

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

1



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

4.

**Elektrotechnické materiály
KET/ELTM**

Ing. Robert Vik, Ph.D.



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

EK 410, rvik@fel.zcu.cz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

2

Odporové materiály

- jedná se o vodivé materiály s cca **10x až 100x vyšší rezistivitou**, než mají běžné vodiče

Charakteristické vlastnosti

- malý teplotní součinitel rezistivity (TKR) a délkové roztažnosti
- dostatečná mechanická pevnost při vysokých teplotách
- vysoká teplota tavení
- žárovzdornost a stálost vlastností
- dobrá zpracovatelnost






EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

3

Typy rezistorů

- použití zejména na přeměnu elektrické energie na tepelnou (**topné rezistory**) nebo rezistory pro měřicí a regulační techniku, příp. i další odvětví elektrotechniky – **běžné a přesné rezistory**

- rozdělení dle konstrukce

- vrstvé

- drátové

- objemové (hmotové)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
MINISTERSTVO
VÝZKUMU A Vzdělávání

4

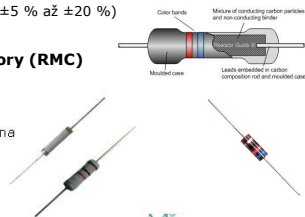
Objemové rezistory

- uhlíkové kompozitní rezistory (CCR)**

- základem **uhlíkový materiál** (uhlíkový nebo grafitový prášek) + **izolant** (keramický nebo jílový prášek) + polymerní pojivo
- hodnota R dána poměrem uhlíkové složky a izolantu složky (od 1 Ω cca do 10 MΩ)
- velmi levné, ale málo přesné (od ±5 % až ±20 %)

- keramické kompozitní rezistory (RMC)**

- obdoba CCR
- uhlík nahrazen kovovým práškem
- lepší aplikační vlastnosti, vyšší cena



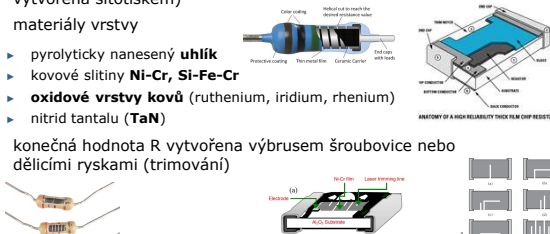
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
MINISTERSTVO
VÝZKUMU A Vzdělávání

5

Vrstvé rezistory

- nejrozšířenější typ
- kostra tvořena keramickým tělesem (Al_2O_3), na kterém je nanášena funkční vrstva (tenká vakuově napařená nebo vytvořená sítotiskem)
- materiály vrstvy
 - pyrolyticky nanesený **uhlík**
 - kovové slitiny **Ni-Cr**, **Si-Fe-Cr**
 - oxidové vrstvy kovů** (ruthenium, iridium, rhenium)
 - nitrid tantalu (**TaN**)
- konečná hodnota R vytvořena výbrusem šroubovice nebo dělicími ryskami (trimování)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
MINISTERSTVO
VÝZKUMU A Vzdělávání

6

Drátové rezistory

- niklové a manganové bronzy**
 - Manganin (přesné rezistory)
 - Konstantan (běžné rezistory, termoelektrické články)
 - Nikelin (regulační rezistory)
- slitina Au-Cr** – velmi přesné rezistory, rezistivita téměř nezávislá na teplotě
- slitina Ag-Mn** – normálové rezistory (minimální teplotní součinitel rezistivity)
- chromnikl** (Ni-Cr), **kanthal** (Fe-Cr-Al) – topné elementy pro elektrotopelná zařízení (pracovní teploty > 1000 °C)



7

O odporové materiály

Odporový materiál	Chemické složení [hm. %]	Rezi- stivita ρ [$\mu\Omega\text{m}$]	Teplotní sou- činitel rezistance α_R [$10^{-4} (\text{K}^{-1})$]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Termoelektr. napětí vůči Cu [$\mu\text{V/K}^\circ\text{C}$]	Max. pra- covní teplota [$^\circ\text{C}$]
Manganin	86 Cu 12 Mn 2 Ni	0,43	$\pm 2,5 (20^\circ\text{C})$	500-550	-0,6	140
Zeranol	87 Cu 7 Mn	0,43	$\pm 3 (20^\circ\text{C})$	350-400	-1,3	140
Konstantan	54 Cu 45 Ni 1 Mn	0,5	$\pm 50 (20^\circ\text{C})$	400-500	-40	500
Isotan	55 Cu 44 Ni 2 Mn	0,49	$\pm 40; -80$	450-550	-42	600
Nikelin	67 Cu 30 Ni 3 Mn	0,4	$\pm 180 (20^\circ\text{C})$	350-400	-20	400
Nikrothal LX	75 Ni 20 Cr 5 Si+Mn	1,33	10	1100-1400	max. 1	300
Isaohm	74 Ni 20 Cr 1 Mn	1,32	$\pm 10 (20^\circ\text{C})$	1100-1200	+1	250
Stabilohm	80 Ni 20 Cr	1,33	$\pm 5 (20^\circ\text{C})$		+0,5	250
Zlato-chrom	97,95 Au 2,05 Cr	0,33	$\pm 1 (20^\circ\text{C})$		7	
Chrom-nikl	80 Ni 20 Cr	1,1	85	700-1400	5	1200
Cekas	60-65 Ni 15-19 Cr 15-20 Fe 2-4 Mn	1-1,13	70			1050
Kantal A	70 Fe 23 Cr 4,5 Al 1 Co	1,39	49	650-850		1300
Kantal Al	68 Fe 24 Cr 5,5 Al 1,5 Co	1,45	32	650-850		1350
Kantal DS	72 Fe 22 Cr 4 Al 0,7 Co	1,35	63	650-850		1150
Cechral	81 Fe 14,5 Cr 4,5 Al	1,3	180			850



8

Nekovové odporové materiály

- pro pracovní teploty nad 1300 °C
- charakter keramiky – vyrábí se z práškového materiálu
- Silit (SiC, karbid křemíku)**
 - značně vyšší rezistivita než u kovových materiálů (cca $3 \cdot 10^{-4} \Omega\text{m}$)
 - křehký, použitelný do 1600 °C
- Cermetové materiály**
 - vyráběné práškovou metalurgií na bázi keramiky a kovů (Kantahl Super)
 - základním materiálem směs křemičitanu molybdenatého MoSiO_2 s oxidem křemičitým (SiO_2)
 - pracovní teploty až do 1700 °C
 - rezistivita se mění značně s teplotou – při 20 °C rezistivita cca $0,25 \mu\Omega\text{m}$ při 1600°C je už $3,5 \mu\Omega\text{m}$

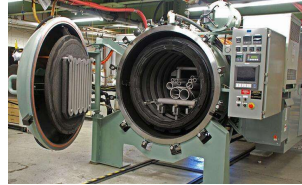
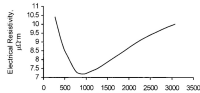


9

Nekovové odporové materiály

• Uhlíkové a grafitové topné materiály

- ▶ pracovní teploty jsou až 2500 °C ve vakuu nebo v ochranné atmosféře
- ▶ v normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C
- ▶ rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při 1400 °C asi na 67 % z hodnoty při 0 °C



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

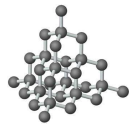


10

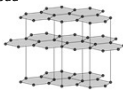
Uhlík v elektrotechnice

- uhlík je prvek ze IV.A skupiny (4 valenční elektrony)
- v přírodě se běžně vyskytuje ve 2 základních modifikacích

- ▶ **diamant** – každý atom má 4 kovalentní vazby
 - výborná tepelná vodivost (až 6x vyšší než stříbro)
 - elektricky nevodivý



- ▶ **grafit** – každý atom 3 kovalentní vazby
 - volný elektron schopný transportu náboje – vede elektrický proud



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

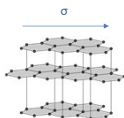


11

Uhlík v elektrotechnice

Charakteristické vlastnosti

- ▶ odolnost vůči vysokým teplotám – $T_f > 3600$ °C
- ▶ chemická odolnost – odolává kyselým i zásaditým látkám, při oxidaci nevznikají povrchové oxidy (CO i CO₂ jsou plyny)
- ▶ relativně dobře elektricky vodivý – lépe vede ve směru podél roviny vrstev
- ▶ nízký součinitel tření – tzv. samomazný (výhodné pro kluzné kontakty)
- ▶ pro aplikace jako **elektrografit** – spékáný grafitový prach za vysoké teploty el. proudem (přeměna amorfního na krystalický uhlík), příp. kombinace s kovovým prachem

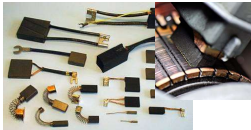


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



12

Aplikace uhlíku v elektrotechnice



uhlíkové kartáče v elektrických točivých strojích



sběrače proudu v elektrické trakci



odporový materiál



elektrody v teplotně náročných podmínkách





EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

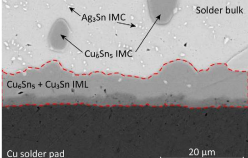


UNIVERSITY OF MATEMATICS

13

Materiály pro pájky

- pájení** - metalurgické spojení materiálů pomocí přídavného materiálu (pájky)
- spoj vzniká vlivem **adheze** (přilnutí) a **difuze** (pronikání), tzn. pájkový kov difunduje do spojovaných materiálů
- umožňuje spojovat i velmi rozdílné kovy (Al, Ni, Cu)
- důležitým prvkem **tavidlo** - odstraňuje povlak oxidů na styčných plochách (např. kalafuna)





EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

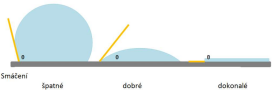


UNIVERSITY OF MATEMATICS

14

Materiály pro pájky

- obecné požadavky:**
 - teplota tání pájky nižší než teplota tání spojovaných materiálů
 - co nejvyšší konduktivita
 - dostatečná mechanická pevnost
 - dobrá smáčivost povrchu, malé povrchové napětí a co nejnížší viskozita
 - odolnost vůči korozi





EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



UNIVERSITY OF MATEMATICS

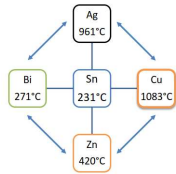
15

Materiály pro pájky

• měkké pájky

- ▶ teplota tání **do 450 °C** (do cca 200 °C tzv. snadno tavitelné pájky)
- ▶ pro méně mechanicky namáhané spoje
- ▶ slitiny nízkotavitelných kovů (Sn, Ag, Cu, Zn a Bi)

Lead Free Solder Alloys (% weight)	Melting Range (°C)
Sn63/Pb37 (Tin/lead solder for reference)	183
Sn96.5/Ag3.5	221
Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5 (SAC305)	217 - 220
Sn95.5/Ag4.0/Cu0.5 (SAC405)	217 - 220
Sn99.3/Cu0.7/Ni0.06/Ge0.005 (SN100C)	227
Sn99.3/Ag0.3/Cu0.7 (SAC0307)	217 - 228
Sn42/Bi58 (low melting lead free solder)	138
Sn95/Sb5 (high melting lead free solder)	235 - 240



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

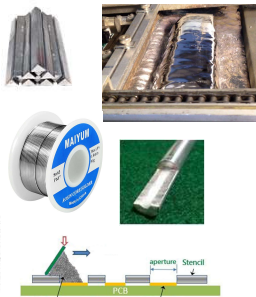


16

Materiály pro pájky

• měkké pájky

- ▶ různá forma dle technologie aplikace
 - **tyče** (ingoty) pro pájení vlnou
 - **trubičky** (s tavidlem i bez)
 - **pasty** (určeny pro povrchovou montáž)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



17

Materiály pro pájky

• tvrdé pájky

- ▶ teplota tavení **nad 450 °C**
- ▶ vhodné pro pájení kovů s teplotou tavení nad 1000°C s požadavkem na vyšší mechanickou a tepelnou odolnost
- ▶ **mosazné** – Cu-Zn, používají se u materiálů z oceli a niklu, příp. jejich slitin, pracovní teploty mezi 710 °C a 1100 °C
- ▶ **stříbrné** – Ag nebo Ag-CuZn, pájení mědi, niklu a jejich slitin
- ▶ **hliníkové** – Al-Si, pájení hliníku a jeho slitin
- ▶ **ostatní** (např. Ag, Au, Pt)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

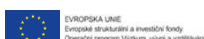
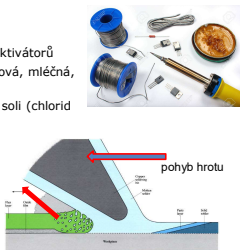
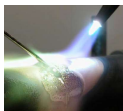


18

Materiály pro pájení

- **tavidla**

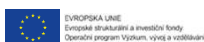
- ▶ mají za úkol rozpuštět povrchové oxidy, chránit před další oxidací, zvyšovat zátěkovost pájky
- ▶ pro měkké pájení
 - **pryskyřičná** – na bázi katalafuny + přísady aktivátorů
 - **organická** – slabé organické kyseliny (citronová, mléčná, stearová)
 - **anorganická** – kyseliny (HCl, HNO₃) a jejich soli (chlorid zinečnatý, amonný)
- ▶ pro tvrdé pájení
 - borax (boritan sodný), chloridy a fluoridy



19

Materiály pro tavné pojistky

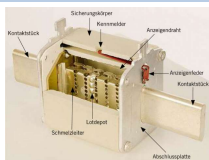
- chrání elektrická zařízení před poškozením nadměrným elektrickým proudem
- tepelným účinkem nadproudu se přetaví tavný vodič ve tvaru drátku nebo pásku
- požadované vlastnosti materiálu tavného vodiče:
 - ▶ vysoká konduktivita (nízký odpor i při malých rozměrech)
 - ▶ nízká teplota tavení
 - ▶ malá náchylnost k oxidaci
 - ▶ snadná vypařitelnost (bez pevných zbytků)



20

Materiály pro tavné pojistky

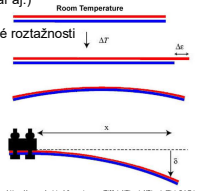
- materiály a provedení tavných vodičů:
 - ▶ pásy a drátky z mědi, rep. postříbřené mědi
 - ▶ hliník, zinek
 - ▶ stříbro
 - ▶ nízkotavné pájky (pro velmi malé proudy)



21

Bimetalý

- dvojkovové (bimetalické) materiály tvořeny ze dvou různých kovů nebo jejich slitin s různou délkovou roztažností
- vrstvy jsou spolu spojeny buď metalurgicky (naplátováním, pájením) nebo mechanicky (zaválcováním)
 - pasivní vrstva** – kov s menším součinitelem teplotní délkové roztažnosti (slitiny Fe-Ni s vyšším obsahem niklu – např. Invar, Kovar aj.)
 - aktivní vrstva** – kov s větším součinitelem teplotní délkové roztažnosti (např. Ni, Fe, Ni-Fe (20 %), mosaz)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

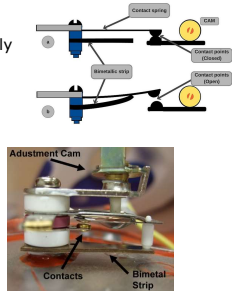
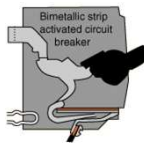
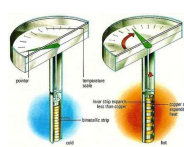
MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

22

Bimetalý

Použití

- termostaty – elektrotepelná zařízení, ventily
- vratné tepelné pojistky, jističe
- teploměry



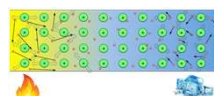
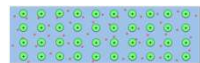
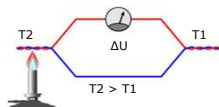
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

23

Materiály pro termoelektrické články

- termoelektrické články založeny na termoelektrických jevech
- Seebeckův jev**
 - při spojení dvou různých kovů vzniká v důsledku rozdílných výstupních prací na jejich rozhraní tzv. **kontaktní napětí**
 - v uzavřeném obvodu bude mezi oběma konci téct elektrický proud v závislosti na rozdílu teplot obou konců
 - napětí velmi malá $\sim 10^{-1} \mu\text{V/K}$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

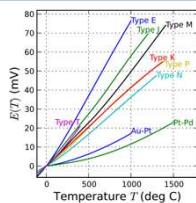
MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

24

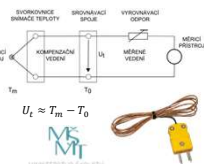
Materiály pro termoelektrické články

Označení dle IEC 584	Složení	Seebeck, k. $[\mu V/^{\circ}C]$	Měřicí rozsah $[^{\circ}C]$
T	Cu-CuNi, Cu-ko	40	-200 až 350
J	Fe-CuNi	51	-200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	60	-100 až 900
K	NiCr-Ni, ch-a	40	-200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	38	-200 až 1200
S	PtRh10-Pt	11	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	12	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	8	300 až 1700

ko – Konstantan, NiCr – niklchrom, ch – Chromel, a – Almel



- požadavky na materiály
 - co největší výstupní termoelektrické napětí
 - lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě
 - odolnost vůči chemickým, mechanickým a korozním vlivům

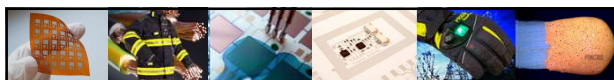


$$U_t \approx T_m - T_0$$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

UNIVERSITY OF PLZEN

25



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost

FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

UNIVERSITY OF PLZEN

26