apropiat problema obtinerii de energie va putea fi rezolvata pe baza unor generatoare noi de tip MGD, care realizeaza cresterea coeficientului termodinamic al actiunii utile a centralelor termo-electrice pe baza dirijarii cu viteza mare printr-un camp magnetic puternic a produsilor fierbinti ionizati de ardere a combustibililor sub forma de plasma de temperatura joasa, de aproximativ 2500°C - figura 37.

*Figura 37 – Schema de principiu a unui generator tip MGD: 1 – consumator; 2 – solenoid; 3 – electrod; 4 – flux de plasma;*

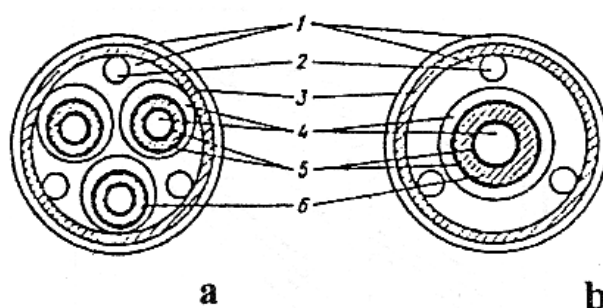


Energia electrica care se formeaza este preluata de electrozi dispusi de-a lungul canalului de plasma. Astfel, cu ajutorul acestor generatoare, se realizeaza transformarea directa a energiei termice intr-una electrica.

Efectul de supraconductibilitate poate fi folosit pentru obtinerea de generatoare supraconductoare de energie electrica cu putere unitara mult mai mare decat generatoarele traditionale. Turbogeneratoarele supraconductoare prezinta un coeficient util mult mai ridicat, avand dimensiuni mai mici si masa de aproximativ trei ori mai mica.

In perspectiva, transportul energiei de putere mare se va realiza cu ajutorul liniilor aeriene de cabluri supraconductoare. Calculele au aratat ca printr-un cablu supraconductor de o anumita grosime se poate transmite intreaga putere maxima elaborata de electrocentralele din SUA. Printr-o analiza tehnico-economica s-a stabilit ca prin transmiterea unei energii de putere mare (de ordinul a 3-4 GW.A), cu un consum de material specific scazut si o latime mica a traseului, cablul supraconductor va fi de 2-3 ori mai ieftin decat cel obisnuit, avand pierderi mult mai scazute. Principal, constructia cablurilor supraconductoare de curent continuu sau alternativ este asemanatoare - vezi figura 38.

*Figura 38 - Sectiunea schematizata a unui cablu supraconductor de curent trifazat cu perechi de conductori coaxiali (a) si de curent continuu cu conductori dispusi concentric (b): 1 - spatiu vidat; 2 - canale pentru azot lichid; 3 - izolatie termostatica; 4 - canale pentru heliu lichid; 5 - supraconductor; 6 - izolatie electrica;*



Cablurile supraconductoare prezinta in sectiune transversala o multitudine de tuburi izolate intre ele cu vid. Tuburile interioare, umplute cu heliu lichid, sunt acoperite cu un strat de material supraconductor cu grosime de aproximativ 0,3 mm. Ca material supraconductor poate fi utilizat aliajul Nb-Ti sau Nb-Zr. Asemenea tipuri de cabluri au trecut deja testele de productivitate in tari precum SUA, Japonia sau Rusia.

Supraconductibilitatea permite de asemenea rezolvarea problemei stocarii de energie electrica si furnizarea acesteia la valori maxime. Pentru stocarea energiei este nevoie de un

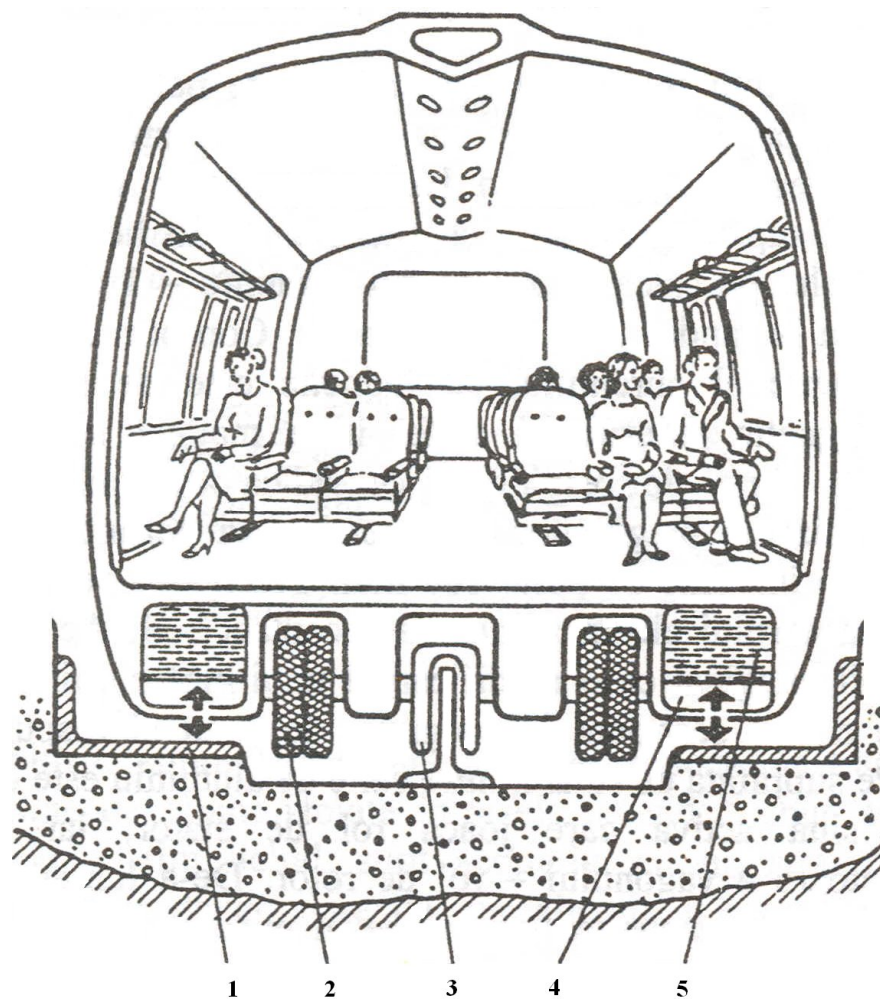


criostat toroidal cu un diametru de cativa metri, prin spirele caruia circula curent practic fara pierderi.

Un tren obisnuit de cale ferata, care se deplaseaza pe sine din otel are o limita a vitezei in jur de 350 Km/h. La cresterea acestei viteze se pierde contactul sigur al rotilor cu calea de rulare, creste puternic forta de rezistenta aerodinamica, apare "bariera de intrerupere de curent", care impiedica functionarea normala a sistemului de suspendare a cablului de contact datorita vibratiilor puternice.

Utilizarea efectului de supraconductibilitate permite realizarea unui tren fara roti cu suspendare magnetica si tractiune cu perne magnetice - vezi figura 39.

*Figura 39 - Schema unui tren cu perne magnetice: 1 - cai de rulare din Al; 2 - rotile trenului; 3 - motor liniar; 4 - electromagneti supraconductori; 5 - heliu lichid ;*



La baza vagoanelor sunt instalati electromagneti supraconductori - 4, raciti cu heliu lichid - 5. La miscarea trenului pe calea de rulare din aluminiu - 1 apar curenti care genereaza la randul lor camp magnetic. Conform legii Lentz, campul magnetic al curentului de inductie este de semn opus campului magnetic exterior si astfel intre magnet si calea de aluminiu apar forte de respingere ce ridica vagonul deasupra estacadei. Utilizarea magnetilor supraconductori permite ridicarea vagonului pe o inaltime de peste 100 mm. Tractiunea se realizeaza cu ajutorul motorului electric liniar fara contact - 3. Acest motor liniar poate fi imaginat ca o modificare a unui motor obisnuit prin rotatie care a fost sectionat in lungime, desfacut si dispus pe o suprafata. Pe suprafata de rulare, intre caile de aluminiu este dispusa o a treia sina activa care joaca rol de stator, iar bobina supraconductoare a vagonului - rol de rotor. De-a lungul caii se deplaseaza o unda magnetica care pune in miscare trenul, unda a carei viteza este proportionala cu frecventa curentului alternativ din calea de rulare. Rotile - 2 ale trenului cu perne magnetice sunt utilizate ca si la avioane doar pentru accelerare si franare.

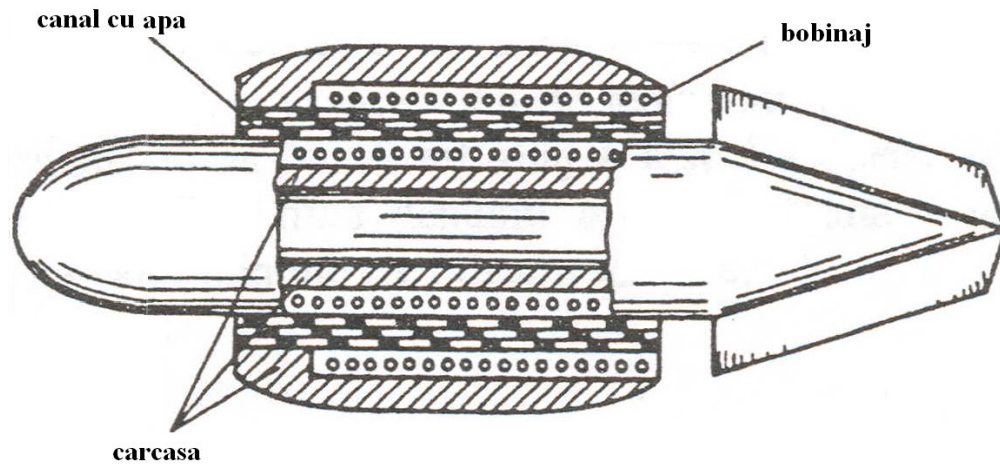
In Japonia se preconizeaza construirea unei magistrale de mare viteza intre Tokio si Osaka pe o lungime de 500 km prevazuta special pentru trenuri cu perna magnetica ce pot atinge viteze de 500 km/h.

Materialele criogenice supraconductoare ce se utilizeaza pentru transformatoarele si motoarele electrice, permit scaderea in volum a acestora, a masei cu aproape 80 %, iar coeficientul de utilitate activa sa fie ridicat la 98 %.

In domeniul industriei aerospatiale materialele supraconductoare si-au gasit de asemenea intrebuintarea cu succes. Astfel, o sfera supraconductoare din aliaj de niobiu, prin interactiunea cu un camp magnetic exterior, este capabila sa pluteasca fara a i se opune rezistenta in aer sau in vid. O asemenea sfera reprezinta un rotor ideal pentru un giroscop - principalul dispozitiv de orientare a navetelor spatiale.

Supraconductorii criogenici sunt utilizati pentru pompe magnetice, ce permit transferul campurilor magnetice din volume mari in volume mai mici, crescand in acelasi timp intensitatea  $H$  a acestora. Este cunoscut deja proiectul submarinului cu reactie cu motor magneto-hidro-dinamic (Figura 40). Curentul care trece prin spirele supraconductoare genereaza un camp magnetic, ce traverseaza submarinul de la cap spre coada. Prin canalul inelar umplut cu apa, dispus intre corpul interior si cel exterior, se induc curenti. Interactiunea acestor curenti cu campul magnetic al supraconductorului creaza o forta ce pune in miscare submarinul. Viteza de deplasare calculata a submarinului poate atinge valori de minim 90 km/h.

Figura 40 - Schema submarinului cu reactie cu motor magneto-hidro-dinamic (MHD)



Campurile magnetice puternice ale supraconductorilor criogenici permit protecția navelor spațiale împotriva radiațiilor. Exemplele ilustrate mai sus sunt departe de a epuiza posibilitățile de utilizare ale supraconductorilor criogenici. Toate acestea demonstrează de fapt că avem de-a face cu un nou domeniu tehnic, cu imense perspective aplicative.