

# TANKOPLASTNI TEMPERATURNI SENZORJI

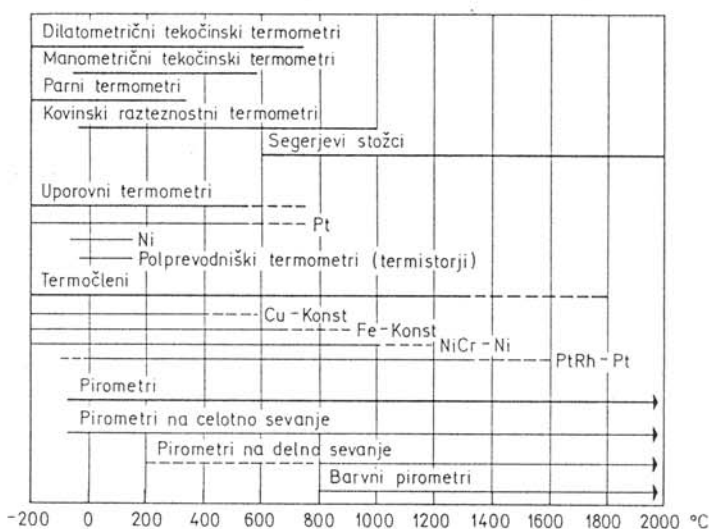
Peter Panjan, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

## 1. Uvod

Za merjenje temperature uporabljamo v industrijski proizvodnji, pri znanstvenih raziskavah in v vsakodnevnem življenju najrazličnejše termometre. Za izdelavo temperaturnih senzorjev lahko uporabimo materiale, pri katerih so izbrane fizikalne lastnosti (npr. volumen, električna napetost, električna upornost) enolično odvisne od temperature. Ko se v praksi odločamo med možnimi materiali, vzamemo tiste, ki imajo v zahtevanem temperaturnem območju čimbolj linearno odvisne izbrane lastnosti (npr. termonapetost, upornost) od temperature in tiste, ki dajo največji izhodni signal.

V praksi uporabljamo najrazličnejše termometre (tabela 1), od katerih ima vsak svoje prednosti in omejitve. Prvi termometri so bili tekočinski, pozneje pa so prišli v uporabo uporovni in bimetalni termometri, termočleni in termometri na sevanje (pirometri). V merilni in regulacijski tehniki najbolj pogosto uporabljamo termometre na osnovi termočlenov, kovinskih uporov, termistorjev in temperaturne senzorje, izdelane v polprevodniški tehnologiji (IC-senzorji), ker nam na zelo enostaven način dajejo direkten električni signal. Njihova občutljivost in merilno področje sta najbolj odvisni od vrste materiala.

**Tabela 1: Temperaturna območja uporabe termometrov**



Nekatere od naštetih temperaturnih senzorjev je mogoče izdelati tudi v tankoplastni tehnologiji, ki je pocenila njihovo proizvodnjo, hkrati pa imajo tako narejeni senzorji krajše reakcijske čase.

## 2. Temperaturni senzorji

### a) Termočleni

V procesni industriji najpogosteje uporabljamo termočlenske termometre. Uporabo le-teh je omogočilo odkritje termoelektrične napetosti (Seebeck-ova napetost), ki jo lahko izmerimo med dvema kovinskima žicama iz različnih materialov, ki smo ju na enem koncu spojili in spoj segreli. Termonapetost je odvisna od temperature, na kateri je spoj in od vrste oz. sestave obeh materialov. Termonapetosti za različne kombinacije kovinskih materialov in njihovih zlitin so zbrane v literaturi in tabelirane /1/. Najpogosteje uporabljeni termočleni so pari Cu-konstantan (uporabimo ga lahko v temperaturnem območju od -200 do največ 600°C), Fe-konstantan (od -200 do 850°C), NiCr-Ni (od -200 do 1200°C) in PtRh-Pt (od -100 do 1600°C). Konstrukcija termočlenov je zelo enostavna, mehanično robustna in relativno poceni. Njihova največja prednost je, da lahko z njimi izmerimo tudi zelo visoke temperature (do +2000°C). Slabosti pa so: nelinearna zveza med termonapetostjo in temperaturo (že v področju od 0 do 100°C so odstopanja od linearnosti 1 do 2°C), majhna termonapetost (gledano absolutno), obvezna uporaba reference in v nekaterih primerih (Pt-PtRh) visoka cena. Izmed znanih temperaturnih senzorjev so termoelementi najmanj stabilni in imajo najmanjšo občutljivost (dU/dT). Termočlenov v tankoplastni izvedbi ne moremo realizirati, ker potrebujemo za meritev temperature kompenzacijski hladen spoj.

### b) Termistorji

Polprevodniški uporovni termometri (termistorji) obstajajo v dveh izvedbah, in sicer z velikim pozitivnim (PTK) ali z velikim negativnim (NTK) temperaturnim koeficientom upornosti. Termistorji so upori, ki so izdelani iz oksidov niklja, mangana, železa, kobalta in nekaterih drugih kovin in pri katerih je temperaturni koeficient upornosti od -0.7 do -0.3%/K. Pri spremembi temperature je sprememba upornosti termistorjev v primerjavi s kovinami zelo velika in je odvisna od širine energijske reže, vsebnosti nečistoč in prevladujočega mehanizma prevajanja. Pri spremembi temperature je sprememba upornosti zelo velika. Upornost teh senzorjev je eksponentna funkcija temperature. Kljub temu je ponovljivost priprave nekaterih industrijskih termistorjev zelo dobra, pa tudi odstopanja izmerjenih vrednosti temperature so minimalna (0.01°C v temperaturnem območju od -40 do 150°C). Uporabni so samo do približno 100°C. Za meritev upornosti potrebujemo tokovni izvir, ki pa povzroči nezaželeno segrevanje senzorja. Termistorje uporabljamo za

temperaturno zaščito v različnih napravah. Cena termistorjev je od 0.2 do 40 DEM, odvisno od vrste termistorja. Čeprav so izdelani iz polprevodniških materialov, niso izvedljivi v silicijevi planarni tehnologiji, zato jih ne moremo integrirati z drugimi elementi regulacijskega vezja v čip.

Temperaturni senzor, ki ga lahko izdelamo v silicijevi planarni tehnologiji, izkorišča lastnost diod, da ima napetost v prepustni smeri pri konstantnem toku pozitiven temperaturni koeficient ( $\sim 2.25$  mV/K). Zveza med napetostjo in temperaturo teh senzorjev je linearna in ima veliko strmino. Diodo lahko skupaj s tokovnim izvirom, ojačevalnikom in morebitnim pretvornikom integriramo v čip. Maksimalna temperatura, do katere jih še lahko uporabimo je  $+150^\circ\text{C}$ . Njihovi glavni slabosti sta: velika časovna konstanta in samosegrevanje zaradi merilnega toka. Cena IC-senzorjev je zelo nizka (približno 0.04 DEM).

### c) Kovinski uporovni termometri

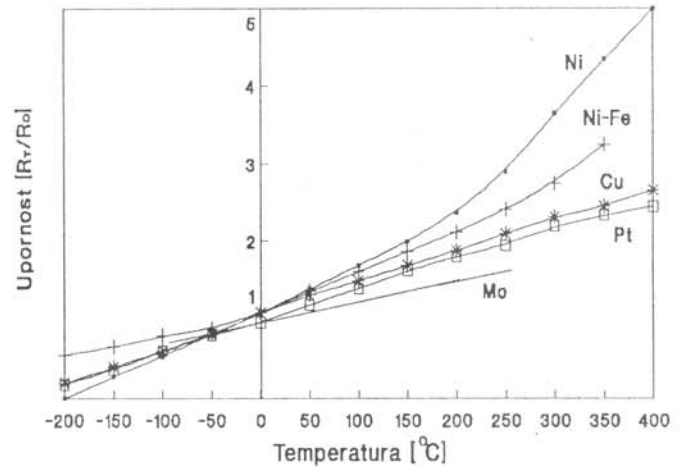
Kovinski uporovni termometri [2-9] so zasnovani na pojavu, da ima upornost kovinskih prevodnikov, kot so npr. nikelj ali platina, pozitiven temperaturni koeficient. Takí senzori so zelo stabilni, natančni in imajo ponovljive lastnosti v širokem temperaturnem območju (za platino od  $-200^\circ\text{C}$  do  $+850^\circ\text{C}$ ), pri čemer za meritev ne potrebujemo reference. Naredimo jih lahko v obliki uporovne žice ali kot tanke plasti.

Slabosti termometrov s kovinskimi prevodniki so: nizke vrednosti upornosti (npr.  $100\ \Omega$  pri  $0^\circ\text{C}$ ) in s tem relativno majhne spremembe upornosti, relativno velika toplotna kapaciteta ter obvezna uporaba tokovnega izvira, kar povzroča že omenjene težave zaradi samosegrevanja. V primerjavi s termistorji so termouporovni termometri uporabni v širšem temperaturnem območju, so stabilni tudi pri višjih temperaturah, odlikuje jih linearna odvisnost upornosti od temperature, vendar pa so 100-krat manj občutljivi od termistorjev, hkrati pa veliko dražji in zahtevajo kompleksnejšo merilno tehniko. Cena ultrastabilnih senzorjev, npr. Pt-100, skupaj s certifikatom je od 40 do 2000 DEM.

Za zmanjšanje sistemske napake na minimum je pomembna čim višja vrednost upornosti ( $R_0$  pri  $0^\circ\text{C}$ ) senzorja. Čim večja je upornost senzorja, tem manjši je vpliv upornosti priključnih žic. Čim manjša je specifična upornost kovine, tem več materiala potrebujemo pri isti vrednosti upornosti (npr.  $100\ \Omega$  pri  $0^\circ\text{C}$ ). Na osnovi tega sta zlato in srebro, ki imata najnižjo specifično upornost, neprimerna materiala za termouporovne plasti.

Najprimernejši in najpogosteje uporabljen material za uporovne termometre je platina. Le-to je predlagal kot material za uporovne termometre W. Siemens že leta 1870. Platinske termometre odlikuje optimalna ponovljivost in stabilnost, linearna zveza med upornostjo in temperaturo, visoka temperatura tališča, uporabnost v relativno širokem temperaturnem območju (od  $-200$  do  $+850^\circ\text{C}$ ), kemijska inertnost in stabilnost (najboljša med vsemi kovinami).

Spričo visokega temperaturnega koeficienta se pogosto uporabljata tudi nikelj in nikelj-železo. Kot temperaturna senzorja sta uporabna v temperaturnem območju od  $-60$  do  $+180^\circ\text{C}$ . Slabosti sta nelinearnost temperaturne odvisnosti (sl. 1) in staranje.



Slika 1: Temperaturna odvisnost upornosti različnih termouporovnih materialov

Zaradi linearne odvisnosti upornosti in majhne cene je sprejemljiv material za senzore baker. Maksimalna temperatura, do katere so uporabni, je  $+250^\circ\text{C}$ .

V zadnjih letih so se pojavili na tržišču termometri z molibdensko termouporovno plastjo. Le-ti imajo v primerjavi s platinskimi bistveno bolj linearno uporovno karakteristiko (slika 1), hkrati pa so med staranjem zelo stabilni. Po 240 ciklih staranja (en cikel staranja je segrevanje od  $-50$  do  $150$  in ohlajanje na  $-50^\circ\text{C}$  v šestih urah) se je začetna upornost spremenila za manj kot 0.15 ppm. Molibdenski senzori so uporabni do nižjih temperatur kot platinski, vendar so za razliko od slednjih uporabni le do temperature  $+250^\circ\text{C}$ .

Tudi iridijeva termouporovna plast ima bolj linearno uporovno karakteristiko kot platinska, vendar je uporabna le v temperaturnem območju od  $-50$  do  $+400^\circ\text{C}$ . Njihova slaba stran je, tako kot pri platinskih senzorjih, visoka cena.

Ugotavljamo (tabela 2), da imajo senzori na osnovi različnih termouporovnih plasti določene prednosti in slabosti, ki jih moramo upoštevati v konkretnih primerih uporabe.

Kot je bilo že omenjeno, so vsi naštetí kovinski termouporovni senzori izvedljivi tudi v tankoplastni tehnologiji. Standarden postopek izdelave tankoplastnega senzorja temperature vključuje nanos plasti (npr. platine) na keramično podlago, sledi postopek doravnovanja upornosti plasti z laserjem ali fotojedkanjem in končno zaščita s primerno izolacijsko plastjo. Glavna prednost tankoplastne izvedbe je znatno zmanjšanje stroškov izdelave, znatno večja upornost, široka izbira oblike, v kateri lahko senzor realiziramo, predvsem pa krajši reakcijski čas.

**Tabela 2: Primerjava karakteristik termouporovnih plasti različnih materialov**

	Pt	Ni	Cu	Ir	Mo
Specifična električna upornost [ $\mu\Omega\text{cm}$ ]	10.58	7.8	1.69	5.3	5.78
TKU [ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ]	3850	6750	4350	3000	3000
Merilno območje	-50..+600	-60..+180	-70..+120	-50..+400	-200..+200
Linearnost	slaba	slaba	odlična	dobra	odlična (<0.05%)
Časovna konstanta [s]	0.05	0.9	/	/	1.8
Stabilnost [%]	0.3	slaba	/	/	$\pm 0.04$
Merilni tok [mA]	1	1	/	/	1
Cena	visoka	nizka	nizka	visoka	nizka

Izdelava kovinskih uporovnih termometrov je standardizirana. V uporabi je standard DIN 43760, ki predpisuje upornosti platinskih senzorjev v odvisnosti od temperature. Za platinske upore se zahteva upornost plasti  $100\Omega$  pri  $0^{\circ}\text{C}$  in temperaturni koeficient upornosti  $3.85 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ , kar pri povečanju temperature z 0 na  $100^{\circ}\text{C}$  pomeni povečanje upornosti za  $38.5\Omega$ . Ustrezen napetostni signal na  $^{\circ}\text{C}$  je tako kot pri termočlenih majhen, zato potrebujemo drage ojačevalnike. Nelinearnost, ki ima kvadratičen potek, lahko kompenziramo z analognimi ali digitalnimi vezji.

Slabost kovinskih termouporovnih plasti, ki se sicer odlikujejo z visoko stabilnostjo, relativno velikim signalom, majhno termično maso, enostavno izdelavo in nizko ceno, je nelinearna karakteristika. Odstopanja od linearnosti so seveda veliko manjša kot pri polprevodnikih oz. termistorjih. Odvisna so od čistote plasti oz. dopiranja z drugimi elementi in od kristaliničnosti plasti.

Bistvena prednost kovinskih uporovnih senzorjev v primerjavi z drugimi je optimalna časovna stabilnost. Zlasti to velja za platinske termoupore. Raziskave so pokazale, da se je upornost, npr. pri  $0^{\circ}\text{C}$  Pt 100 senzorju po 10000 urah žarjenja na  $+800^{\circ}\text{C}$  (približno eno leto) povečala le za 0.2 %. Ustrezna temperaturna sprememba je  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

Absolutna natančnost platinskega termouporovnega senzorja je naslednja njegova prednost. Velike spremembe upornosti na  $^{\circ}\text{C}$  omogočajo pri višjih temperaturah absolutno natančnost. Pri natančnih meritvah temperature pa moramo upoštevati tudi vpliv samosegrevanja senzorja. Za majhne tankoplastne senzorje je še dopusten merilni tok 1mA.

Odzivni čas senzorja je odvisen od mase, specifične toplotne kapacitete in njegove površine. Za masivne Pt 100 senzorje je ta čas med 0.1 in 1 s ter 0.05 s za tankoplastni senzor. Če so senzorji vgrajeni v zaščitno cev, so ti časi lahko 5 do 10-krat večji.

### 3. Zaključek

Termouporovne tanke plasti (platina, nikelj, iridij, molibden, baker), ki jih v praksi uporabljamo za izdelavo temperaturnih senzorjev, zadoščajo splošnim kriterijem (t.j. stabilnost na staranje, linearna temperaturna odvisnost upornosti, široko temperaturno območje uporabnosti, čim boljše temperaturna občutljivost - velik TKU, nizka cena), le delno oz. v omejenem temperaturnem območju. Aktualno je iskanje tistih materialov, ki bi lahko nadomestili platinske termouporovne plasti, ki bi bili uporabni do  $1000^{\circ}\text{C}$  in ki bi bili predvsem cenejši. Z vidika fizikalno-kemijskih lastnosti zahtevamo od takih materialov: (1) velik temperaturni koeficient upornosti, (2) linearno odvisnost upornosti od temperature, (3) dobro odpornost proti oksidaciji, (4) visoko temperaturo tališča, ki naj bi bila vsaj dvakrat višja od maksimalne delovne temperature (t.j.  $>2000^{\circ}\text{C}$ ), da bi se na ta način izognili težavam z rekristalizacijo in (5) odsotnost faznih in magnetnih prehodov.

### 4. Literatura

- /1/ Katalog Degussa, Emf Values of Thermocouples
- /2/ H.J. Klappe, Platin-Wiederstandstermometer für industrielle Anwendungen, Technisches Messen, 54 Jahrgang, Heft 4, (1987)
- /3/ R. A. Pease, Temperatursensoren, Elektronik 14, (1986)
- /4/ U. Heller, Ein Temperatur Messwiderstand nach DIN, Elektronik Produktion and Prüftechnik, Heft 9A (1986)
- /5/ Molybdenium sensors on the forward march, Elektron. ind., Vol. 20, N3 (1989) p. 80-86
- /6/ D.E. Bahniuk, The Changing Face of Temperature Measurements, Machine Design, (1989) p. 111
- /7/ K. Požun, B. Stariha, A. Banovec in M. Kern, Odstopanje upornosti in temperaturnega koeficienta napršenih nikljevitih tankih plasti od standardnih Pt-100 uporovnih termometrov, Zbornik simpozija o elektronskih sestavnih delih SD-89, Maribor (1989) str. 243
- /8/ A. Banovec, K. Požun, B. Stariha, B. Praček in M. Kern, Vpliv atmosfere pri termični obdelavi na sestavo in električne lastnosti tankih napršenih plasti Pt, Zbornik simpozija o elektronskih sestavnih delih SD-90, Radenci (1990) str. 301
- /9/ K. Požun, A. Banovec, B. Stariha in M. Kern, Odvisnost TKU radio-frekvenčno napršenih tankih plasti Pt od parametrov depozicije in stabilizacije, Zbornik predavanj XI. jug. vak. kongresa, Gozd Martuljek, (1990) str. 275