

Metale i stopy jako składniki materiałów przewodzących

Miedź Cu

- gęstość = $8,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- $\gamma = 59,77 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Cu chemicznie czysta
- $\gamma = 58 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Cu elektrolityczna 99,9 %
- $R_m = 200\dots 400 \text{ MPa}$, zależnie od utwardzenia przez zgniot.

Półprodukty z miedzi:

- grube druty (pręty) wytwarza się przez wyciskanie gorącej miedzi przez specjalny otwór w grubościennym zbiorniku,
- cienkie druty wykonuje się z pręta o średnicy ok. 6 mm przeciągając go na zimno przez kalibrowane oczka przeciągarki,
- w procesie przeciągania miedź utwardza się, zwiększa się wytrzymałość mechaniczna, twardość i kruchość, maleje przewodność,
- wyżarzanie rekrytalizujące w temperaturze ok. 500°C .

Stopy miedzi

- dwa podstawowe rodzaje: mosiądze i brązy,
- zawartość Cu w stopach przekracza 50 %,
- w mosiādzach główną domieszką jest cynk Zn,
- w brązach zawartość Zn jest mniejsza od innych składników,
- konduktywność stopów miedzi jest mniejsza od czystej Cu,
- mosiądze i brązy są lepsze od Cu od względem:
 - wytrzymałości mechanicznej i sprężystości,
 - odporności na czynniki środowiska,
 - możliwości obróbki skrawaniem.

Aluminium Al

- gęstość = $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- $\gamma = 38,2 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Al chemicznie czyste,
- $\gamma = 35 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Al elektrolityczne 99,5 %,
- $R_m = 70\dots 170 \text{ MPa}$, zależnie od utwardzenia przez zgniot,

Al ma dużą odporność na korozję, pokrywa się samorzutnie spoistą ok. $0,5 \mu\text{m}$ warstewką izolacyjną AlOOH i Al_2O_3 .

Druty z aluminium

- przeciąganie na zimno przez oczka przeciągarki,
- aluminium utwardza się, zmniejsza się jego konduktywność,
- wyżarzanie rekrytalizujące w temperaturze 300 do 350 °C.

Stopy aluminium

- elementy konstrukcyjne aparatów i urządzeń elektrycznych,
- najczęściej stosowane duraluminium $AlCu_3Mg_1$ i silumin $AlSi_9$,
- duża wytrzymałość mechaniczna przy niewielkiej gęstości,
- duraluminium - do obróbki plastycznej,
- silumin - do odlewania.

Cyna Sn

- gęstość = $7,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- temperatura topnienia = 232 °C
- niewielka wytrzymałość mechaniczna,
- odporna na działanie powietrza, wody, słabych kwasów i zasad,
- dodatek stopowy i składnik lutów miękkich.

Cynk Zn

- gęstość = $7,14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- temperatura topnienia = $419,5 \text{ }^\circ\text{C}$,
- odporny - warstwa zasadowego węgla cynku $\text{Zn}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$,
- składnik stopów, pokrycia antykorozyjne

Wolfram W

- gęstość = $19,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- temperatura topnienia = $3410 \text{ }^\circ\text{C}$,
- $R_m = 1200\dots4200 \text{ MPa}$ (zależnie od stopnia utwardzenia),
- bardzo twardy i trudno obrabialny,
- wytwarzanie elementów przez spiekanie,
- elektrody lamp, rezystory grzejne, styki łączników dużych mocy.

Molibden Mo

- gęstość = $10,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,
- temperatura topnienia = $2622 \text{ }^\circ\text{C}$,
- własności zbliżone do wolframu, bardziej miękkie,
- składnik spieków, elementy żaroodporne i styki ługoodporne.

Materiały na przewody i połączenia przewodzące

Wymagania:

- możliwie mała wartość rezystywności,
- duża wytrzymałość mechaniczna,
- duża wartość przewodności cieplnej,
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy,
- możliwie mała aktywność chemiczna i odporność na korozję,
- możliwość łączenia przez lutowanie, zgrzewanie, spawanie,

Materiały przewodowe mogą pełnić rolę „akumulatora ładunku elektrycznego” (okładziny kondensatorów), a także rolę elementu kontaktowego (połączenia nierozłączalne).

Materiały na przewody elektroenergetyczne gołe

- przewody gołe - głównie w liniach napowietrznych WN
- podstawowy materiał: aluminium,

Przy tej samej oporności przewód z Al, w porównaniu do przewodu z Cu, ma większy przekrój o prawie 70 %, ale jego ciężar jest dwukrotnie mniejszy.

- stare linie niskiego napięcia: linki z twardego Al,
- linie wysokiego napięcia: linki stalowo-aluminiowe,
- rdzeń przewodu: linka z drutów stalowych ocynkowanych,
- warstwa przewodząca: druty z Al twardego,
- linie wysokiego napięcia: linki z tzw. aldreju,
- stop Al z Mg (ok. 0,4 %), Si (ok. 0,5 %) i Fe (ok. 0,3 %),
- własności aldreju: $\gamma = 30 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ $R_m = 350 \text{ MPa}$,
- linie wysokiego napięcia: linki wykonane z drutów stalowych, na których wytłoczono grubą, hermetyczną warstwę aluminium.

Materiały na żyły przewodów izolowanych

Przewody izolowane:

- przewody jednożyłowe i wielożyłowe,
- przewody kabelkowe i kable elektroenergetyczne,
- przewody izolowane linii napowietrznych.

Żyły przewodów izolowanych:

- najczęściej z miedzi miękkiej,
- rzadziej z aluminium półtwardego,
- w nielicznych przypadkach ze stopów miedzi.

Wykonanie żył:

- drut okrągły (gdy przekrój nie przekracza 10 mm^2),
- linka z drutów okrągłych,
- linka z drutów profilowanych.

Materiały na druty nawojowe

Uzwojenia transformatorów, maszyn elektrycznych, dławików, elektromagnesów, cewek:

- druty nawojowe miedziane pokryte cienką warstwą izolacji,
- druty cienkie (setne części milimetra): Cu półtwarda,
- druty o większych średnicach: Cu miękka,
- cienkie druty nawojowe są zwykle okrągłe,
- grube druty - przekroje zbliżone do prostokątnych (lepsze wypełnienie cewki miedzią, łatwiejsze nawijanie).

Materiały na połączenia między elementami, układami scalonymi i podzespołami urządzeń elektronicznych

Najczęściej stosowane:

- przewody drutowe,
- przewody foliowe (folia przewodząca na laminacie izolacyjnym - obwody drukowane).

Najlepszy materiał: Cu 99,9 $\gamma \geq 58,4 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$

- ochrona przed utlenianiem: powlekanie przewodów miedzianych:

- cyną Sn do 150°C
- srebrem Ag do 200°C
- niklem Ni do 260°C

- zwiększenie wytrzymałości mechanicznej (na zginanie i drgania) przez dodanie do miedzi niewielkiej ilości (do 1 %) najczęściej:

- srebra (Cu-Ag)
- kadmu (Cu-Cd)
- chromu (Cu-Cr)

Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych hybrydowych grubowarstwowych

Materiały na elementy przewodzące:

- srebro Ag, stop Ag-Pd, złoto Au, platyna Pt, stop Au-Pt,
- w warstwach lutowalnych Au w niewielkich ilościach.

Technologia układów scalonych grubowarstwowych:

- podłoże: płytka z ceramiki alundowej (Al_2O_3 powyżej 96 %),
- nanoszenie past zawierających drobnoziarniste proszki metali lub tlenków metali oraz szkliwa niskotopliwego,
- technika sitodruku,
- wypalanie w piecu tunelowym,
- temperatura od 500 do 1400°C, zależnie od rodzaju warstwy.

Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych monolitycznych

Układ scalony monolityczny:

Wszystkie elementy układu (ścieżki przewodzące, miejsca kontaktowe, rezystory, kondensatory, diody, tranzystory) są wykonane z zastosowaniem tej samej technologii, np. wzmacniacze, generatory, procesory, pamięci itp.

Materiały na elementy przewodzące:

- ścieżki: najczęściej aluminium Al (dobra przyczepność do warstwy tlenku SiO_2),
- wyprowadzenia: aluminium Al, złoto Au.

Technologia układów scalonych monolitycznych:

- podłoże: monokrystaliczne płytki krzemowe Si,
- utlenienie powierzchni płytki - warstwa izolacyjna SiO_2 ,
- naparowanie w próżni warstwy Al.,
- zgrzewanie wyprowadzeń Al lub Au (grubość rzędu $20 \mu\text{m}$).

Materiały na rezystory

Wymagania:

- duża rezystywność,
- mały współczynnik temperaturowy rezystancji α (TWR),
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy,
- odporność na utlenianie,
- duża wytrzymałość mechaniczna,
- stabilność własności w czasie.

Podział ze względu na przeznaczenie:

- rezystory precyzyjne (pomiarowe),
- rezystory techniczne (regulacyjne),
- rezystory grzejne,
- rezystory w układach scalonych (precyzyjne i techniczne).

Materiały na rezystory precyzyjne

- wzorce rezystancji, rezystory w przyrządach pomiarowych,
- wymagania podstawowe:
 - możliwie słaba zależność ρ od temperatury i czasu,
 - mała wartość jednostkowej siły termoelektrycznej (STE) w odniesieniu do materiału przewodu (najczęściej Cu).

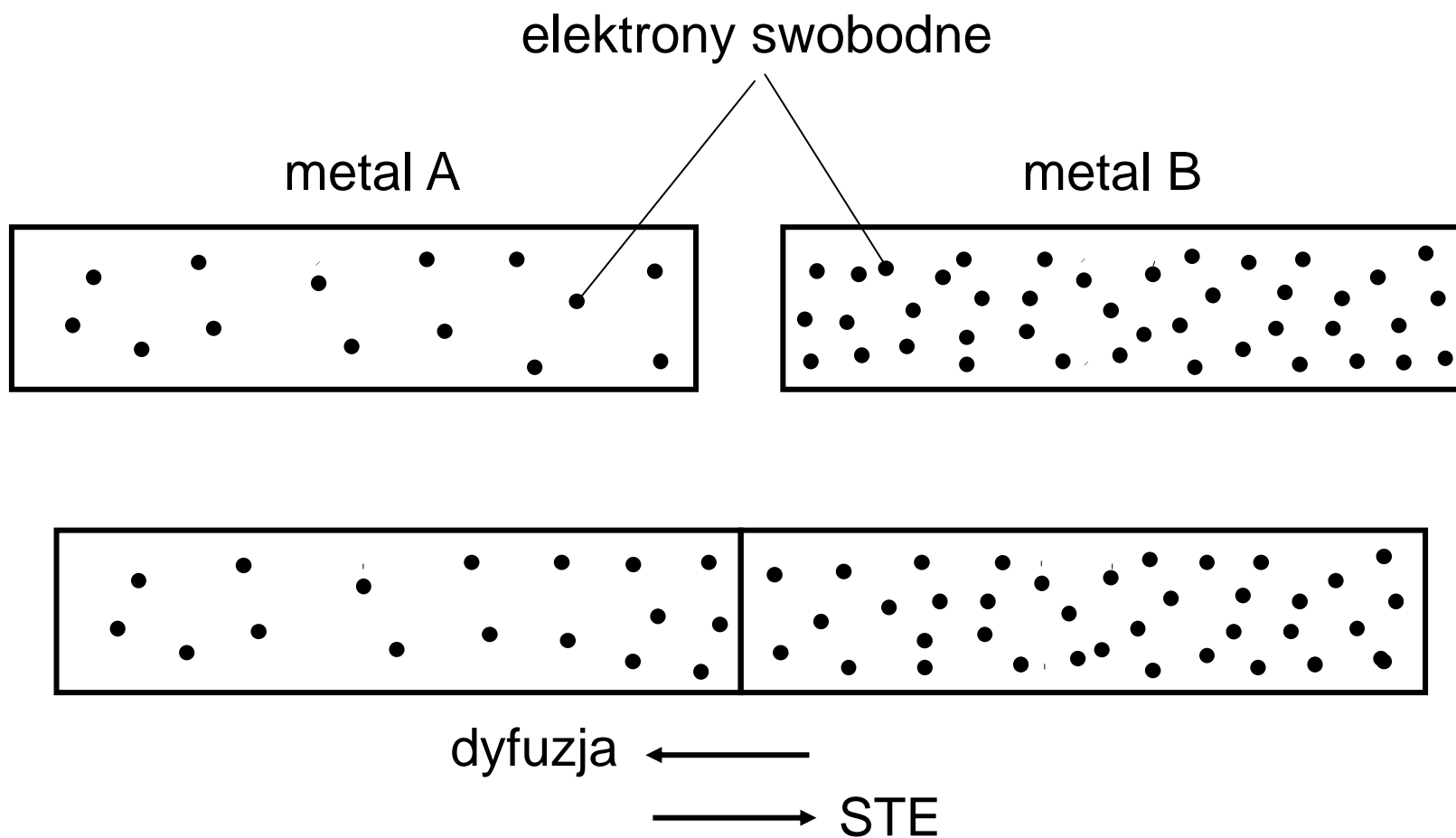
Materiały:

- głównie stopy miedzi z metalami kolorowymi i żelazem:
 - Cu86Mn12Ni2 (manganin),
 - Cu84Mn13Al3 (izabelin),
 - Cu82,5Mn12Al4Fe1,5 (inmet),
 - Cu55Ni45 (konstantan).

Własności:

- zbliżone wartości: $\rho = 0,5 \mu\Omega\text{m}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$,
- $\text{STE}_{\text{Cu}} < 1 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ (manganin, izabelin, inmet),
- $\text{STE}_{\text{Cu}} = -42,6 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ (konstantan),
- dopuszczalne temperatury pracy: 250... 400°C.

Siła termoelektryczna (STE) w miejscu połączenia różnych metali lub stopów:



- równowaga sił na poziomie zależnym od temperatury złącza,
- wartość STE - większa, im wyższa temperatura złącza.

Materiały na rezystory techniczne

- rezystory rozruchowe i regulacyjne do silników,
- rezystory ograniczające prąd w układach z kondensatorami, cewkami i przyrządami półprzewodnikowymi.
- Materiały:
- w kolejności coraz większych obciążeń prądowych:
 - konstantan Cu55Ni45,
 - nikielina Cu54Ni26Zn20,
 - żeliwo stopowe Fe93,9Zn3,6Si1,7Mn0,8.

Własności:

- rezystywność $\rho \cong 0,5 \mu\Omega\text{m}$,
- nikielina: $\alpha = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $T_{dop} = 300^\circ\text{C}$,
- żeliwo stopowe: $\alpha = 1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $T_{dop} = 400^\circ\text{C}$.

Materiały metaliczne na rezystory grzejne

- urządzenia elektrotermiczne przemysłowe (piece, suszarki),
- urządzenia i przyrządy ogólnego użytku (grzałki, grzejniki, żelazka, kuchnie elektryczne, lutownice itp.),
- wymagania podstawowe:
 - możliwie wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej,
 - odporność na korozję - trwała warstwa tlenków.

Materiały:

- nichromy:
 - chromonikielina beżelazowa Ni80Cr20 1,1 $\mu\Omega\text{m}$ 1150°C,
- ferronichromy:
 - chromonikielina żelazowa Fe20Ni65Cr15 1 $\mu\Omega\text{m}$ 1150°C,
- ferrochromale:
 - kanthal Fe68Cr24Al5,5Co1,5 1,45 $\mu\Omega\text{m}$ 1375°C,
- czyste metale:
 - molibden Mo, wolfram W 1500...3000°C (atmosfera ochronna).

Materiały niemetaliczne na rezystory grzejne

Materiały wysokotemperaturowe:

- węgiel krzemu SiC $T_{dop} = 1650^{\circ}\text{C}$; pręty grzejne: silit i globar,
- krzemek molibdenu MoSi₂, $T_{dop} = 1900^{\circ}\text{C}$; superkanthal, mosilit,
- węgiel niobu NbC (podobne własności jak superkanthal),
- węgiel, grafit C, $T_{dop} = 3000^{\circ}\text{C}$ (atmosfera ochronna).

Materiały niskotemperaturowe:

- materiały organiczne (głównie kauczuki silikonowe)
napełnione sproszkowaną sadzą, grafitem lub metalem,
- $T_{dop} = 400^{\circ}\text{C}$.

Materiały na rezystory w układach elektronicznych scalonych

(z materiałów metalicznych i niemetalicznych)

- stop Cr-Ni (chromonikielina):

- $\rho = 30 \dots 400 \Omega$ (na kwadrat powierzchni warstwy),

- $\alpha = 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,

- stabilny, powtarzalne parametry,

- dobra przyczepność do podłoża,

- inne stopy: np. Cr-Ti, Ta-Au,

- czyste metale: np. Ti, Cr, Ta, W,

- rezystory warstwowe z tlenków Sn, Sb i In, podstawowy SnO_2

- chlorki Sn, Sb i In + H_2O , natryskiwane na podłoża (500°C),

- grubość ok. $1 \mu\text{m}$, rezystancja na kwadrat do 500Ω ,

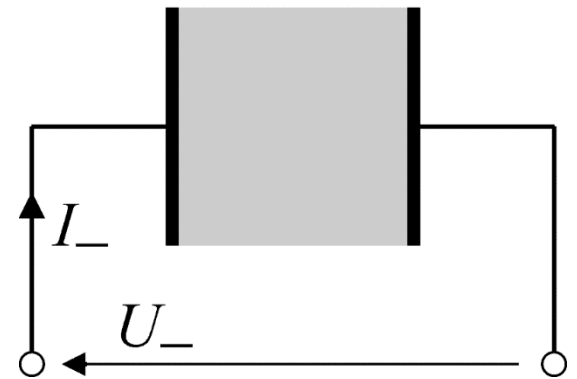
- odporne na narażenia mechaniczne i temperatury do 240°C ,

- węgiel polikrystaliczny uzyskiwany w procesie pirolizy:

- warstwy o grubości rzędu $0,01 \dots 1 \mu\text{m}$,

- rezystancja na kwadrat od kilku do kilkuset omów,

- $\alpha = -10^{-4} \text{ K}^{-1}$.



- rezystory cermetowe:
 - jednoczesne naparowanie lub napylenie katodowe na podłoże metalu (np. Cr) lub stopu (np. Ni-Cr) i składników ceramicznych (np. SiO, SiO₂),
- rezystory z drobnoziarnistych proszków metali i szkliwa:
 - najczęściej stosowane pallad Pd i srebro Ag (ziarna 0,5 μm),
 - szkło ołowiowo-borowo-krzemowe (ziarna 5 μm),
 - szkło wypełnia przestrzenie między ziarnami Ag, Pd i PdO,
 - średnia grubość warstwy: 25 μm,
 - rezystancja na kwadrat: 1...25 kΩ,
 - wartość TWR: rzędu 10⁻⁵...10⁻⁴ K⁻¹,
- rezystory kompozytowe:
 - składnik przewodzący: węgiel w postaci sadzy lub grafitu,
 - składnik wiążący: żywice termoutwardzalne (fenolowo-formaldehydowe, silikonowe, epoksydowe),
 - wypełniacz polepszający rozmieszczenie ziaren węglowych (talk, mączka mikowa, dwutlenek tytanu),
 - duża wartość rezystancji, nawet do 10¹² Ω,
 - rezystancja na kwadrat: 1...25 kΩ.