

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MĚŘENÍ OTEPLENÍ ZAPOJENÉHO ELEKTRICKÉHO OBVODU
MEASUREMENT OF WARMING OF POWERED ELECTRICAL CIRCUIT

AUTOR: STANISLAV TOMAN

STUDIJNÍ PROGRAM: VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. JAKUB HORNÍK, Ph.D.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Toman** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **473416**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření oteplení napájeného elektrického obvodu

Název bakalářské práce anglicky:

Measurement of warming of powered electrical circuit

Pokyny pro vypracování:

Rešerše v oblasti měření teploty elektrických obvodů.
Výběr termočlánků a jejich upevnění.
Provedení měření.
Analýza výsledků a jejich vyhodnocení.
Závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BOYES, W. Instrumentation reference book. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010. ISBN 978-0-7506-8308-1.
[2] KREIDL, M. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jakub Horník, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

11.6.2020
Datum převzetí zadání

[Podpis]
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Předmětem této práce je seznámit čtenáře s problematikou měření oteplení zapojeného elektrického obvodu pomocí termočlánků a navrhnout nejlepší možný způsob, jak toto měření provést s ohledem na ekonomiku, pracnost a přesnost. V teoretické části práce je uveden přehled termočlánekových materiálů a termočlánků a jejich vlastností. Experimentální část zahrnuje výběr vhodných kombinací termočláneků, fixačních materiálů, návrh zapojení a následné měření, porovnání a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Termočlánek, měření, obvod, terminál, teplota.

Annotation

The subject of this work is to acquaint the reader with the problems of measuring the warming of the connected electrical circuit by thermocouples and to suggest the best possible way to find out this temperature with regard to economy, laboriousness and accuracy. The theoretical part of the thesis brings an overview of thermocouple materials and thermocouples and their properties. The experimental part includes the selection of suitable combinations of thermocouple, fixing materials, connection proposal and subsequent measurement, comparison and evaluation of results.

Keywords

Thermocouple, measurement, circuit, terminal, temperature.

Poděkování

Děkuji Ing. Jakubu Horníkovi, Ph.D. za pomoc a vedení při tvorbě této práce. Dále děkuji celému Ústavu materiálového inženýrství, Fakulty strojní, ČVUT v Praze za možnost tuto práci psát a také externí laboratoři za zapůjčení vybavení a mnoho dobrých rad.

Dále děkuji své rodině za podporu a trpělivost potřebnou pro vznik této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů	10
Úvod	11
Teoretická část.....	12
Teplota	12
Teplotní senzory	12
Dělení teplotních senzorů.....	13
Kovové senzory	13
Polovodičové senzory	14
Termočlánky	14
Princip měření termočlánkem	14
Výhody	16
Nevýhody	16
Nastavení referenčního bodu	17
Zařízení pro stanovení referenční hodnoty	18
Termočlánekové materiály	19
Vlivy na měření	21
Drift rhodia.....	22
Termočlánky z drahých kovů	23
Další zařízení pro měření teploty.....	24
Odporová teplotní čidla	24
Termistor	26
Termostat.....	29
Materiály pro upevnění termočlánků	29
Polyimid.....	29
Teflon.....	32
Praktická část.....	36
Cíl experimentu	36
Popis měření.....	36
Příprava vzorků.....	38
Naměřené hodnoty.....	44
9 A, kladná polarita	44

9 A, záporná polarita	45
13 A, kladná polarita.....	45
13 A, záporná polarita	45
Vyhodnocení	46
Závěr.....	47
Přílohy	50
Seznam obrázků	51
Citovaná literatura	52

Seznam použitých symbolů

R	Elektrický odpor	[Ω]
T	Teplota	[K] [°C]
B	Teplotní konstanta	[K]
I	Elektrický proud	[A]
U	Elektrické napětí	[V]
A	Geometrická a materiálová konstanta	[Ω]

Úvod

Měření teploty má v dnešní podobě průmyslu nepostradatelnou roli. Jako u měření ostatních veličin je i u tohoto měření požadována vysoká přesnost a efektivita. Jednou z nejčastějších metod měření teploty je použití termočlánu.

Teoretická část práce popisuje, jakými možnými způsoby lze měřit teplotu a na jakých principech daná zařízení pracují. Důraz je kladen zejména na problematiku měření termočlánekem. Dále jsou zde popisovány polymerní materiály, které jsou použity během vlastního měření.

Praktická část práce popisuje měření teploty napájeného elektrického obvodu uvnitř zapojeného konektoru. Cílem této části práce je zjistit, jaká je nejvhodnější metoda upnutí termočlánu na měřený vodič tak, aby termočlánek nebyl nijak ovlivňován elektrickým proudem tekoucím ve vodiči a zároveň měřil s co největší přesností. Jako měřící zařízení je použit termočlánek, který má nejvhodnější kombinaci vlastností, ať už se jedná o cenu, velikost nebo složitost připevnění. Jsou zde porovnávány metody upnutí pomocí teflonové pásky, polyimidové pásky a pomocí lepidla, které by mělo mít vhodné vlastnosti, jako např. vysokou teplotní vodivost, a naopak nízkou elektrickou vodivost. Tyto metody byly vybrány na základě zkušeností s tímto měřením ve specializované laboratoři. Cílem tohoto měření je ověření, zda má na naměřené hodnoty vliv polarita proudu a také to, jestli se termočlánek dotýká kovu, ve kterém teče elektrický proud. Naměřené hodnoty jsou porovnávány s hodnotami získanými měřením pomocí odporového čidla Pt 100.

Výsledky práce budou použity v externí laboratoři, která se zabývá testováním konektorů.

Teoretická část

Teplota

Teplota je jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které popisují stav těles a látek. Právě z hodnoty teploty vychází mnoho fyzikálních zákonů. Teplo je formou energie a je způsobeno pohybem molekul, iontů a atomů látek. Částice se v různých skupenstvích pohybují jinak. V pevném skupenství kmitají kolem rovnovážné polohy, v kapalinách a plynech se pohybují v celém objemu a jejich pohyb je neuspořádaný a při konstantní teplotě je konstantní i rychlost pohybu částic. Tento pohyb se proto nazývá tepelný pohyb. Kinetická energie částic je tedy přímo úměrná termodynamické teplotě. Kdyby se pohyb částic úplně zastavil, hovoříme o teplotě absolutní nuly. Její hodnota je 0 K (-273,15 °C). [15]

Znalost teploty je potřebná téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Schopnost stanovit její hodnotu je základem bezpečnosti například v letectví, automobilové dopravě, energetice. Sledování teploty je nutností téměř u všech strojů. Příkladem mohou být moderní vlaky, kde se během jízdy sleduje teplota na každém ložisku. Bez přesného měření teploty bychom se neobešli v potravinářství, farmacii a dalších oborech. V neposlední řadě nemůžeme vynechat metalurgii, kde sledování teploty hraje zásadní roli v konečných vlastnostech materiálů. [15]

Teplotní senzory

Teplotní senzor je součástka určená k měření teploty. Název je možné nahradit slovy čidlo, snímač nebo detektor. Senzor je zařízení, které je v kontaktu s měřeným tělesem nebo povrchem. Jeho úkolem je převést hodnotu teploty na hodnotu jiné veličiny, kterou je možné jednoduše změřit. Pomocí této veličiny se následně dopočítá výsledná hodnota teploty. [15]

Dělení teplotních senzorů

a) Podle fyzikálního principu

Odporové, termoelektrické, polovodičové, optické, chemické

b) Podle kontaktu senzoru měřeného povrchu

Dotykový, bezdotykový

c) Podle převodu signálu

- Aktivní – působením teploty se chovají jako zdroj elektrické energie
- Pasivní – Potřebují zajistit napájení

[15]

Kovové senzory

Z elektrických veličin je na teplotě závislý odpor. Ten roste, pokud se teplota zvyšuje. Tím, že do obvodu připojíme zdroj, elektrony v kovových mřížkách se začnou usměrněně pohybovat a rozkmitávají ionty, které kovovou mřížku tvoří. S narůstající teplotou, a tedy i s pohybem iontů se zvyšuje pravděpodobnost střetu elektronu a pohybujícího se iontu. Právě rostoucí počet srážek mezi ionty a elektrony souvisí se zvyšující se hodnotou odporu, protože ionty, čím jsou teplejší, tím více elektrony brzdí v pohybu. Tohoto jevu využívají kovové (odporové) senzory teploty. [14]

Aby bylo možné určit teplotu měřeného prostředí, je nejprve nutné určit hodnotu odporu čidla, pomocí kterého se bude teplota určovat. K tomu se využívá Ohmův zákon, který říká, že napětí je součinem odporu a elektrického proudu (1).

$$U = R \cdot I \quad (1)$$

Kde U je elektrické napětí [V], R elektrický odpor [Ω] a I elektrický proud.

V současnosti jsou čidla vyráběna tak, že na keramický substrát (korund – vlákna Al_2O_3) je naprášena tenká vrstva čistého odporového kovu (platina, nikl). Pomocí laseru je odpor čidla nastaven na referenční hodnotu (základní odpor čidla). Vlastní povrch je následně obalen skelnou vrstvou, která chrání kovovou měřicí vrstvu proti mechanickému a chemickému poškození. [14]

Polovodičové senzory

Polovodičové odporové snímače teploty (termistory) využívají závislost odporu polovodiče na teplotě, přičemž tato závislost je velká, nelineární a vyplývá ze změny koncentrace nosičů náboje polovodiče na teplotě. Například změna odporu může být taková, že zvýšením teploty z $0\text{ }^\circ\text{C}$ na $100\text{ }^\circ\text{C}$ klesne odpor 20 až 25 krát, zatím co u platiny se změní pouze o 35 %.

Termistorům se bude věnovat další část práce. [14]

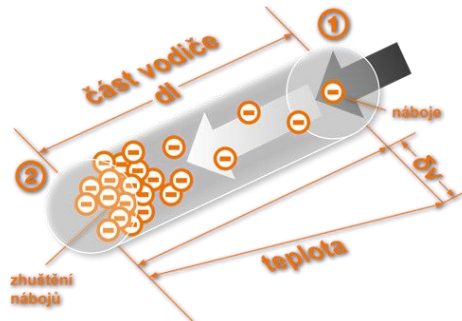
Termočlánky

Princip měření termočlánkem

V roce 1821 objevil Thomas Johann Seebeck termoelektrický jev: spojíme-li dva dráty z různých materiálů, tak můžeme na jejich volných koncích měřit napětí, a to za předpokladu, že se teplota na spojovacím místě liší od teploty na volných koncích drátů. Podle nejnovějších poznatků se tento jev zakládá na specifických vlastnostech elektricky vodivých materiálů.[3]
[7]

Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelné náboje větší energii (v polovodičích i větší prostorovou hustotu, tj. koncentraci), a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Toto lze pozorovat na obrázku 1. Rozložení kladných a

záporných nositelů elektrického náboje popisuje veličina zvaná Seebeckův koeficient, jehož znaménko je stejné, jako znaménko nositelů, kterých je ve vodiči více.[3] [7]



Obrázek 1 Seebeckův jev[4]

Uspořádání dvou spojených drátů, které lze různým způsobem např. svařit, spájet nebo skroutit, se nazývá termočlánek nebo také termoelement. Rozdíl v součtu napětí v jednotlivých drátech z různých materiálů udává měřitelné napětí, které je měřítkem teplotní difference mezi místem spojení obou drátů a koncovkami měřicího přístroje. Pokud bychom použili dva dráty ze stejného materiálu, bylo by v každém drátu stejné napětí a nemohli bychom změřit žádné diferenciální napětí. [3] [5]

Velikost měřeného napětí je dána rozdílem elektrických napětí vzniklých v místě kontaktů kovů A a B, kde jsou různé teploty. Tato místa jsou označována jako studený (referenční) konec a měřící konec termočlátku. Studený (referenční) konec termočlátku musí být udržován na konstantní teplotě, může být např. umístěn v nádobě obsahující směs vody a ledu o teplotě 0 °C. V praktickém měření se však využívá dvouvodičové zapojení, tj. pouze zapojení s měřícím koncem, teplota studeného konce je kompenzována měřicí ústřednou. [3]

Termočlánky se staly průmyslovým standardem pro nákladově efektivní měření širokého rozsahu teplot s rozumnou přesností. Používají se v různých aplikacích až do přibližně +2500 °C v kotlích, ohřívačích vody, pecích a leteckých motorech. Nejoblíbenějším termočlánkem je typ K, který se skládá z chromelu a alumelu (slitiny niklu s ochrannou značkou obsahující chrom a hliník, mangan a křemík), s rozsahem měření –200 °C až +1250 °C. [8]

Výhody

- Teplotní rozsah: Termočlánkem lze měřit téměř všechny teploty, od kryogeniky až po výfuk proudového motoru. V závislosti na použitých kovových vodičích termočlánku jsme schopni měřit teplotu v rozmezí –200 °C až +2500 °C.

- Odolnost: Termočlánky jsou odolná zařízení, která jsou odolná vůči nárazům a vibracím a jsou vhodná pro použití v nebezpečném prostředí.

- Rychlá odezva: Termočlánky jsou malé a mají nízkou tepelnou kapacitu, díky čemuž rychle reagují na změny teploty, zejména pokud je snímací spoj vystaven teplotním šokům. Na změny teploty dokáží reagovat během několika stovek milisekund.

- Žádné samoohřívání: Protože termočlánky nevyžadují žádnou excitační energii, nejsou náchylné k samovolnému zahřívání a jsou bezpečné. [8]

Nevýhody

- Komplexní kondicionování¹ signálu: Při návrhu měření je nutné brát v potaz podmínky, při kterých bude měření prováděno.

- Přesnost: Kromě přirozených nepřesností termočlánků v důsledku jejich metalurgických vlastností je měření termočlánků pouze tak přesné,

¹ přizpůsobování, přizpůsobení materiálu určitým vlivům (vlhka, tepla, tlaku apod.)

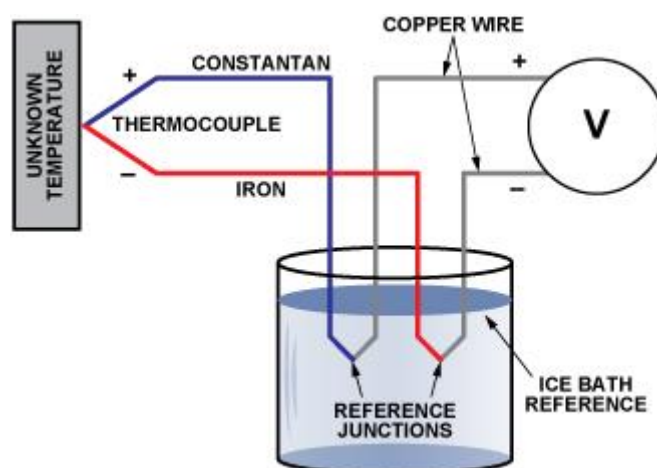
jako přesnost zařízení, které zaznamenává vyprodukované napětí, tradičně v rozmezí 1 °C až 2 °C.

- Citlivost na korozi: Protože se termočlánky sestávají ze dvou různých kovů, může v některých korozních prostředích v průběhu měření vést ke zhoršení přesnosti. Proto je nezbytná průběžná údržba měřidla

- Citlivost na šum: Při měření změn signálu na úrovni mikrovoltů může být problémem šum z rozptýlených elektrických a magnetických polí. Zkroucení drátků termočlánků může výrazně snížit vliv okolních magnetických polí. Dále se pro ochranu používá například vedení v kovových trubičkách, nebo stínících kabelů. S ohledem na tuto problematiku by měla být konstruována používaná měřící zařízení, což jsou většinou datalogery, které by měly dokázat napětí filtrovat. [8]

Nastavení referenčního bodu

Teplota referenčního spoje termočlánku musí být u každého měřidla známa, aby se dosáhlo přesné hodnoty absolutní teploty. Když byly termočlánky poprvé použity, bylo to provedeno udržováním referenčního spojení v ledové lázni.



Obrázek 2 Nastavování referenční teploty[8]

Obrázek 2 znázorňuje obvod termočlánku s jedním koncem při neznámé teplotě a druhým koncem v ledové lázni (0 °C). Tato metoda byla použita k

charakterizaci různých typů termočlánků, takže téměř všechny tabulky termočlánků používají jako referenční teplotu 0 °C.

Udržování referenčního spojení termočlánku v ledové lázni však není pro většinu měřících systémů praktické. Místo toho se v praxi využívá metoda zvaná kompenzace referenčních křižovatek (známá také jako kompenzace studených křižovatek). Teplota referenčního spoje se měří jiným zařízením citlivým na teplotu. Obvykle IC, termistor nebo RTD (odporový detektor teploty). Odečet napětí termočlánku je pak prováděn tak, aby odrážel teplotu referenčního spoje. Je důležité, aby referenční hodnota byla čtena co nejpřesněji – s přesným snímačem teploty udržovaným na stejné teplotě jako referenční hodnota. Jakákoli chyba při čtení referenční hodnoty se projeví jako nepřesnost v dalším měření, které bude tímto termočlánkem prováděno. [8]

Zařízení pro stanovení referenční hodnoty

K měření referenční teploty je k dispozici celá řada senzorů:

1. Termistory: Mají rychlou odezvu a malé rozměry, ale mají omezenou přesnost, zejména v širokém teplotním rozsahu. Vyžadují také proud pro buzení, což může vést k samovolnému zahřívání, což vede k nepřesnostem. Celková přesnost systému v kombinaci s kondicionováním signálu může být nízká.
2. Odporové teplotní detektory (RTD): RTD jsou přesné, stabilní a přiměřeně lineární, avšak jejich rozměry a pořizovací náklady omezují jejich použití v různých způsobech měření.
3. Vzdálené tepelné diody: Dioda se používá ke snímání teploty v blízkosti konektoru termočlánku. Klimatizační čip převádí napětí diody, které je úměrné teplotě, na analogový nebo digitální výstup. Jeho přesnost je omezena na přibližně ± 1 °C.
4. Integrovaný teplotní senzor: Integrovaný teplotní senzor, který lokálně snímá teplotu, by měl být pečlivě namontován blízko referenčního uzlu a

může kombinovat kompenzaci referenčního uzlu a úpravu signálu. Lze dosáhnout přesnosti okolo 1 °C. [8]

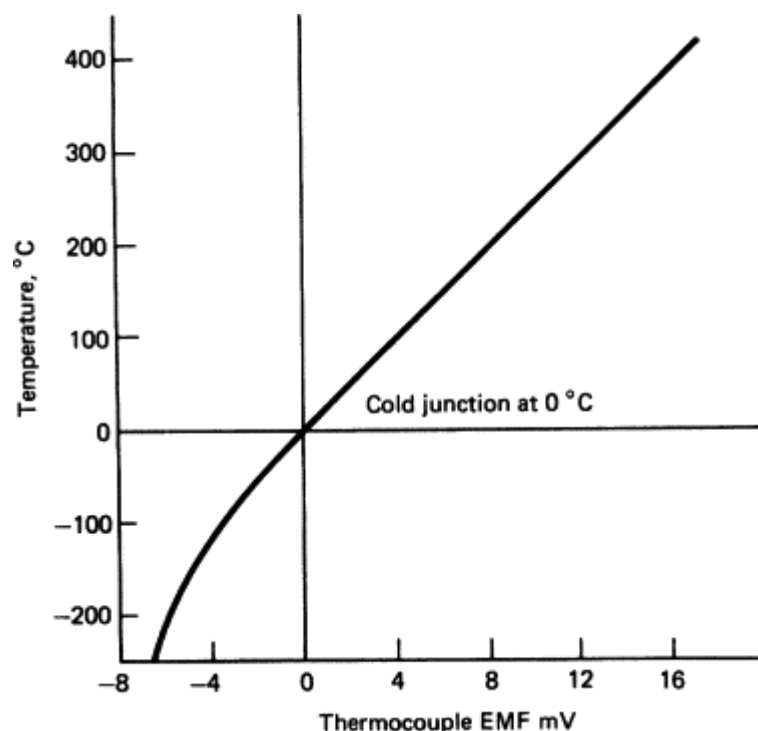
Detailnějšímu popisu těchto měřidel se věnuje následující část této práce.

Termočláňkové materiály

Obecně se termočláňky dělí do dvou skupin podle použitých materiálů, a to konkrétně na termočláňky z běžných kovů a termočláňky z drahých kovů.

Nejběžněji používané průmyslové termočláňky jsou popsány písmeny. Hlavní typy termočláňků, jejich měřící rozsahy a použití, jsou uvedeny v tabulce 1 spolu s jejich výstupním termoelektrickým napětím se studeným spojem při 0 °C, které je popsáno v tabulce 2. [3] [7]

Tato čísla jsou uvedena pro indikaci relativní citlivosti různých párů. Za předpokladu, že se termočláňek použije při teplotách vzdálených od neutrální teploty, je jeho charakteristika téměř lineární. Graf na obrázku 3 ukazuje charakteristiky termočláňku typu K. [2] [5]



Obrázek 3 Graf závislosti teploty a napětí termočláňku typu K [2]

Z grafické závislosti je patrné, že pro teploty v rozmezí $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ je charakteristika přibližně lineární. Obvykle používané termočlánky ze základních kovů jsou typy E, J, K a T. Z nich jsou nejběžněji používány J a K. Jimi generované napětí je poměrně vysoké a typ K je přiměřeně odolný vůči korozi. Typ T je vhodný k použití, pokud je měřený bod vzdálen od přístroje, protože tento termočlánek je vyroben z mědi, a proto nemá vysoký odpor a měření je tudíž přesnější. Typ N je novější typ termočlánku, který lze použít jako alternativu k typu K. Tabulka 1 ukazuje příklady nejvíce používaných termočlánků. [2]

Tabulka 1 Typy a použití termočlánků [2]

Typ	Použití
B	pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení
C	pro měření vysokých teplot, křehký
D	pro měření vysokých teplot, křehký
E	všeobecné použití, pro měření středních a nižších teplot
G	pro měření vysokých teplot, křehký
J*	pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře
K*	všeobecné použití v oxidační atmosféře
L	zastaralý typ, nepoužívá se
N*	nový typ, náhrady typu K
P	stabilnější, ale dražší než typy K a L
R	velmi přesný, pro vyšší teploty
S	velmi přesný, pro vyšší teploty
T*	všeobecné použití pro nižší teploty, odolný vlhkosti
U	zastaralý typ, podobný typu T, nepoužívá se

[5]

Tabulka 2 Materiály a teplotní rozsah termočlánků [2]

Typ	Pozitivní materiál	Negativní materiál	Citlivost ve 20 °C ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Rozsah teplot ($^\circ\text{C}$)
E	Chromel	Constantan	58.7	-270 - 1,000
G	Wolfram	Wolfram-26 %, Rhenium	19.7 (600 °C)	0 - 2,320
C	Wolfram-5 %, Rhenium	Wolfram-26 %, Rhenium	19.7 (600 °C)	0 - 2,320
D	Wolfram-3 %, Rhenium	Wolfram-26 %, Rhenium	19.7 (600 °C)	0 - 2,320
J	Železo	Constantan	50.4	-210 - 760
K	Chromel	Alumel	39.4	-270 - 1,372
N	Nicrosil	Nisil	39	-270 - 400
B	Platina-6 %, Rhodium	Platina-30 % Rhodium	1.2	0 - 1,820
R	Platina-13 %, Rhodium	Platina	5.8	-50 - 1,768
S	Platina-10 %, Rhodium	Platina	5.9	-50 - 1,768
T	Měď	Constantan	38.7	-270-400

Chromel = Ni; 10 % Cr

Nicrosil = Ni; 14,4 % Cr; 1,4 % Si; 0,1 % Mg

Nisil = Ni; 4,4 % Si; 0,1 % Mg

Constantan = Ni 45 %; Cu 55 %

Alumel = Ni; Al 2 %, Mn 2 %, 1 % Si

[2]

Vlivy na měření

Chyby v měření termočlánků typu R a S jsou výsledkem mechanického namáhání, kontaminace a drift rhodia. Proto by už při konstrukci měřeného zařízení měl být brán v potaz požadavek na snížení mechanického namáhání termočlánku. Termočlánek, jehož materiál je

napjatý v důsledku např. mechanického ohýbání lze opravit jeho vyžiháním. [2] [6]

Zdaleka nejčastější příčinou chyby termočlánu je znečištění a často vede ke konečnému mechanickému selhání vodičů. Prvky jako Si, P, Pb, Zn a Sn se kombinují s platinou a vytvářejí eutektikum s nízkým bodem tání a způsobují rychlé zkřehnutí a mechanické selhání vodičů termočlánu. Prvky jako Ni, Fe, Co, Cr a Mn ovlivňují napětí vznikající uvnitř termočlánu a kontaminace těmito prvky nevede k vážnému mechanickému ani chemickému poškození drátu a může být detekována pouze pravidelnou kontrolou přesnosti měření termočlánu. Znečištění lze zabránit pečlivou manipulací s použitými materiály při výrobě termočlánu a použitím účinného žáruvzdorného opláštění. Před použitím je třeba zabránit kontaktu nečistot, mastnoty, oleje nebo měkké pájky s drátem termočlánu. Pokud atmosféra obklopující plášť termočlánu obsahuje nějaké kovové páry, musí plášť sloužit jako izolant od těchto par. [3]

Drift rhodia

Drift rhodia znamená, že rhodium přechází z rhodiového vodiče na vodič platinový. Přenos kovu je možný, protože oxid rhodia (oxid rhoditý) se odpařuje při teplotě 1200 °C a plyn difunduje do chladnějších oblastí, kde kondenzuje. Není příliš stabilní, a jakmile je disociován, rhodium kontaminuje platinový vodič. Přítomnost oxidu rhodia můžeme pozorovat jako černou skvrnu, která vymezuje oblast teploty od 800 °C do 1200 °C. Skvrny můžeme odstranit zahřátím termočlánu na vzduchu na teplotu 1450 °C.

Omezení proudění rhodia se snažíme dosáhnout několika metodami. První možností je fyzické zabránění pomocí keramické vrstvy. Další metodou zabránění driftu je zabránění styku kyslíku a rhodia, díky čemuž nemůže vznikat oxid. Velmi nízký obsah kyslíku ale naopak může destabilizovat jiné neškodné oxidy a redukovat je na škodlivé kontaminanty, například křemík. Rychlost driftu rhodia závisí na teplotě a geometrii termočlánu.

Je doporučováno, aby nové termočlánky byly častěji recalibrovány, aby byla zjištěna rychlost driftu a tím pádem i životnost termočlánku. Různé formy kontaminace nebo přesun rhodia mohou mít za následek dehomogenizaci a změnu délky vodiče. Nehomogenita je často důsledek nemožnosti opětovné recalibrace a také může vysvětlit rozdíly pozorované při porovnání výsledků z různých kalibračních metod a laboratoří.

Různé délky měřících vodičů způsobí, že se v termočlánku nebude vytvářet správné napětí, díky čemuž nebude možné přesně určit měřenou teplotu. [1]

Termočlánky z drahých kovů

Použití termočlánků typů B, R a S je poměrně nákladné a obvykle se používají pouze tehdy, je-li to nezbytné pro jejich teplotní rozsah nebo jejich relativně vysokou odolnost proti chemickému napadení. Jejich horní teplotní limit je 1500 °C pro dlouhodobé používání nebo 1650 °C pro přerušované aplikace. Pro srovnání typ K je vhodné využívat pro dlouhodobé používání do 1100 °C a pro přerušované měření je hraniční hodnota 1300 °C.

Termočlánky typu B jsou méně náchylné k rhodiovému driftu než typy R nebo S, ale typ B má nižší produkované termoelektrické napětí než R a S a měření s ním není tak přesné.

Termočlánky z ušlechtilých kovů mohou být také použity pro měření kryogenních teplot. Železo-zlato / nikel-chrom nebo železo-zlato lze použít pro teploty od 1 °K do 300 °K

Termočlánky z ušlechtilého kovu se často používají ve formě kovového plátování². [3][6]

² Plátování je potahování či pokrývání kovového předmětu jiným, obvykle ušlechtilejším nebo krásnějším kovem (zlato, stříbro). Plátování se provádělo třemi základními způsoby.

K dispozici je celá řada termočlánků z drahých kovů. Tyto typy jsou založeny pouze na platině a rhodiu. Zlato, iridium, jiné „platinové kovy“ a stříbro se také používají, ale ne v takovém množství.[2]

Materiály termočlánků jsou však vybírány podle některých důležitých charakteristik: maximální citlivost v celém provozním rozsahu, dlouhodobá stabilita včetně odolnosti za vysokých teplot, cena a kompatibilita s dostupným přístrojovým vybavením. Nejčastější termočlánekové materiály jsou kovové slitiny se dvěma nebo více složkami pro dosažení požadovaných charakteristik v daném teplotním rozsahu. Například platina může být kombinována s jinými kovy, což značně ovlivňuje hodnotu Seebeckova koeficientu, jak je uvedeno v tabulce 3. [2]

Tabulka 3 Prvky a jejich vliv na Seebeckův koeficient v kombinaci s platinou [2]

Platina s	Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Platina s	Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Křemíkem	440	Zlatem, stříbrem, mědí	6.5
Germaniem	300	Rtutí	0.6
Železem	18.5	Niklem	-15
Wolframem	7.5	Konstantanem	-35

Další zařízení pro měření teploty

Odporová teplotní čidla

Detektor odporové teploty nebo RTD (Resistance Temperature Detector) je senzor, jehož odpor se mění s teplotou. Je typicky postavený z platinového (Pt) drátu ovinutého kolem keramické cívky. RTD vykazuje

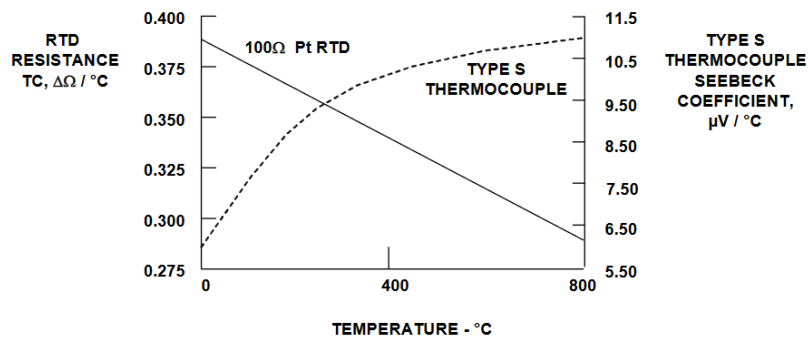
1. Prosté ovinutí vlastního předmětu zlatým, stříbrným drátem nebo plechem. Např. jehlice, spony, rukojeti dýky nebo meče a podobně.

2. Obložení nebo ovinutí celého předmětu, případně jeho části, tenkým plechem, jehož konce byly nějakým způsobem spojeny – sklepany, zachyceny přehnutím, spájením, někdy rovněž spojeny nýtováním (např. některé záušnice).

3. Vbitím jemného zlatého (stříbrného) jemného plechu (folie) na zdrsňený povrch předmětu, na němž díky přilnavosti ulpěl.

[5]

chování, které je přesnější a lineárnější v širokých teplotních rozsazích než u termočlátku.[10]



Obrázek 4 Porovnání termočlátku a odporového čidla [10]

Obrázek 4 zobrazuje teplotní koeficient 100 Ω RTD a Seebeckův koeficient termočlátku typu S. V celém rozsahu (přibližně -200 °C až +850 °C) je RTD lineárnějším zařízením. Linearizace RTD je tedy méně složitá. [10]

Na rozdíl od termočlátku je však RTD pasivním senzorem a pro vytvoření výstupního napětí vyžaduje buzení proudem. Nízký teplotní koeficient RTD (0,385 Ω/ °C) vyžaduje podobné vysoce výkonné loggery pro zpracování signálu, jaké používá termočlánek. Úbytek napětí na RTD je však mnohem větší než výstupní napětí termočlátku. Člověk, který bude provádět měření, se může rozhodnout pro RTD na základě toho, že je měření s odporovým čidlem přesné, ale na druhou stranu je při tomto způsobu měření velká doba odezvy. Další hledisko, podle kterého by se mělo rozhodovat při výběru mezi termočlátkem a RTD senzorem je to, že RTD je vyroben z platinového vodiče, a proto má i daleko vyšší pořizovací cenu. Na druhou stranu pro RTD hovoří to, že odpor je funkcí absolutní teploty, což znamená, že RTD nevyžadují žádnou kompenzaci za studena. [10]

Chyby v měření odporovým čidlem

Při měření odporovým čidlem je potřeba postupovat opatrně, pomalu a obezřetně, protože proud procházející vodičem v RTD způsobuje zahřívání. Toto samoohřívání mění teplotu RTD a objeví se jako chyba měření. Proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost návrhu podmínek měření tak, aby se

samoohřívání udržovalo pod 0,5 °C. Výrobci specifikují chyby samovolného ohřevu konkrétních senzorů pro různé hodnoty v nehybném a tekoucím vzduchu. Aby se snížila chyba způsobená samovolným ohřevem, měl by být použit minimální proud, který teče měřidlem a je zapotřebí pro zjištění hodnoty odporu, který vede k přijatelné době odezvy. [10]

Dalším účinkem, který může způsobit chybu měření, je pokles napětí ve vodičích RTD. To je obzvláště kritické u nízkohodnotových dvouvodičových RTD, protože teplotní koeficient i absolutní hodnota odporu RTD jsou malé. Pokud je senzor umístěn ve velké vzdálenosti od obvodů pro úpravu signálu, pak může být vyvolat změny odporu měřidla v řádech až desítek ohmů. Jen malá změna odporu senzoru může způsobit poměrně velkou chybu v měření teploty. Pro ilustraci tohoto bodu může sloužit to, že vodiče vedoucí elektrický proud do ovladače s displejem mohou mít odpor až 0,105 Ω /stopu, což může do měření vnášet značné chyby. [10]

Termistor

Podobně jako RTD jsou termistory levnými teplotně citlivými odpory a jsou konstruovány z pevných polovodičových materiálů, které vykazují kladný nebo záporný teplotní koeficient. Ačkoli jsou k dispozici zařízení s kladným teplotním koeficientem, nejčastěji používanými termistory jsou termistory se záporným teplotním koeficientem. Termistor je vysoce nelineární, ale je velmi přesný. [11]

Základním materiálem termistorů jsou oxidy kovů (Mn, Fe, Co, Ni, ...), které jsou po rozemletí na prášek doplněny různými příměsemi a pojivy a poté lisovány v přesných formách za vysokého tlaku do předepsaných tvarů a následně spékány při teplotě přesahující 1000 °C, zahrnující též procesy stárnutí a stabilizace elektrických parametrů. Tato technologie je velmi citlivá na přesné dodržení výrobních podmínek, složení hmot i na čistotu surovin. I při využití nejmodernějších výrobních postupů je při výrobě

termistorů třeba počítat s poměrně značným rozptylem jejich elektrických parametrů, k němuž přispívají také vlastnosti polovodičových materiálů, z nichž jsou termistory vyráběny. Zúžení rozptylu elektrických parametrů se docílí vyměřováním do předem stanovených typových skupin a podskupin. [11]

Příklady materiálů používaných na výrobu termistorů (polovodičových senzorů):

MnCO_3 , NiO , CuO , ZnO , Co_3O_4 , Fe_2O_3 , TiO_2 [22]

Negastor

(se záporným teplotním součinitelem odporu) - s rostoucí teplotou jeho odpor klesá, neboť roste vodivost, a tedy i proud. Užívá se k měření teploty (při můstkovém zapojení je možno měřit až s přesností 10^{-4} K), k určování velikosti rychlosti proudění tekutin (tekutina proudí, ochlazuje ho a je tedy možné určit velikost rychlosti proudění), převodník teplota – napětí (při měření teploty na počítačích), v obrazovkách (zabraňuje žhavicímu vláknu se přehřát při zapnutí počátečním velkým proudem – je zapojen s vláknem v sérii, čímž část tepla vzniklého průchodem proudem „absorbuje“). [12]

Pozistor

(s kladným teplotním součinitelem odporu) - s rostoucí teplotou roste odpor, přičemž roste mnohem rychleji než u kovů. Užívá se v elektrických troubách a vařičích ke stabilizaci napětí (v troubách se požaduje konstantní teplota – při náhodném zvýšení napětí vzroste proud, pozistor se zahřeje a zvětší se jeho odpor, následkem čehož se přerozdělí napětí a zmenší se výchylky proudu a napětí na spirále; analogicky funguje při poklesu napětí), zabraňuje spálení motorů, indikuje vzrůst nebo pokles teploty, využívá se v termostatech („hrubé“ rozdíly zpracuje pozistor, zbytek doladí termistor). [12]

Závislost odporu termistoru na teplotě je silně nelineární a lze ji vyjádřit přibližným vztahem (2):

$$R = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2)$$

Kde R je elektrický odpor [Ω], A geometrická a materiálová konstanta [Ω], B teplotní konstanta [K] a T je teplota [K].

Konstanta A se v katalozích neuvádí, termistor bývá charakterizován svou citlivostí B a odporem R_0 při teplotě T_0 . Obvykle se uvádí odpor při teplotě 25 °C. Vztah je proto vhodné přepsat do tvaru (3):

$$R = R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3)$$

Kde R_0 je elektrický odpor při teplotě T_0 [Ω], T_0 počáteční teplota [K], R elektrický odpor při teplotě T [Ω], T teplota termistoru [K], B teplotní konstanta [K].

Konstantu B , jejíž hodnota se pohybuje v rozsahu 1500 až 7000 K, lze určit buď z katalogu, nebo měřením. [13]

Vysoká citlivost termistoru na teplotu však nepřichází zadarmo. Termistorové aplikace jsou v nejlepším případě omezeny na několik stovek stupňů, protože jsou náchylnější k poškození při vysokých teplotách. Ve srovnání s termočládky a RTD jsou termistory konstrukčně křehké a vyžadují pečlivé montážní postupy, aby se zabránilo rozdrčení nebo separaci spojů. I když doba odezvy termistoru je vzhledem k jeho malé velikosti krátká, díky své malé tepelné kapacitě je velmi citlivý na chyby samovolného zahřívání. [10]

Termostat

Termostat je kontaktní elektromechanický teplotní senzor nebo spínač, který v zásadě sestává ze dvou různých kovů, jako je nikl, měď, wolfram nebo hliník atd., které jsou spojeny dohromady a vytvářejí bimetalický pás. Různé rychlosti lineární expanze dvou odlišných kovů způsobují mechanický ohybový pohyb, když je pás vystaven teplotě. [14]

Bimetalický pásek může být použit jako elektrický spínač nebo jako mechanický způsob ovládní elektrického spínače v termostatických regulacích a je používán rozsáhle k regulaci ohřívacích prvků teplé vody v kotlích, pecích, zásobnících teplé vody i ve vozidle. chladicí systémy chladičů. [14]

Termostat se skládá ze dvou tepelně odlišných kovů přilepených zády k sobě. Když je zima, kontakty jsou sepnuty a obvodem prochází proud. Když se zahřeje, jeden kov se rozpíná více než druhý a spojený bimetalový proužek se ohýbá nahoru (nebo dolů) a otevírá kontakty, čímž zabraňuje průchodu proudu. [14]

Existují dva hlavní typy bimetalických proužků založené hlavně na jejich pohybu, v případě vystavení změnám teploty. Existují typy „snap-action“, které vyvolávají okamžitou akci typu „ON / OFF“ nebo „OFF / ON“ na elektrických kontaktech v nastaveném teplotním bodě, a pomalejší typy „creep-action“, které postupně mění svou polohu, jak se teplota mění. [14]

Materiály pro upevnění termočlánků

Polyimid

Tento materiál, stejně jako teflon, bude použit pro připevnění termočlánků k vodiči. Proto jim budou věnovány následující kapitoly.

Polyimid je druh makromolekulárního polymeru obsahujícího cyklickou imidovou skupinu v molekulárním řetězci. (Polyimid, označovaný jako PI). Výzkum, vývoj a využití polyimidu byly nedávno uvedeny jako jeden z nejslibnějších technických plastů v 21. století. Polyimidový materiál má

vynikající vysokou teplotní odolnost, vysokou pevnost, vysokou odolnost proti tečení, vysokou rozměrovou stabilitu, nízký koeficient tepelné roztažnosti, vysokou elektrickou izolaci, nízkou dielektrickou konstantu a ztrátu, radiační odolnost, odolnost proti korozi a další výhody.[16]

Polymer je definován jako velká síť molekul, které se skládají z mnoha opakujících se jednotek. Polyimid je specifický typ polymeru, který se skládá z imidových monomerů. Polyimidy jsou vysoce žádoucí pro svou tepelnou odolnost, mechanickou pevnost a izolační vlastnosti. [17]

Imid a polyimid

Pro správné pochopení toho, co je polyimid, je třeba nejprve porozumět jeho chemickému složení. Imid je funkční skupina sestávající se ze dvou acylových skupin navázaných na dusík. Imidy jsou vysoce polární, což jim poskytuje dobrou rozpustnost v polárních médiích. [17]

Výroba polyimidu probíhá ve dvou operacích. První z nich je vytvoření kyseliny polyamové, která vznikne přidáním dianhydridu do diaminu v dipolárním rozpouštědle (Dimethylacetamidu, dimethylformamid). [18]

Druhou operací je imidiazace, během které dojde k odštěpení molekul vody a uzavření řetězců. Tu je možno provádět tak, že se postupně zvyšuje teplota, nebo chemickou cestou. Tento postup by se dal shrnout tak, že při přípravě polyamidových nanovláken se zvláknuje roztok kyseliny polyamové a tato vrstva podstupuje imidizaci. [18]

Vlastnosti polyimidu

Většina polyimidů má oranžovou nebo žlutou barvu a poskytuje vynikající tepelnou stabilitu, mechanickou pevnost, elektrické vlastnosti a dobrou chemickou odolnost. [17]

Nedávno byly představeny novější generace bezbarvých polyimidů (CPI), které vykazují vysokou propustnost a nízký žlutý index pro lepší čistotu. [17]

K polyimidovým matricovým pryskyřicím se často přidávají vyztužení z grafitu nebo ze skleněných vláken, aby se vytvořily pokročilé kompozitní materiály s působivými poměry pevnosti a hmotnosti. [17]

Historie používání

Polyimid byl poprvé ohlášen v roce 1908, ale vzhledem k úrovni znalostí v té době se mu nedostávalo dostatečné pozornosti. Polyimid nebyl v některých patentech zmíněn ve 40. letech 20. století, kdy byly polymery poprvé uznány světem. V 50. letech 20. století se polyimid jako druh polymerního materiálu začal vyvíjet. S vývojem doby a rostoucí poptávkou po vysoce výkonných materiálech se polyimid stal v posledních letech hotspotem výzkumu díky svým vynikajícím komplexním vlastnostem.[19]

Polyimidová (kaptonová) páska

Polyimidová páska je silikonová lepicí páska s polyamidovou bází, vyvinutá společností DuPont na konci 60. let, která zůstává stabilní v širokém rozsahu teplot (od -269 °C do 400 °C / od - 452 °F do 752 °F). [9]

Polyimidová páska nabízí vynikající odolnost vůči teple a je navržena pro použití na řadě elektrických zařízeních. [9]

Páska má ideální dielektrickou pevnost, je vhodná pro pájení vlnou, izolaci desky plošných spojů a práškové lakování při vysokých teplotách. Polyimidová páska má silikonové lepidlo, které nezanechává žádné zbytky. Páska je tepelně odolná i při vysokých teplotách nezměkne. Obecně se doporučuje ji používat jako ochranu různých součástí před vysokými teplotami. Jako příklad lze uvést izolování při svařování. Polyimid se používá mimo jiné na flexibilních plošných spojích (flexibilní elektronika) a termických příkrývkách používaných v kosmických lodích, satelitech a různých kosmických nástrojích. [9]

Použití

Kosmická loď

NASA Jet Propulsion Laboratory považovala polyimid za dobrou plastovou podporu pro solární plachty kvůli jeho dobré odolnosti proti kosmickému

prostředí. V kosmické lodi NASA New Horizons použila polyimid v inovativní „izolované konstrukční láhvi“, aby udržovala plavidlo v provozu mezi 10 °C až 30 °C (50–86 °F) po dobu více než devíti let a tří miliard mil dlouhé cestě směrem k trpasličí planetě Pluto, kam dorazila 14. července 2015. Hlavní tělo lodi je pokryto lehkou, pozlacenou vícevrstvou tepelnou izolací – jako přikrývka – která udržuje elektroniku na provozní teplotě a zároveň udržovala v teple celou loď. Vrstva se skládá z polyimid a mylarové fólie. [9]

Rentgen

Polyimid se také běžně používá jako materiál pro okna všech druhů rentgenových zdrojů (synchrotronové světelné čáry a rentgenové trubice) a rentgenové detektory. Jeho vysoká mechanická a tepelná stabilita a vysoká propustnost pro rentgenové záření z něj činí preferovaný materiál. Je také relativně necitlivý na radiační poškození. [9]

3D tisk

Polyimid fólie se také hojně používá v 3D tisku jako podložka, na kterou se nanáší tištěný materiál. Fólie funguje jako tepelný izolant mezi horkým materiálem a chladnější podložkou. Opodstatnění je v tom, že když se materiál rychle ochladí vlivem podložky, rychle se smrští a v tištěném výrobku mohou vznikat vady. To se při použití polyimidu nestane díky jeho dobré tepelné izolaci. [9]

Zpracování plastů

Polyimidová páska se také běžně používá k zajištění součástí, jako jsou termočlánky na horkém konci stroje na vytlačování plastů. To pomáhá zabránit odpojení termočlánků, což může vést k nekontrolovatelnému přehřátí trysky a požáru.[9]

Teflon

Teflon není oficiální název této látky, ale pouze obchodní označení pro polytetrafluoretylen (PTFE nebo PF). Jedná se o velmi významný plast ze

široké skupiny fluorových polymerů. PTFE je krystalický polymer bílé barvy.

Jeho charakteristickou vlastností je vysoká molekulová hmotnost. Jeho řetězec je tvořen pouze atomy uhlíku a fluoru. Vazba mezi těmito atomy je velmi pevná, což určuje jeho charakteristické vlastnosti, kterými jsou:

- vynikající chemická odolnost
- výborná odolnost proti vysokým teplotám
- výborné dielektrické vlastnosti
- odolnost proti stárnutí – nízká nasákavost a odolnost proti rozpouštědlům
- dobré kluzné vlastnosti.

Používá se v mnoha průmyslových odvětvích, zejména tam, kde jsou kladeny vyšší požadavky na vlastnosti použitého materiálu. Mimo výše uvedené vlastnosti patří k jeho přednostem také fyziologická nezávadnost v rozsahu obvyklých pracovních teplot, nepatrná adheze a výborné těsnící účinky. [20]

Příklady použití

Materiál pro výrobu součástí do silně korozivních nebo tepelně náročných prostředí, k výrobě trubek, pístních kroužků, membrán, k výrobě izolací pro dráty a kabely vystavené vysoké teplotě, povrchové úpravy kovů. [20]

Tepelná stabilita

Výrobky z teflonu jsou hydrofobní, bez chuti a zápachu, zdravotně nezávadné v rozsahu teplot od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotách nad $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ nastává tepelný rozklad, přičemž jeho zplodiny jsou jedovaté. Vznik jedovatých zplodin může také nastat při obrábění za nevhodných podmínek. Při teplotě $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ nastává měknutí a přechod z krystalického do amorfního stavu za současné objemové změny.

Od 380 °C intenzita rozkladu roste a zdatelně se začíná rozkládat teprve při teplotách od 400 °C.

Při těchto teplotách vzniká řada perfluorolefinů a dalších štěpných produktů (tetrafluorethylen, hexafluorocyklo–propan, hexafluorpropen, oktafluorocyklo–propan, silně toxický perfluorisobutylen). Téměř všechny jsou toxické.

Jedna z výhod teflonu je i to, že se dá použít i za velmi nízkých teplot (několik desítek °C pod bodem mrazu), kdy neztrácí své pružné vlastnosti. [20], [21]

Zápalnost

PTFE patří mezi nejméně hořlavé plasty. Jeho zápalná teplota na vzduchu začíná od hodnoty 575 °C. Pokud se dostane do kontaktu s přímým plamenem, vzniká se v důsledku plynných rozkladných produktů a po odstranění zápalného plamene se hoření zastaví. [20]

Elektrické vlastnosti

PTFE má velmi dobré elektroizolační vlastnosti, které jsou jen málo závislé na teplotě a frekvenci. Průrazné napětí je vyšší než 10 kV/mm. [20]

Chemická odolnost

Jeho chemická odolnost je tak vysoká, že PTFE převyšuje všechny ostatní polymery. Teflon odolává jak kyselinám (např. je stálý ve vroucí kyselině dusičné, lučavce královské ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$), která se používá pro rozpouštění zlata), tak zásadám, solím, rozpouštědlům, a to i za zvýšených teplot.

Naproti tomu není odolný proti roztaveným alkalickým kovům, elementárnímu fluoru, roztoku sodíku v kapalném amoniaku a některým organokovovým sloučeninám alkalických kovů. U plněných materiálů je chemická odolnost závislá na druhu použitého plniva. [20]

Fyzikální vlastnosti

PTFE má ve srovnání s jinými druhy polymerů dobrou pevnost za vyšších teplot a dostatečnou pružnost při velmi nízkých teplotách. Dále disponuje

velmi dobrou vrubovou a rázovou houževnatostí v širokém rozsahu teplot. Při tlakovém zatížení se nedrtí, ale má sklon k tečení.

Z tohoto důvodu se nedoporučuje pro trvalé zatížení převyšovat napětí, které odpovídá 10 % ze zjištěné pevnosti při dané teplotě. Pevnost v tahu je vyšší než 12 MPa a tažnost je větší než 150 %.

Hustota je $2,15 - 2,25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Nasákavost ve vodě nenastává a součásti z teflonu nemění své rozměry ani po dlouhodobém uložení ve vodě. [20]

Další vlastnosti

Velmi dobrá odolnost proti povětrnostním vlivům a mikroorganismům. Je fyziologicky nezávadný i při implantaci do živé tkáně. Při delším působení a za vyšší intenzity radioaktivního záření, nastává degradace materiálu. [20]

Praktická část

Cíl experimentu

Jak je uvedeno v úvodu, práce vzniká ve spolupráci s externí laboratoří (kompetenčním centrem), které se zabývá měřením a výzkumem konektorů a elektrických obvodů.

Návrh experimentu vychází ze skutečnosti, že při měření teploty obvodu termočlánkem záleží na mnoha okolnostech, jako např. čím a jak je termočlánek upnutý k vodiči nebo měřené součásti, protože tyto součástky bývají často velmi malé, což znamená, že samotné upnutí vyžaduje určitou zručnost. Dalším problémem je, že není ověřeno, jak moc ovlivňuje termočlánek elektrický proud, který protéká měřeným obvodem. Dalším faktorem je požadavek, aby se upínací materiál nechoval jako teplotní izolátor mezi termočlánkem a měřeným obvodem.

Popis měření

Experimentální materiál zajistila externí laboratoř se specializovaným vybavením, ve které probíhal i celý experiment. V této laboratoři byla pomocí klimatizace udržována stálá teplota vzduchu 22 °C.

Pro měření byl sestaven zkušební obvod, do kterého je možné zapojit najednou až sto termočlánků. V tomto obvodu byl použit Data Logger GraphTec midi Logger GL 820 a napájení bylo zajištěno zdrojem Delta elektronika SM 66 – AR – 110. Použitý termočlánek byl typu K, jehož přesnost závisí na měřené teplotě. Obecně platí, že chyba v měření tímto typem termočlánku se rovná 0,4 % naměřené hodnoty, což pro naměřenou teplotu 60 °C znamená chybu 0,24 °C.

Měření bylo prováděno na padesáti termočláncích typu K, přičemž na prvních deseti vzorcích se termočlánek přímo dotýkal kovové části a byl v přímém kontaktu s materiálem, kterým protékal proud. Termočláanky byly k vodiči připevněny pružnou, teflonovou páskou. Dalších deset

termočlánků bylo přiděláno podobným způsobem. Jediný rozdíl byl v tom, že mezi měřícím svarem termočlánu a vodivým kovem byla přidána ještě jedna vrstva teflonové pásky. Důvodem tohoto postupu byla snaha o to, aby nebyl termočlánek ovlivněn proudem, který protéká obvodem. Použitá teflonová páska má rozměry 12 m × 12 mm × 0,1 mm, 60 g/m². V praxi se často používá zejména z ekonomických důvodů a také proto, že je jednoduché s ní manipulovat. Při práci v laboratoři, kde je potřeba připevňovat termočlánky po desítkách je vhodná zejména proto, že se dá trhat prsty a nemusí se používat nůžky nebo nějaký jiný nástroj k dělení a také nelepí. Na vodiči drží pouze díky své pružnosti. Na další sadu vzorků byla použita kaptonová (polyimidová) páska. Tato páska byla použita podobným způsobem jako teflonová. Stejně jako při použití teflonové pásky, tak i u kaptonové bylo nejprve deset termočlánků připevněno přímo na kov s elektrickým proudem.

Dalších deset termočlánků bylo od krimpů (lisovaného spojení drátu a terminálu) odděleno jednou vrstvou teflonové pásky. Důvodem, proč nebyla k izolaci použita také kaptonová páska je to, že se používá právě pro její tepelně izolační vlastnosti. Kdybychom ji použili k izolaci mezi termočlánkem a obvodem, nebyly by ovlivněny naměřené hodnoty, jelikož by teplo nepřešlo od obvodu k termočlánu. Kaptonová páska je oproti teflonové náročnější na zručnost osoby, která s ní pracuje. Rozdíl mezi nimi je ten, že kaptonová páska je lepící a po delším kontaktu lidské kůže a lepidla, přestává lepidlo lepit. Dále je také nutno pásku stříhat, takže samotné připevňování termočlánu zabere delší dobu a také je občas potřeba již hotové vzorky po několika minutách od nalepení pásky zkontrolovat, zda se konec neodlepí a případně vzorky opravit. Výhodou pásek ale je, že spojení provedené pomocí nich jsou pevná a např. během vibračních zkoušek je jistota, že budou termočlánky stále dobře držet. Hlavní nevýhodou je, že pracovník, který s páskami pracuje, potřebuje čas na to, aby se tento úkon naučil.

Další metodou upnutí, která byla v měření použita, byla metoda s použitím dvousložkového epoxidu LOCTITE 9497. Výrobce udává, že toto lepidlo je vysoce teplotně vodivé. Jeho nevýhodou je to, že pro zatvrdnutí je potřeba ho teplotně vytvrdit.

Všechny naměřené hodnoty byly porovnávány s referenčními hodnotami získanými z měření odporovým měřidlem typu Pt100.

Celý tento obvod byl uložen v ochranném plastovém boxu, který zamezí proudění vzduchu. Ani tento fakt by neměl vnášet do měření chyby, navzdory tomu, že bude termočlánek s největší pravděpodobností mírně ochlazován okolím. Protože cílem měření nebylo získat informace, jak se obvod zahřívá, ale jak přesně je teplota měřena, byl jev ochlazování na měření zanedbán.

Termočlánky byly k obvodu připevněny v místě, kde se pomocí dvou kovových součástí zvaných terminály spojují dva vodiče, na které byly tyto součástky nalisované. Terminály se dělí do dvou skupin – Male (samec) a Female (samice) a jsou navrženy tak, aby došlo k vodivému spojení. Právě v místě styku těchto dvou součástí dochází k největšímu oteplení.

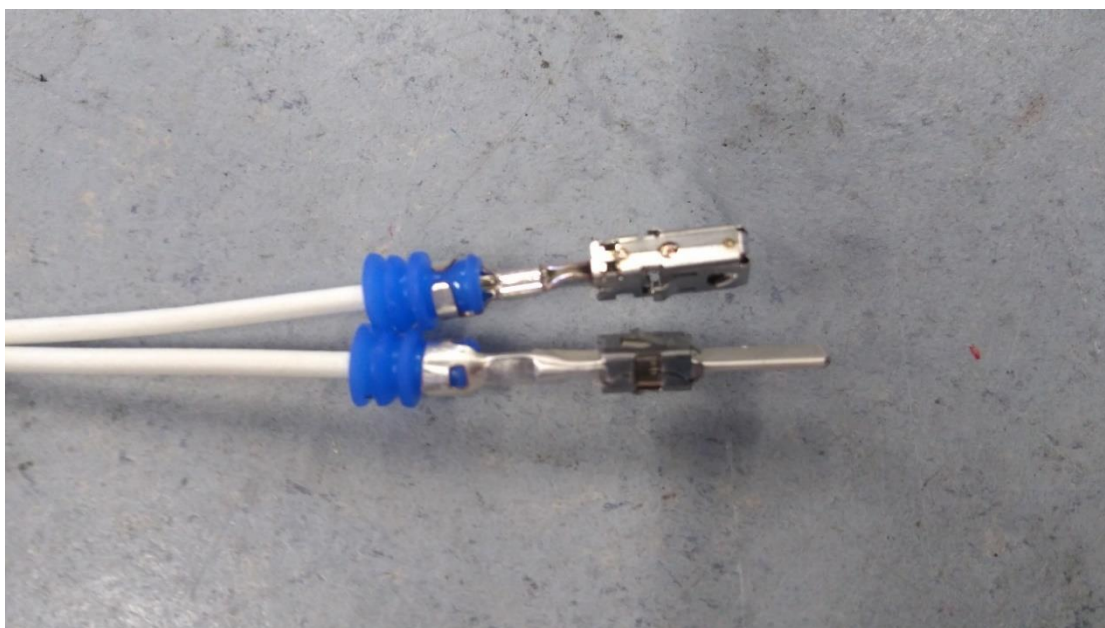
Příprava vzorků

Jak už bylo psáno výše, pro měření bylo nejprve potřeba sestavit obvod, na kterém bylo měření prováděno. Tento byl složen z padesáti spojů terminálů typu male a female. Termočlánek byl vždy připojen k terminálu typu female, protože podle norem, které se vztahují k měření teplot uvnitř konektorů se měří teplota právě na tomto typu spoje. Vzorky byly zapojeny do série a vodiče zapleteny do kovového rámu tak, aby mezi vzorky byla stále stejná vzdálenost.



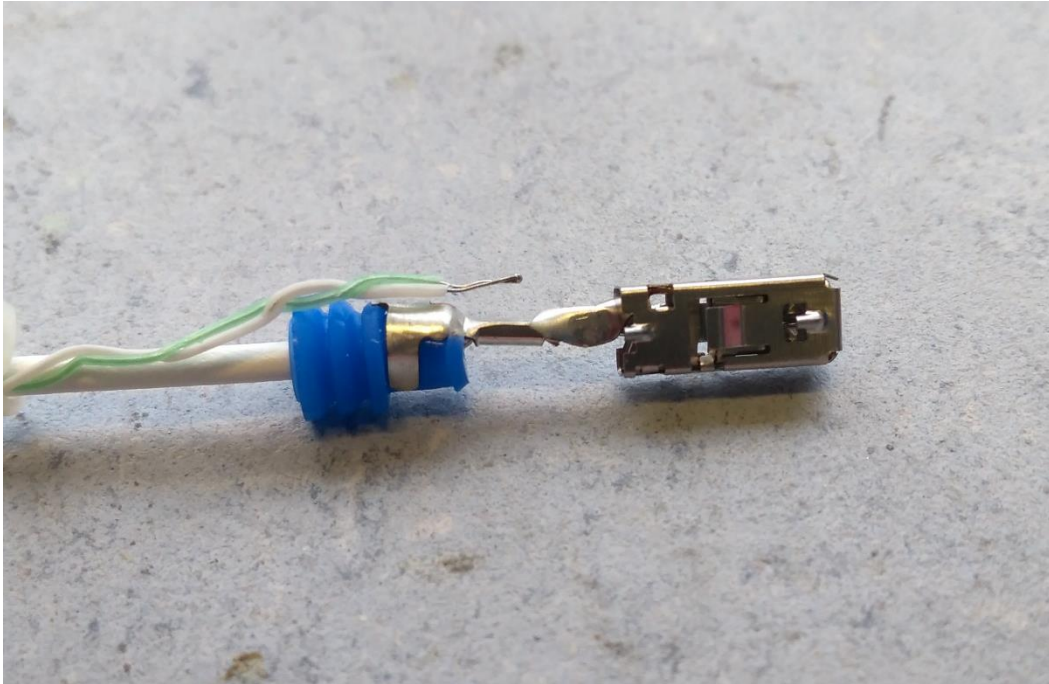
Obrázek 5 Vodič, ze kterých se skládá obvod

Terminály byly nalisovány na vodiče o délce 500 mm. Na jednom konci těchto vodičů byl umístěn terminál typu male a na druhém terminál typu female. Terminály byly dále osazeny modrým pryžovým těsněním, které zabraňuje tomu, aby se dovnitř konektorů dostávala okolo vodiče vlhkost a nečistoty (obrázek 5 a 6).



Obrázek 6 Terminály typu male a female

Po nalisování terminálů byly ke spojům (krimpům) připevněny termočlánky tak, jak je uvedeno výše, tedy přímo na kov pomocí teflonové a polyimidové pásky, s mezivrstvou a pomocí lepidla.

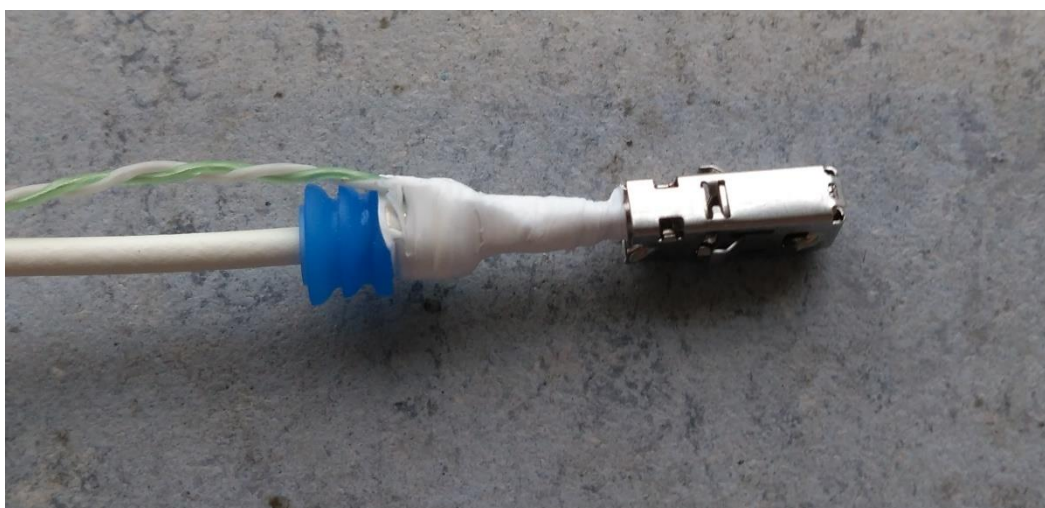


Obrázek 7 Terminál typu Female s termočlánkem

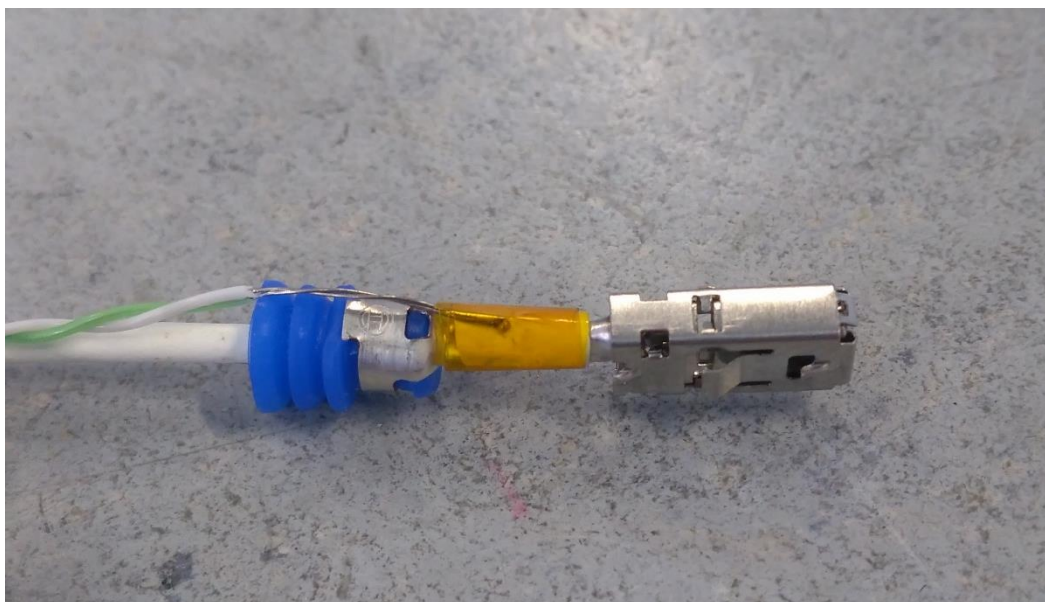
Obrázek 7 ukazuje termočlánek, který není nijak odizolován od kovu, kterým protéká elektrický proud.



Obrázek 8 Terminál s mezivrstvou a termočlánkem



Obrázek 9 Termočlánek připevněný teflonovou páskou



Obrázek 10 *Termočlánek připevněný polyimidovou páskou*

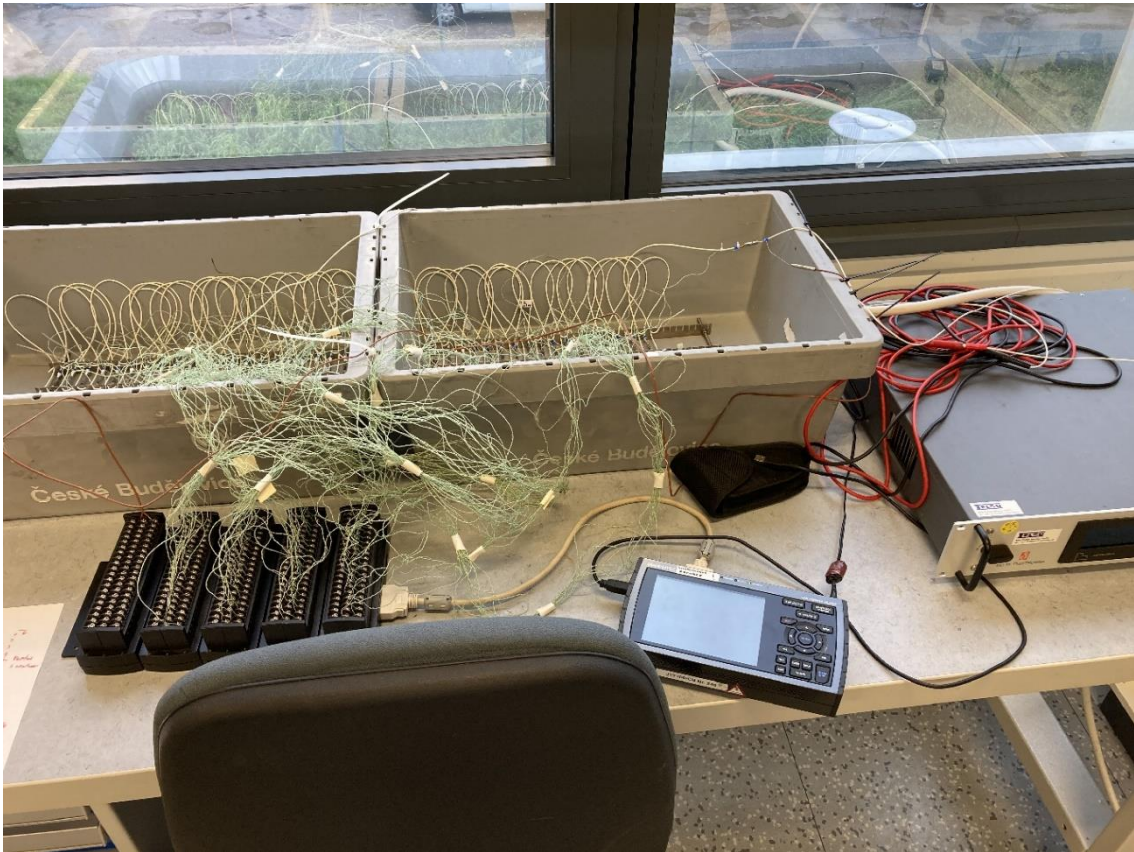


Obrázek 11 *Termočlánek připevněný lepidlem*

Příprava vzorků je detailně zdokumentována na obrázcích 7 - 11.

Takto připravené vzorky byly poskládány do obvodu a připojeny ke zdroji proudu. Dále byly připojeny do svorkovnice dataloggeru, do kterého se zaznamenávají hodnoty teploty (obrázek 12). Datalogger použitý pro měření má tu výhodu, že není potřeba znát přesnou délku každého

termočlátku. Stačí zadat typ (na základě toho přístroj ví, ze kterých kovů je termočlánek složen) a datalogger se za pomoci odporu každého termočlátku nastaví tak, aby bylo měření přesné.



Obrázek 12 Obvod připojený ke zdroji a dataloggeru

Jako referenční bylo na jeden termočlánek připojeno odporové měřidlo Pt100, které by nemělo být obvodem nijak ovlivněno a hodnota jím naměřená by měla být přesná.

Takto připravený obvod byl připojen ke zdroji elektrického proudu. Hodnota tohoto proudu byla během měření měněna, bylo možné sledovat, zda se při jiných hodnotách proudu nevyskytne v měření nějaká anomálie. Tyto hodnoty jsou 9 A a 13 A a byly vybrány na základě předchozích zkušeností s měřením. 13 A odpovídá teplotě okolo 100 °C. Vyšší proud nebyl použit z bezpečnostních důvodů. Hodnota 9 A způsobí ohřev na teplotu okolo 50 °C, tedy hodnotu přibližně poloviční.

Další parametr, který byl měněn, je polarita. Předpokládá se, že opačný směr proudu má vliv na naměřené teploty na termočláncích. Pro ověření tohoto předpokladu bylo měření pro každou hodnotu proudu provedeno dvakrát v opačné polaritě. Výsledkem tedy jsou 4 soubory s hodnotami.

Každé měření trvalo 30 minut a hodnoty se zaznamenávaly každých 30 sekund. Tímto postupem bylo z každého měření získáno 60 hodnot, ze kterých byla stanovena průměrná hodnota pro každé upnutí termočlátku a směrodatná odchylka.

Naměřené hodnoty

Výstupem z dataloggeru je soubor čísel v excelovských souborech. Tyto soubory jsou uvedeny v příloze. Dále jsou výsledky prezentovány formou již zpracovaných hodnot ve formě tabulek.

9 A, kladná polarita

Tabulka 4 Měření pro 9 A, kladnou polaritu

Číslo měření: 1			
Podmínky:			
Proud	9A		
Polarita	+		
Okolní teplota	22°C		
Vzorky	Průměrná hodnota [°C]	Průměrná směrodatná odchylka	Rozdíl mezi průměrnou a referenční hodnotou[°C]
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	53,09	0,39	1,72
Lepidlo (11-20)	51,86	0,33	0,49
Kaptonová páska na přímo (21-30)	56,61	0,38	5,24
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	62,58	0,61	11,21
Teflonová přímo (41-50)	59,40	0,49	8,03
Referenční PT100 (51)	51,37	0,32	-

Tabulka 4 reprezentuje měření při proudu 9 A a kladné polaritě. Naměřené hodnoty teploty se pohybují v rozmezí od 51,37 °C – 62,58 °C. Největší rozdíl mezi referenční a naměřenou hodnotou je při použití teflonové pásky s mezivrstvou.

9 A, záporná polarita

Tabulka 5 Měření pro 9 A, zápornou polaritu

Číslo měření: 2	
Podmínky:	
Proud	9A
Polarita	-
Okolní teplota	22°C

Vzorky	Průměrná hodnota [°C]	Průměrná směrodatná odchylka	Rozdíl mezi průměrnou a referenční hodnotou [°C]
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	53,01	0,60	1,46
Lepidlo (11-20)	51,90	0,52	0,34
Kaptonová páska na přímo (21-30)	56,52	0,64	4,96
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	61,86	0,91	10,31
Teflonová přímo (41-50)	58,99	0,79	7,44
Referenční PT100 (51)	51,55	0,47	-

Tabulka 5 je stejně jako tabulka 4 výstupem pro měření při 9 A. V tomto měření je ale použita opačná polarita a rozdíly mezi referenční hodnotou a sledovanými skupinami termočlánků nižší než při kladné polaritě.

13 A, kladná polarita

Tabulka 6 Měření pro 13 A, kladnou polaritu

Číslo měření: 3	
Podmínky:	
Proud	13A
Polarita	+
Okolní teplota	22°C

Buňky	Průměrná hodnota [°C]	Průměrná směrodatná odchylka	Rozdíl mezi průměrnou a referenční hodnotou [°C]
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	81,96	0,48	0,29
Lepidlo (11-20)	80,95	0,47	-0,72
Kaptonová páska na přímo (21-30)	88,82	0,55	7,15
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	99,87	0,74	18,20
Teflonová přímo (41-50)	95,91	0,46	14,25
Referenční PT100 (51)	81,67	0,30	-

Tabulka 6 ukazuje měření pro proud 13 A a kladnou polaritu. Lze sledovat, o kolik °C se obvod při této hodnotě proudu ohřál více než při nižším proudu.

13 A, záporná polarita

Tabulka 7 Měření pro 13 A, zápornou polaritu

Číslo měření: 4	
Podmínky:	
Proud	13A
Polarita	-
Okolní teplota	22°C

Buňky	Průměrná hodnota [°C]	Průměrná směrodatná odchylka	Rozdíl mezi průměrnou a referenční hodnotou
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	84,24	0,45	1,29
Lepidlo (11-20)	83,08	0,32	0,13
Kaptonová páska na přímo (21-30)	91,76	0,43	8,81
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	103,54	0,62	20,59
Teflonová přímo (41-50)	98,77	0,48	15,82
Referenční PT100 (51)	82,95	0,38	-

Tabulka 7 reprezentuje měření pro 13 A a zápornou polaritu. Letmým pohledem lze určit, že naměřené hodnoty jsou vyšší než v tabulce 6.

Vyhodnocení

Při prvním pohledu na výsledky měření (tabulka 4–7) je patrné, že od referenční hodnoty se nejméně liší hodnoty u termočlánků připevněných lepidlem. Toto platí ve všech případech kromě měření číslo 3, kde je nejbližší referenci skupina vzorků upevněná pomocí teflonové a kaptonové pásky.

Naopak nejvyšší rozdíl mezi referenční hodnotou a naměřenou je u teflonové pásky s mezivrstvou. Stejný trend lze sledovat i v hodnotách směrodatné odchylky, kde je patrné, že u lepidla má nejmenší hodnotu a u teflonové pásky s mezivrstvou nejvyšší.

Po tomto porovnání lze konstatovat, že nejpřesnější hodnoty bylo dosaženo, pokud byl termočlánek připevněn k vodiči pomocí lepidla.

Vliv polarity

Při pohledu na výsledné hodnoty je patrné, že se hodnoty měřené při stejném proudu a opačné polaritě mění. Pro ilustraci jsou hodnoty porovnány v tabulkách 8 a 9.

Tabulka 8 Vliv polarity -9 A

9 A				
Polarita:	+	-	rozdíl	Větší hodnota
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	53,09	53,01	0,08	+
Lepidlo (11-20)	51,86	51,90	-0,04	-
Kaptonová páska na přímo (21-30)	56,61	56,52	0,09	+
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	62,58	61,86	0,72	+
Teflonová přímo (41-50)	59,40	58,99	0,41	+
Referenční PT100 (51)	51,37	51,55	-0,19	-

*hodnoty ve [°C]

Tabulka 9 Vliv polarity – 13 A

13 A				
Polarita:	+	-	rozdíl	Větší hodnota
Kapton s vrstvou teflonu (1-10)	81,96	84,24	2,28	+
Lepidlo (11-20)	80,95	83,08	2,13	+
Kaptonová páska na přímo (21-30)	88,82	91,76	2,94	+
Teflonová s mezivrstvou (31-40)	99,87	103,54	3,67	+
Teflonová přímo (41-50)	95,91	98,77	2,86	+
Referenční PT100 (51)	81,67	82,95	1,28	+

*hodnoty ve [°C]

Z tabulek 8 a 9 je zřejmé, že vliv polarity není u nižšího proudu tak vysoký. U 9 A je rozdíl hodnot mezi polaritami minimální, ale u většiny skupin je hodnota teploty u kladné polarity vyšší. Předpoklad byl, že vliv bude patrný zejména u vzorků, kde je termočlánek v přímém kontaktu s krimpem. To se však nepotvrdilo. Naopak nejmenší rozdíl je vždy u skupiny připevněné lepidlem, i když tento rozdíl je oproti jiným skupinám minimální.

Z tabulky 9 je ale patrné, že rozdíly jsou při vyšším proudu a teplotách větší a nejnižší rozdíl je u referenční hodnoty, kde odporové čidlo není ovlivněno v takové míře jako termočlánky.

Závěr

V teoretické části práce bylo popsáno, jakými způsoby lze měřit teplotu. Dále byl vysvětlen princip jednotlivých měřících zařízení a zejména byl kladen důraz na měření termočlánkem. Bylo provedeno rozdělení termočlánků podle materiálů a použití. Pozornost byla také věnována popisu, jak může být měření termočlánkem ovlivněno a jaké jsou příčiny chyb v jeho měření. Dále práce hovořila o používaných polymerních

materiálech, které byly používány během měření. Zejména pak na jejich vývoj a použití.

V praktické části bylo provedeno měření teploty napájeného obvodu termočlánkem. Cílem práce bylo zjistit, zda je termočlánek ovlivněn magnetickým polem, které je způsobeno protékajícím elektrickým proudem a zda má na měření vliv, když se měřicí část termočlánku dotýká vodiče s proudem. V případě že by dotyk termočlánku a vodiče vliv na měření měl, by bylo potřeba dále zjistit, jak tento vliv nejlépe odstranit. Primárním cílem práce bylo zjistit, která z použitých metod upnutí nabízí nejpresnější výsledky a také zda má na naměřené hodnoty vliv polarita proudu.

Z měření byly vyvozeny následující závěry. Při porovnávání naměřených hodnot s hodnotami naměřenými referenčním měřidlem Pt100 se jako nejpresnější metoda jevila metoda s použitím tepelně vodivého lepidla. Rozdíl mezi referenčními a hodnotami naměřenými pomocí této metody upnutí byl ve všech případech minimální. Dalším zajímavým zjištěním bylo, že oproti předpokladu nemá vliv na měření, když se měřicí svar termočlánku dotýká měřeného povrchu, kterým prochází elektrický proud. Vliv na měření má ale polarita, kdy při jednom směru proudu jsou naměřené hodnoty vyšší než při opačném. Tento rozdíl se zvyšuje s vyššími hodnotami proudu, a tedy i s vyšším oteplením.

Doporučení plynoucí ze závěrů práce jsou následující:

Nejvhodnější metoda upnutí termočlánků je pomocí lepidla. Potřeba vytvrzení přibližně 30 minut v peci při teplotě okolo 200 °C může být komplikující a v některých případech i problematická.

Aby bylo zajištěno objektivních výsledků, je teplotu třeba měřit při obou polaritách proudu a hodnoty následně průměrovat.

Jako pokračování experimentální části této práce by bylo vhodné zjišťovat vliv zvyšování proudu na teplotní rozdíl při opačných polaritách a na výsledné oteplení.

Přílohy

Tabulka 10 Příklad výpisu z dataloggeru pro 9 A, kladnou polaritu

Number	Date&Time	ms	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
NO.	Time	ms	degC	degC	degC	degC	degC	degC
1	2020-06-17 13:23:38	000	51	54,5	52,7	51,1	52,6	52,3
2	2020-06-17 13:24:08	000	51,2	54,5	52,9	51,1	52,7	52,2
3	2020-06-17 13:24:38	000	50,8	54,3	53,1	51,1	52,8	52,4
4	2020-06-17 13:25:08	000	50,8	54,4	53	50,6	52,8	52,6
5	2020-06-17 13:25:38	000	51,3	54,5	53,2	50,8	52,9	52,8
6	2020-06-17 13:26:08	000	51,4	54,8	53,1	51,7	52,9	52,7
7	2020-06-17 13:26:38	000	50,7	54,6	52,9	51	52,9	52,6
8	2020-06-17 13:27:08	000	50,6	54,7	53	51,6	52,9	52,7
9	2020-06-17 13:27:38	000	51,7	55,2	53,4	52	53,1	52,7
10	2020-06-17 13:28:08	000	51,4	54,5	53,5	50,6	53,2	52,7
11	2020-06-17 13:28:38	000	51,2	54,8	53,4	51,4	53,2	52,6
12	2020-06-17 13:29:08	000	52	54,9	53,8	51,4	53,4	52,6
13	2020-06-17 13:29:38	000	52	55,1	53,7	51,5	53,5	52,9
14	2020-06-17 13:30:08	000	50,9	55,3	53,4	51,9	53,4	52,9
15	2020-06-17 13:30:38	000	51,9	55,1	53,8	51,5	53,6	53
16	2020-06-17 13:31:08	000	51,4	55,3	53,8	52,3	53,5	53,1
17	2020-06-17 13:31:38	000	51,8	54,9	53,9	51,4	53,5	52,9

Tabulka 10 je příklad tabulek, které byly vygenerovány dataloggerem. Kompletní tabulky (9AA, 9AB, 13AA, 13AB, Polarity) jsou na přiloženém CD jako soubory ve formátu Excel.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Seebeckův jev[4]	15
Obrázek 2 Nastavování referenční teploty[8].....	17
Obrázek 3 Graf závislosti teploty a napětí termočlánu typu K [2].....	19
Obrázek 4 Porovnání termočlánu a odporového čidla [10]	25
Obrázek 5 Vodič, ze kterých se skládá obvod	39
Obrázek 6 Terminály typu male a female	39
Obrázek 7 Terminál typu Female s termočlánkem	40
Obrázek 8 Terminál s mezivrstvou a termočlánkem	41
Obrázek 9 Termočlánek připevněný teflonovou páskou.....	41
Obrázek 10 Termočlánek připevněný polyimidovou páskou.....	42
Obrázek 11 Termočlánek připevněný lepidlem	42
Obrázek 12 Obvod připojený ke zdroji a dataloggeru	43

Citovaná literatura

- [1] TATARNIKOV, A. V., I. SOKOLSKAYA, Ya. M. SHNEERSON, A. Yu. LAPIN a P. M. GONCHAROV. Treatment of Platinum Flotation Products. *Platinum Metals Review*. vol. 48. 2004, 48(3), 125-132. DOI: 10.1595/147106704X1667. ISSN 00321400.
- [2] BOYES, Wa. *Instrumentation reference book*. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010. ISBN 978-0-7506-8308-1.
- [3] KREIDL, Ma. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [4] 1. *Konstrukce a funkce termočlánků*. Günther [online]. Most, 2019 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/805a74a9-7235-cdf2-2323-717e02f019e4?Edition=cz>
- [5] Povrchová úprava. *Web ústavu historie Slezské Univerzity – Přednášky...* [online]. Opava, 2011 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <http://uhm-prednasky.fpf.slu.cz/index.php?page=povrchova-uprava>
- [6] Termočlánky. *Jan Klepárník – podpora výuky* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [7] Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost – Portál pro strojní konstruktéry. *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
- [8] Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility. *Analog Dialogue* [online]. 2010, 2010(44), 2-5 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-44/number-4/articles/measuring-temp-using-thermocouples.pdf>
- [9] The multiple uses of Kapton™ tape. *Alltapesdepot* [online]. Elegant Themes, 2016 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://alltapesdepot.com/los-multiples-usos-de-la-cinta-kapton/>

- [10] ZUMBAHLENAS, Ha. *Linear circuit design handbook*. Boston: Elsevier/Newnes Press, c2008. ISBN 978-075-0687-034.
- [11] Polovodičové snímače teploty – termistory. *Automa*. 2015, 2015(01), 28-29.
- [12] Termistor: MEF. Fyzika:: MEF [online]. Praha: Reichl Ja., 2015 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/269-termistor>
- [13] *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Praha: HW server s.r.o, 2004 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [14] Temperature Sensors. *Basic Electronics Tutorials and Revision* [online]. ASPENCORE, 2019 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io__3.html
- [15] BUDÍN, P. *Vytvoření demonstrační sady: Fyzikální experimenty pro střední školy-měření teplot*. Brno, 2009. Diplomová práce. MUNI
- [16] Brief Introduction of Polyimide. *Suzhou Dwell Tape Technology Co., Ltd.* [online]. Wujiang: Deyou Tape Dwell.net.cn, 2018 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://www.dwell.net.cn/en/article-6427-7610.html>
- [17] What is a Polyimide? *Jayhawk Fine Chemicals Corporation* [online]. Galena, Kansas, USA: AZoNetwork, 2018 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.jayhawkchem.com/2018/01/15/what-is-polyimide/>
- [18] NEJEDLO, Lu. *Kompozitní filtrační a katalytické nanomateriály*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. TUL.
- [19] A flexible hydrogen sensor based on Pd nanoparticles decorated ZnO nanorods grown on polyimide tape. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Elsevier B.V., 2013 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400513000221>
- [20] PTFE - technické informace. *Specialisté na těsnění, pryže, plasty, brzdové obložení | sittech.cz* [online]. Most: SITTECH CZ, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.sittech.cz/ptfe-technicke-informace>

- [21] Teflon. *VSS-PLASTY / VSS* [online]. Ostrava: VSS, 2018 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: http://www.vss-plasty.cz/?page__id=36
- [22] L. BELL, Ma, GALO Ch. *Metal oxide group thermistor material*. USA. 5 246 628. Uděleno 21. 9. 1993..- patent