



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ TEPLoty TERMOČLÁNKY

THERMOELECTRIC DEVICE FOR MEASURING TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Melničuk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Petr Melničuk
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření teploty termočlánky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování aktuální literární studie metod kontaktního měření teploty pomocí termočlánků. Součástí práce bude rozbor jejich významu a příklady použití ve strojírenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

- provést průzkum v oblasti kontaktního měření teploty,
- popsat princip měření,
- zhodnotit využitelnost a problémy,
- uvést příklady použití v praxi.

Seznam doporučené literatury:

ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-30-0-2.

KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka - 2. Sv. D: Měřicí technika a bezdemontážní diagnostika. 1. vyd. Praha: SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993. 224 s. ISBN 80-85827-00-X.

ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.

JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-0-02138-6.

SVOBODA, Miroslav. Měření teploty v energetice a průmyslu. Allforpower [online]. 2009 [cit. 2012-0-22]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/mereni-teplotyv-energetice-a-prumyslu/>

VDOLEČEK, František. Technická měření. Brno, 2002. Dostupné z:
<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/ETC.pdf>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

MELNIČUK Petr: Měření teploty termočlánky.

Práce se zabývá měřením teploty pomocí termočlánků, které patří do skupiny dotykových teploměrů, tudíž musí přijít do kontaktu s měřeným médiem. Mezi jejich výhody patří velká flexibilita, díky možnosti použití kombinace různých druhů materiálů a tím dosažení různých rozsahů teplot, které se pohybují v rozmezí od -200 °C do 1800 °C. Pokud by byl termočlánek zvolen nevhodně, mohlo by docházet při měření k systematické odchylce a v některých případech až ke znehodnocení měření. Na základě literární studie byla popsána jednotlivá provedení a uvedeny příklady měření kapalin, plynů a tuhých těles v technické praxi. Dále byl také proveden experiment, ve kterém byly porovnány tři různé termočlánky typu ‚K‘ a vyhodnoceny odchylky mezi jednotlivými měřeními.

Klíčová slova: teplota, termočlánky, kompenzace, studený konec, opláštění

ABSTRACT

MELNIČUK Petr: Thermoelectric device for measuring temperature.

This thesis presents the application of thermocouples for measuring temperature. Thermocouples are a kind of contact thermometers, thus requiring direct contact with measured substance. Their advantages include great flexibility due to wide choice of material combinations, which makes it possible to achieve various operating temperature ranges, anywhere from -200 °C to 1800 °C. Improper choice of thermocouple may result in added systematic error or even render it unusable. Based on literary research, individual configurations, methods of measuring liquids, gases, and solids and their practical applications were presented. Lastly, an experiment was conducted, where three different type 'K' thermocouples were compared and deviations between their measurements were assessed.

Keywords: temperature, thermocouples, compensation, cold junction, sheath

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MELNIČUK, Petr. *Měření teploty termočlánky* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116662>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 23.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále také panu Vojtěchu Říháčkovi za pomoc při experimentu a v neposlední řadě své rodině, přítelkyni a kamarádům za neutuchající podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 TERMOČLÁNKY	10
1.1 Materiály	12
1.2 Přesnost	14
1.3 Ochrana	14
2 ZAPOJENÍ	16
2.1 Teplota srovnávacího konce	17
3 POUŽITÍ V PRAXI	20
3.1 Příklady	21
4 EXPERIMENT	25
4.1 Kalibrace	26
4.2 Měření	27
5 ZÁVĚRY	29

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

V mnoha průmyslových odvětvích patří teplota k jedné z nejdůležitějších stavových veličin. Její regulace má mnohdy rozhodující podíl na kvalitě pracovních procesů, výsledného produktu nebo bezpečnosti provozu. Hodnotu teploty lze stanovit na základě základních fyzikálních principů, mezi které spadá mimo jiné například objemová roztažnost pevných látek, kapalin a plynů, nebo nepřímo, kdy se teplota určuje převodem na elektrické veličiny.

V dnešní době existuje mnoho druhů teploměrů a pro každou aplikaci je potřeba zvážit nejvhodnější typ. Hlavní rozdělení je na bezdotykové a dotykové. Bezdotykové měření teploty, jinak také nazýváno pyrometrie, je moderní disciplína, jejíž popularita roste s neustálým vývojem elektrotechniky a zahrnuje termovize (obr. 1), pyrometry (obr. 2) a infrafotografie. Dotykové teploměry musí přijít do kontaktu s měřeným prostředím nebo objektem a do této kategorie spadají teploměry elektrické, dilatační (obr. 3) a speciální.

V technické praxi jsou stále nejpoužívanější termočlánky (obr. 4), kterými se tato práce bude podrobněji zabývat.



Obr. 1 Termovize [4]



Obr. 2 Pyrometr [5]



Obr. 3 Dilatační teploměr [6]



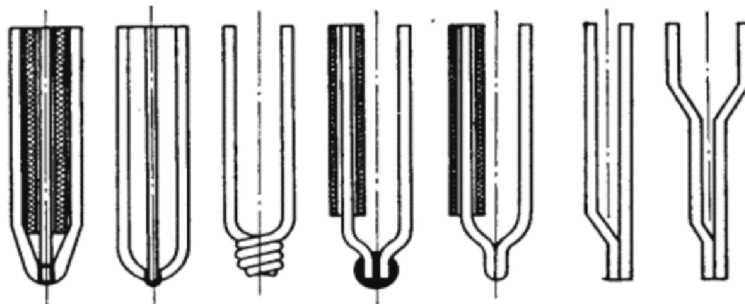
Obr. 4 Termočlánek [7]

1 TERMOČLÁNKY [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]

Termočlánky fungují díky termoelektrickému (Seebeckovu) jevu, při kterém dochází k převodu tepelné energie na elektrickou. Pokud je jeden konec vodiče zahřátý na vyšší teplotu než druhý, nositelé náboje mají v tomto místě větší energii, a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tímto vzniká převaha kladných nebo záporných nábojů, která se liší podle teplot materiálu.

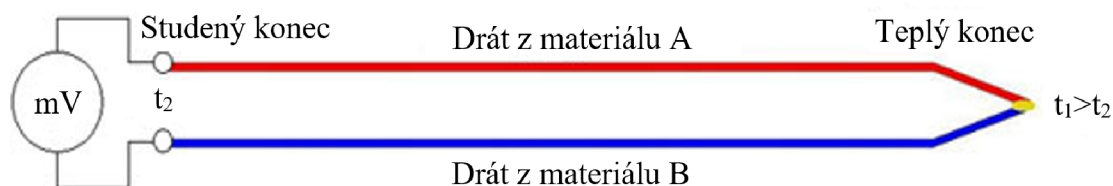
Termočlánek vzniká spojením dvou vodičů různých materiálů na jedné straně nejčastěji svařením či pájením, výjimečně také mechanickým spojením. Tento spoj se nazývá teplý

(měřicí) konec a je nejdůležitější část snímače, obě strany musí být očištěny, vzájemný styk musí být dokonalý a bez přechodových odporů, příklady jsou ukázány na obrázku 5. Opačný, volný, konec vodičů je potom označován jako studený (srovnávací). Při přivedení



Obr. 5 Provedení spoje [13]

teplého spoje na vyšší teplotu vzniká mezi volnými konci rozdíl potenciálů, které je možné měřit jako napětí pomocí milivoltmetru. Schéma tohoto principu je vidět na obrázku 6. Z toho vyplývá nutnost použít pro každý drát jiný materiál, jelikož pokud by byl použit pouze jeden, potenciály by byly v obou větvích stejné a výsledné napětí na sběrnici by bylo nulové.



Obr. 6 Princip termočlánků [12]

Pro určení teploty je třeba naměřit termoelektrické napětí a zároveň udržovat studený konec na stálé a známé teplotě. Zatímco vodiče termočlánku mohou být vedeny různými oblastmi, aniž by se jejich teplotní gradienty negativně projevíly na měření. Toto je významný rozdíl oproti jiným měřičům teploty, jelikož termočlánky neměří přímo teplotu spoje, ale rozdíl teplot mezi teplým a studeným koncem. Z toho plyne, že pokud by byla shodně upravená teplota obou částí termočlánků, termoelektrické napětí zůstane neměnné. Velikost napětí také závisí na Seebeckových koeficientech, které se liší pro různé materiály. Tyto koeficienty jsou v praxi také označovány jako termoelektrické a označují se symbolem α . Jsou udávány vzhledem k referenčnímu materiálu jako je olovo nebo platina v jednotkách V/K popřípadě $\mu\text{V}/\text{K}$. Jejich hodnoty jsou nepřímo úměrné hustotě elektrických nosičů materiálu, tudíž pro izolanty jsou vysoké, na rozdíl od kovů, které mají větší koncentraci nosičů. Termočlánky jsou v celém svém rozsahu nelineární, ale při malých tepelných rozdílech se za lineární dají považovat a pro vyhodnocení je možné použít rovnice:

- prvního řádu:

$$E = \alpha_A(t_1 - t_2) + \alpha_B(t_2 - t_1) = (\alpha_A - \alpha_B)(t_1 - t_2) = \alpha(t_1 - t_2) \quad (1.1)$$

kde: t_1 – absolutní teplota měřeného konce [°C]

t_2 – absolutní teplota srovnávacího konce [°C]

$\alpha_{A,B}$ – Seebeckův koeficient pro kov A a B [$\mu\text{V}/\text{°C}$]

α – Seebeckův koeficient pro kombinaci kovů A a B [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]

- druhého řádu:

$$E = (\alpha_A - \alpha_B)(t_1 - t_2) + 0,5(\alpha'_A - \alpha'_B)(t_1 - t_2)^2 \quad (1.2)$$

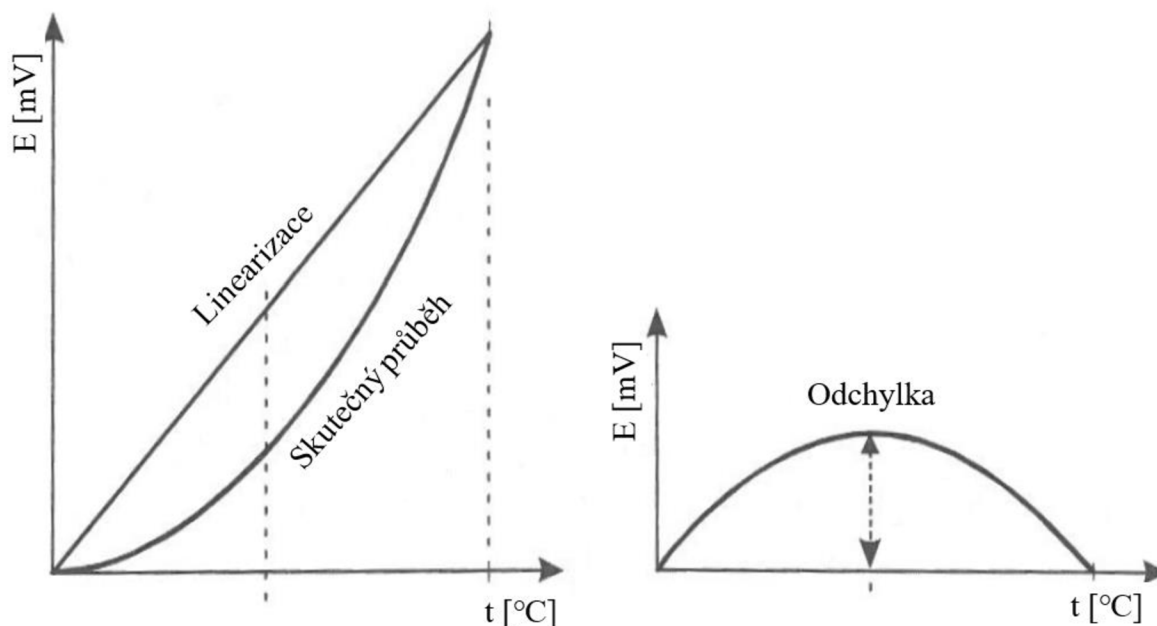
kde: $\alpha'_{A,B}$ – Seebeckovy koeficienty druhého řádu pro kov A a B [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}^2$]

Hodnoty Seebeckových koeficientů jsou pouze přibližné, jelikož záleží nejen na materiálu, ale i celkové struktuře vodičů. Příklady některých používaných kovů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Seebeckovy koeficienty [14].

Materiál	Konstantan	Měď	Železo	Nikl	Platina
α [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	-38,1	2,71	16,7	-19,1	-3,03
α' [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}^2$]	-0,0888	0,0079	-0,0297	-3,02	-3,25

Pro vyšší teplotní rozdíly je však potřeba zohlednit značnou nelinearitu závislosti, jelikož roste nejistota měření. Jako je vidět na obrázku 7, pokud se bude zvyšovat rozsah teplot, bude růst i odchylka od skutečné charakteristiky termočlánků.



Obr. 7 Nelinearita [11]

Proto se využívají polynomy vyšších řádů. Tyto polynomy se často tvoří s předpokládanou teplotou studeného konce 0°C a vypadají následovně:

$$E = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i \quad (1.3)$$

kde: a_i – i-tý koeficient polynomu [$\mu\text{V}\cdot^\circ\text{C}^{-i}$]

n – řád polynomu

t – měřená teplota [$^\circ\text{C}$]

Pro termoelektrický článek typu K platí netypický polynom:

$$E = a_0 + \sum_{i=0}^n a_i (t_{90})^i + c_0 \cdot e^{[c_1 (t_{90} - 126,9686)^2]} \quad (1.4)$$

kde: t_{90} – teplota ITS-90 [$^\circ\text{C}$]

c_0, c_1 – konstanty normované pro teplotní rozsahy -270 až 0°C a 0 až 1300°C

Pro převod naměřeného napětí existují výrobcem dodávané referenční tabulky pro konkrétní termočlánky, popřípadě je může mít přístroj uložené v paměti a provádí automatické převedení na teplotu. Tyto tabulky jsou vytvořeny pomocí inverzních polynomů:

$$t = \sum_{i=0}^n b_i \cdot E^i \quad (1.5)$$

kde: b_i – i -tý koeficient inverzního polynomu [$^{\circ}\text{C} \cdot \mu\text{V}^{-i}$]

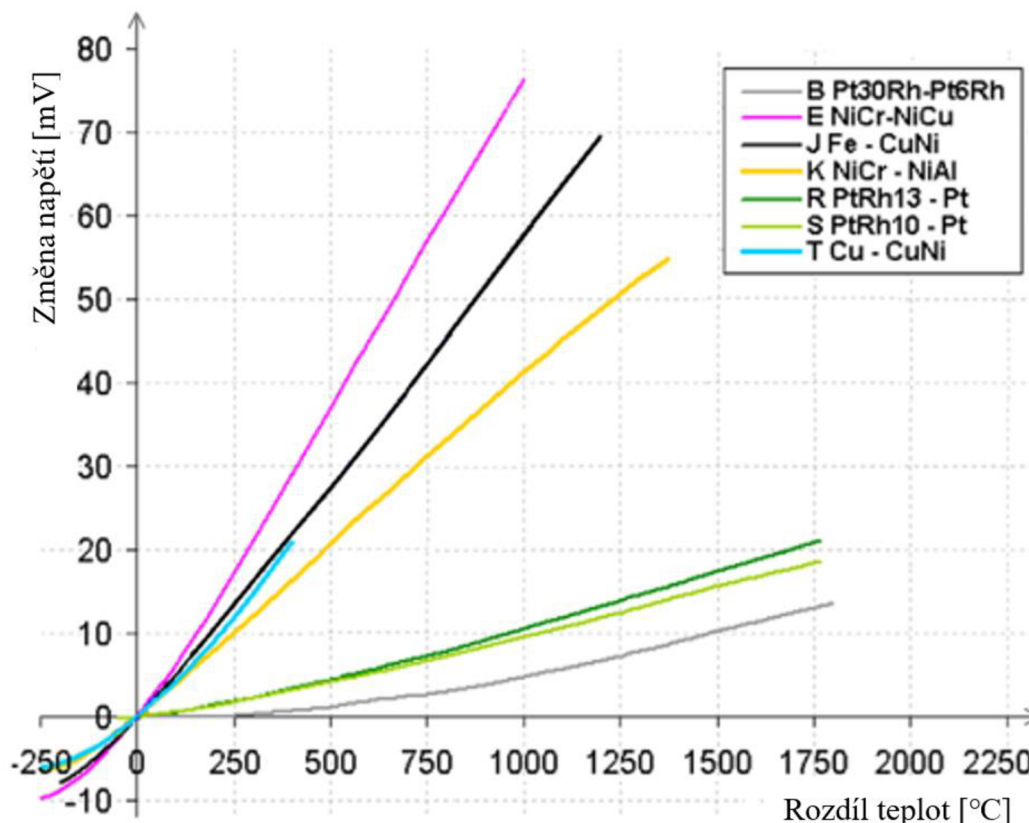
Ukázka z referenční tabulky udávaná firmou MAVIS Nový Brod s.r.o. pro termočlánek typu J je uvedena v tabulce 2. Kompletní tabulka je součástí přílohy 1.

Tab. 2 Ukázka referenční tabulky [15]

[$^{\circ}\text{C}$]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,050	0,101	0,151	0,202	0,253	0,303	0,354	0,405	0,456
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,814	0,865	0,916	0,968
20	1,019	1,071	1,122	1,174	1,226	1,277	1,329	1,381	1,433	1,485
30	1,537	1,589	1,641	1,693	1,745	1,797	1,849	1,902	1,954	2,006
40	2,059	2,111	2,164	2,216	2,269	2,322	2,374	2,427	2,480	2,532

1.1 Materiály [11], [17], [18], [19], [20] [21], [22]

Vodiče termočlánků mohou být tvořeny širokou škálou materiálů. Materiál však musí být schopen odolat chemickým, mechanickým a korozním vlivům. Dalším požadavkem je, aby se závislost termoelektrického napětí na teplotě blížila co nejbližně lineárnímu průběhu. Vhodné kombinace vodičů pro měření průmyslových teplot, které tyto podmínky splňují, jsou normované. Jejich charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 8. Hodnoty závislosti se pohybují v řádech $\mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$.



Obr. 8 Charakteristiky [19]

Výběr typů termočlánků zaleží na přibližné měřené teplotě, nejčastější typy jsou uvedeny v tabulce 3. V České republice jsou nejčastěji používány z drahých kovů typ „S“ a z obecných kovů typy „J“ a „K“. Například jedna větev článku „J“ je tvořena ze železa, zatímco druhá je ze slitiny mědi a niklu, obvykle v poměru okolo 60 % mědi a 40 % niklu. Pomocí volby z těchto tří termoelektrických článků je možné dosáhnout pokrytí měřených teplot od -200 do 1700 °C.

Tab. 3 Nejčastěji používané typy [11].

Typ	Měřicí rozsah [°C]	Kombinace materiálu	Přibližná hodnota α při 100°C [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	Přibližná hodnota α při 500°C [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	Přibližná hodnota α při 1000°C [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
T	-200 až 400	Cu-konstantan	46	-	-
J	-200 až 900	Fe-konstantan	54	56	59
E	0 až 900	NiCr-CuNi	68	81	-
K	0 až 1300	NiCr-NiAl	42	43	39
S	0 až 1700	PtRh10-Pt	8	9	11
R	0 až 1700	PtRh13-Pt	8	10	13
B	0 až 1800	PtRh30-PtRh6	1	5	9

Měřicí rozsah uvedený v tabulce má pouze informativní charakter. Skutečný rozsah je závislý na průměru drátů a provedení opláštění. Pro správné fungování termočlánků je důležité provádět dlouhodobá měření v doporučeném intervalu teplot; jsou sice schopny pracovat krátkodobě i mimo tento interval, při delším namáhání by ovšem došlo k jejich poškození.

Jelikož se od sebe jednotlivé typy materiálů velmi liší, každý z nich dokáže odolávat a dlouhodobě pracovat v různém prostředí a jiné by jej mohlo poškodit. Proto je důležité brát ohled na doporučení výrobce. Příklady vhodného využití jsou následující:

- Typ T (měď-konstantan) – má nejlepší vlastnosti pro měření v nízkých teplotách a je používán pro kryogenní aplikace. Do teploty až 700 °C jej lze použít i v redukční a oxidační atmosféře a také ve vakuu. Odolný vlhkosti.
- Typ J (železo-konstantan) – dokáže pracovat ve vakuu a je také vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru. V redukční atmosféře není potřeba použít ochrannou jímku.
- Typ E (chromel-konstantan) – má největší hodnotu termoelektrického koeficientu, využívá se pro vakuum nebo středně oxidační atmosféry a není potřeba ochranného krytí.
- Typ K (chromel-alumel) – je všeobecně použitelný v inertní a oxidační atmosféře, relativně přesný, odolný s dostatečnou linearitou křivky napětí a není citlivý na neutronový tok. Není využíván při měření ve vakuu.
- Typ S (PtRh10-Pt) – má vysokou přesnost a je využíván pro měření velmi vysokých teplot až 1700 °C. Je odolný vůči korozi a oxidaci, ale musí být chráněn.
- Typ R (PtRh30-Pt) – jehož vlastnosti jsou shodné s typem S, liší se procentuálním zastoupením rhodia.
- Typ B (PtRh30-PtRh6) – je obtížně použitelný při nižších teplotách z důvodu velmi malé citlivosti pod 300 °C. Má podobné vlastnosti jako články typu S a R, výhodou je, že nad 1200 °C je stabilnější.

Termočlánky jsou barevně značeny, ale značení není ve světě sjednocené a může se v různých státech výrazně lišit. Jak je možné vidět v příloze 2. Značení normou pro Evropskou unii je uvedeno v tabulce 4.

Tab. 4 Barevné označení [21].

Typ	T	J	E	K	S	R	B
Barva	Hnědá	Černá	Fialová	Zelená	Oranžová	Oranžová	Šedá

1.2 Přesnost [17], [18], [23], [24]

Přesnost termočlánků zohledňuje chyby, které existují při měření teploty a značí odchylku naměřené hodnoty od skutečné teploty. Je jí velmi těžké určit, jelikož záleží na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří například čistota materiálu, koroze, degradace spojení, výrobní proces a další.

Pro normované termočlánky jsou stanoveny třídy přesnosti, které jsou rozděleny do tří skupin. Skupina 1 a 2 jsou pro teploty vyšší než -40 °C a skupina 3 pro záporné hodnoty teplot až -200 °C . Toleranční třídy uváděné firmou Günther GmbH jsou přiloženy v příloze 3. Jak je možné vidět, vyšší třídy přesnosti mohou být až několikrát přesnější, ale jsou také o něco dražší, tudíž se používají na aplikace, kde je přesná teplota kritickým faktorem.

Zde je uveden příklad tolerančních tříd pro termočlánek typu K:

- 1. třída – rozsah teplot -40 až 1000 °C tolerance $\pm 1,5\text{ °C}$ nebo $0,004 \cdot (t)\text{ °C}$
- 2. třída – rozsah teplot -40 až 1200 °C tolerance $\pm 2,5\text{ °C}$ nebo $0,0075 \cdot (t)\text{ °C}$
- 3. třída – rozsah teplot -200 až 40 °C tolerance $\pm 2,5\text{ °C}$ nebo $0,0015 \cdot (t)\text{ °C}$

Hodnota tolerance je buď fixní nebo je vypočítána z naměřené teploty. Pro toleranci vždy platí vyšší hodnota z uvedených možností.

Pokud by byla tímto termočlánekem typu „K“ 2. třídy naměřena teplota například 800 °C , po dosazení do vztahu pro výpočet tolerance pro tuto třídu přesnosti vyjde:

$$X_t = 0,0075 \cdot (t) = 0,0075 \cdot 700 = 5,25\text{ °C} \quad (1.6)$$

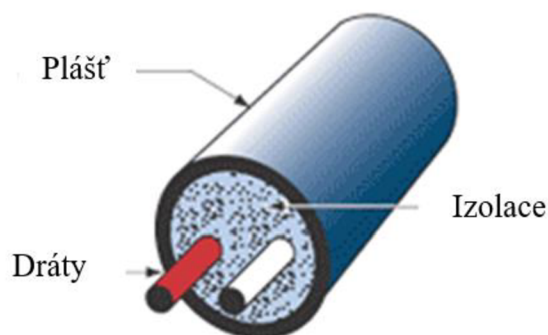
kde: X_t – tolerance

t – naměřená teplota

Jelikož tato vypočítaná hodnota je větší než $2,5\text{ °C}$, měřený vzorek bude mít dle tohoto přístroje teplotu $800 \pm 5,25\text{ °C}$.

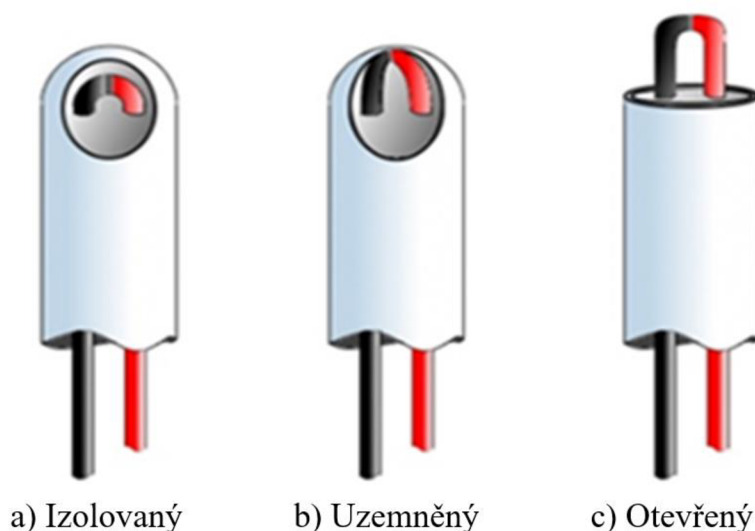
1.3 Ochrana [2], [11], [18], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]

Termočlánky se dále dělí podle jejich ochrany proti vlivům prostředí. Neopláštěné termočlánekové větve jsou od sebe elektricky odděleny opletením ze sklotextilové izolace, plastovou izolací, popřípadě teflonem. Dalšími možnostmi je například termočlánek oplástit korozivzdornou ocelí, odolnou vůči vysokým teplotám, slitinami niklu nebo keramikou. Pláště jsou vyráběny o průměrech od $0,15\text{ mm}$ do $0,6\text{ mm}$ a dlouhé do 30 m . Tyto rozdílné průměry se vytváří válcováním a tažením ze základních polotovarů. Měřicí dráty jsou potom uloženy uvnitř a izolovány od sebe například stlačeným MgO nebo Al_2O_3 , jako je vidět na obrázku 9. V některých průmyslových oborech, jako je například jaderná energetika, se počet termočlánekových vodičů zdvojuje z bezpečnostních důvodů, aby byla jistota správnosti měření pro případ porušení jednoho z drátků. Výhoda této konstrukce je uložení vodičů po celé délce v netečném materiálu, tímto se zajišťuje vysoká stabilita, odolnost proti stárnutí a ochrana



Obr. 9 Opláštění [25]

proti vlivům pracovního prostředí, jako mohou být například tepelné nebo tlakové rázy. Mezi další pozitiva patří vysoký rozsah měřených teplot, ale také jejich prostorová tvarovatelnost a tvarová stálost. Minimální poloměr ohybu se pohybuje kolem pětinasobku vnějšího průměru pláště. Měřicí spoj může být pevně spojen s obalem nebo být elektricky izolován jako je vidět na obrázku 10.

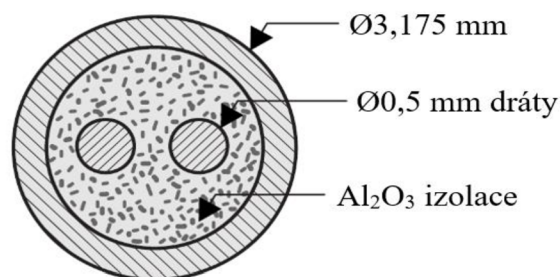


Obr. 10 Možnosti provedení teplého konce [28]

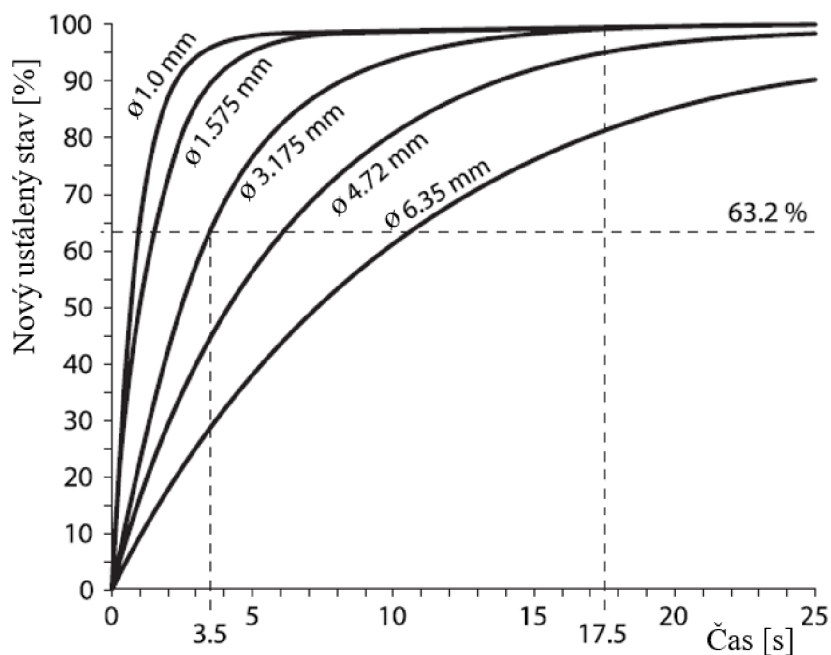
Každá z těchto možností má své výhody a nevýhody, které je potřeba zvážit pro daný případ. Hlavním rozdílem je především doba odezvy (časová konstanta) a úroveň ochrany proti poškození:

- Uzavřený a izolovaný (obr. 10a) – má největší ochranu proti poškození, ale nevýhodou je dlouhá doba odezvy, která se pohybuje okolo 75 sekund.
- Uzavřený a uzemněný (obr. 10b) – na rozdíl od izolovaného zakončení je spoj přivařen k obalu, čímž dochází k lepšímu přestupu tepla. Tímto se dosahuje rychlejší doby odezvy, která je zkrácena na zhruba 40 sekund. Nevýhodou ovšem je, že toto provedení se může zachovat jako anténa a může dojít k ovlivnění naměřeného signálu kapacitními proudy nebo elektromagnetickým rušením. Využívá se v místech, kde není problém s rušením, je potřeba měřit rychleji, ale zároveň mít stále dobrou ochranu vůči okolí.
- Otevřený (obr. 10c) – dosahuje nejrychlejší doby odezvy, která se pohybuje okolo 2 sekund, v některých situacích lze dosáhnout až 10 milisekund. Problémem je chybějící ochrana proti mechanickému, chemickému a elektrickému poškození měřeným prostředím. Je možno použít pouze pro aplikaci bez vlhkosti, vysokého tlaku nebo agresivních látek.

Samotná šířka termočlánu se také podílí na reakční době. Velmi rychlé změny teploty se na výstupu neprojeví okamžitě, ale s určitým zpožděním. Tuto závislost je možno demonstrovat experimentem, kde termočlánu o různé tloušťce s dráty o průměru 0,5 mm a izolací z Al_2O_3 byly rychle ponořeny do horké olejové lázně. Průřez testovaného termočlánu o průměru 3,175 mm je vidět na obrázku 11. Jelikož oxid hlinitý má nízkou tepelnou vodivost, tak zpomaluje rychlost, s jakou se změna teploty prostředí projevuje na spoji drátů. Výsledná závislost času na tloušťce je zobrazena na obrázku 12.



Obr. 11 Průřez testovaným čidlem [31]



Obr. 12 Časové konstanty [31]

V tomto grafu je možno vidět jednotlivé časové konstanty pro různé celkové průměry. Jedna časová konstanta odpovídá 63,2 % nového ustáleného stavu. Pro 99 % tohoto stavu je potřeba změřit novou teplotu po pěti konstantách. Z toho vyplývá, že při 3,175 mm nemá smysl provádět nové měření dříve než po 17,5 sekundách.

Dodatečnou ochranu lze zajistit umístěním termočlánků do ochranné jímkou. Jímka je trubice, která může být vyrobena z kovu, popřípadě z keramiky, dle toho, jakému chemickému prostředí a jaké teplotě bude vystavena. Příklad jímek je na obrázku 13. Toto provedení nejen zvyšuje životnost termočlánku, ale také poskytuje snadnou možnost výměny. Jelikož jímka zůstává na svém místě a mění se pouze termočlánek, nedochází k narušení pracovního prostoru a nemusí být omezen provoz. Průřez jímkou s umístěným termočlánekem je ukázán na obrázku 14.



Obr. 13 Příklady jímek [32]



Obr. 14 Průřez jímkou [18]

2 ZAPOJENÍ [11], [15], [18], [33], [34], [35], [36], [37]

Termočlánky jsou z měřeného místa prodlouženy do oblasti, kde je z bezpečnostních a finančních důvodů nejjednodušší udržet konstantní teplotu studeného konce. Toto se provádí pomocí spojovacího kabelu, který je rozlišován na kompenzační a prodlužovací vedení.

Prodlužovací vedení je vyrobeno ze stejných materiálů jako termočlánek a má odpovídající barevné značení a používá se do teplot až 200 °C. Tyto kabely jsou označovány dle typu článku písmenem X, například JX pro termoelektrický kabel typu „J“.

Kompenzační dráty (obr. 15) jsou vyrobeny ze substitučních materiálů s rozdílným složením, které však mají v měřicím rozsahu stejné termoelektrické vlastnosti jako daný termočlánek. Těchto materiálů je využíváno u termočláneků vyráběných ze vzácných kovů, jelikož tyto slitiny jsou velmi drahé a použitím levnějších materiálů se výrazně ušetří na celkové ceně systému, značí se písmenem C.

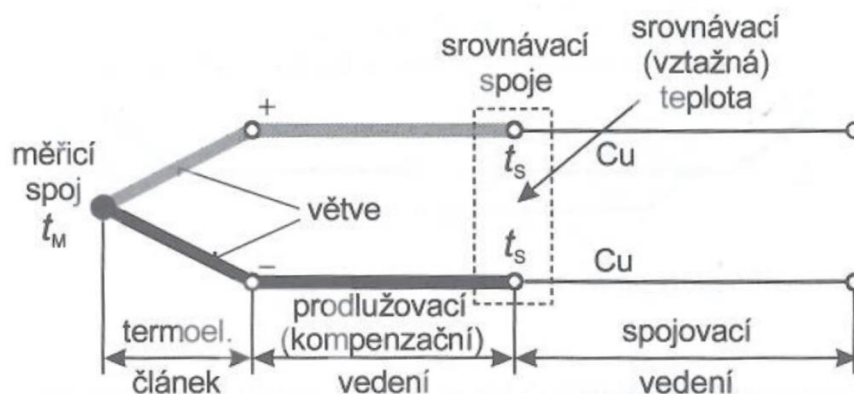
V minulosti bylo potřeba volit náhražkové materiály s nízkým ohmickým odporem, aby nezpůsobovaly chyby měření. V dnešní době však moderní elektronické přístroje mají velmi vysoký výstupní odpor, takže odpor kabelu v měřicím okruhu nevyvolává žádnou výraznou chybu, a to i při hodnotách vedení v řádu několika kiloohmů.



Obr. 15 Kompenzační vedení [15]

Pro propojení mezi studeným koncem a měřicím přístrojem, či přístrojem pro zpracování dat se používá měděných drátů. Výsledné termoelektrické napětí se jejich vložením nemění za předpokladu, že konce všech dalších vodičů mají na spojích stejnou teplotu. Pokud jsou v obvodu přístroje náročnější na spotřebu energie, je tento obvod potřeba vyvážit pomocí odporu.

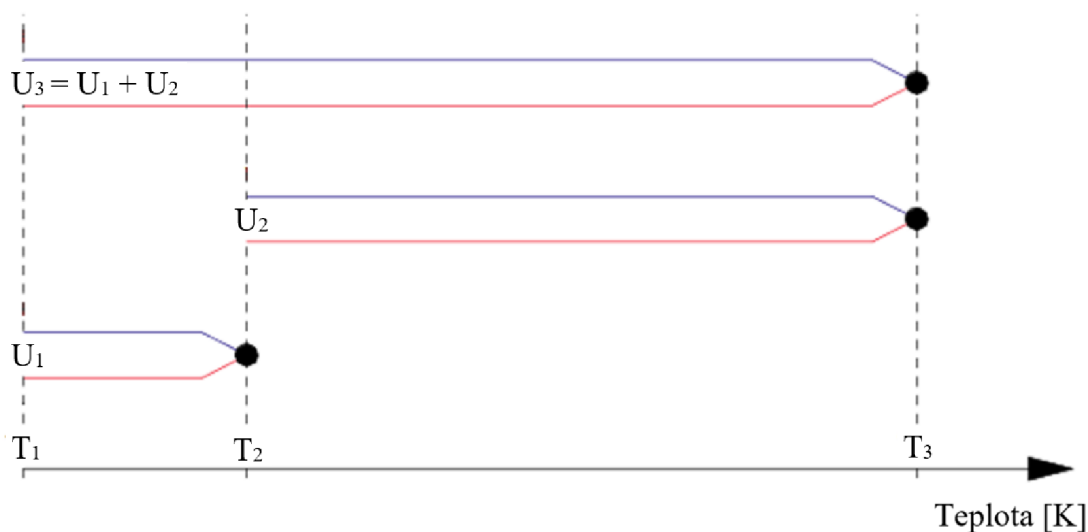
Schéma zapojení s prodlužovacím a spojovacím vedením je na obrázku 16.



Obr. 16 Schéma zapojení [11]

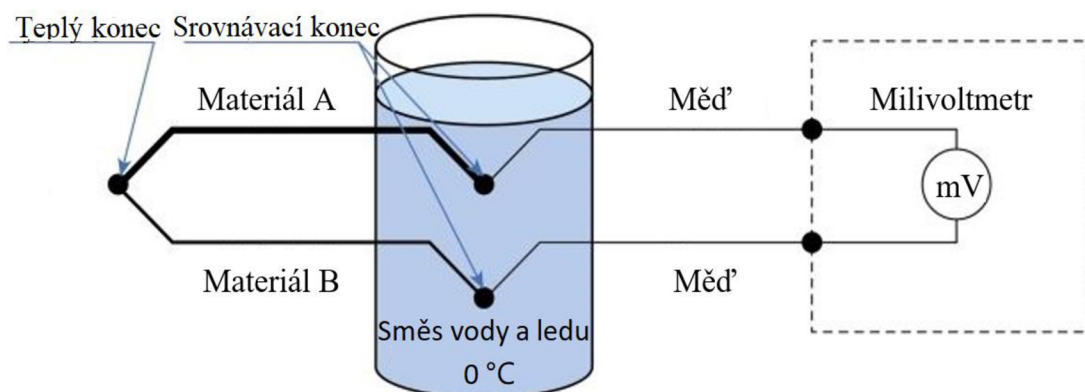
2.1 Teplota srovnávacího konce [10], [38], [39]

Termočlánky jsou kalibrovány na teploty srovnávacího konce udávané výrobcem. Jestliže by byly použity pro rozdílnou teplotu od vztažné (udávané normou nebo tabulkou), docházelo by při měření k systematické odchylce, a tudíž by bylo potřeba provést matematickou korekci. Platí, že pokud termočlánekové dráty vyprodukují napětí U_1 při teplotách spoje T_1 a T_2 a následně U_2 při teplotě T_2 a T_3 , tak napětí při T_1 a T_3 bude rovno $U_1 + U_2$, za podmínky $T_1 < T_2 < T_3$. Grafické znázornění této korekce je možné vidět na obrázku 17.



Obr. 17 Grafické znázornění korekce [10]

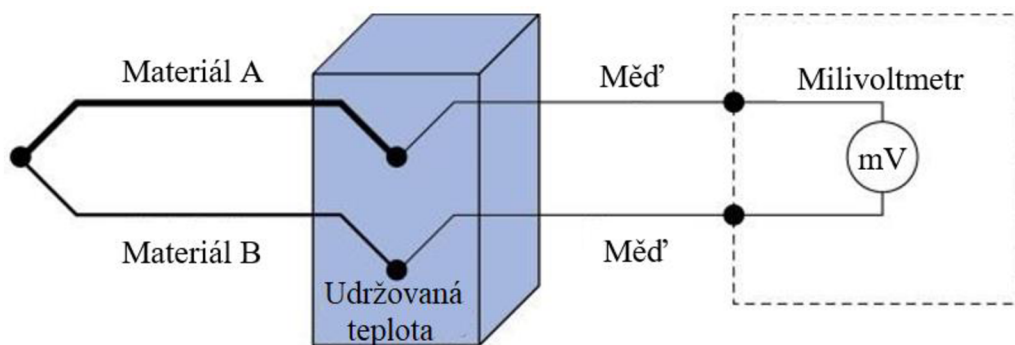
V laboratorních podmínkách se pro udržení známé teploty používají Dewarovy nádoby naplněné směsí vody a ledu. Srovnávací konec je v této směsi udržován na teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ jako je ukázáno na obrázku 18. Těchto podmínek je ovšem při průmyslovém měření složité dosáhnout, takže se používají jiné metody.



Obr. 18 Termočlánek s ledovou lázní [38]

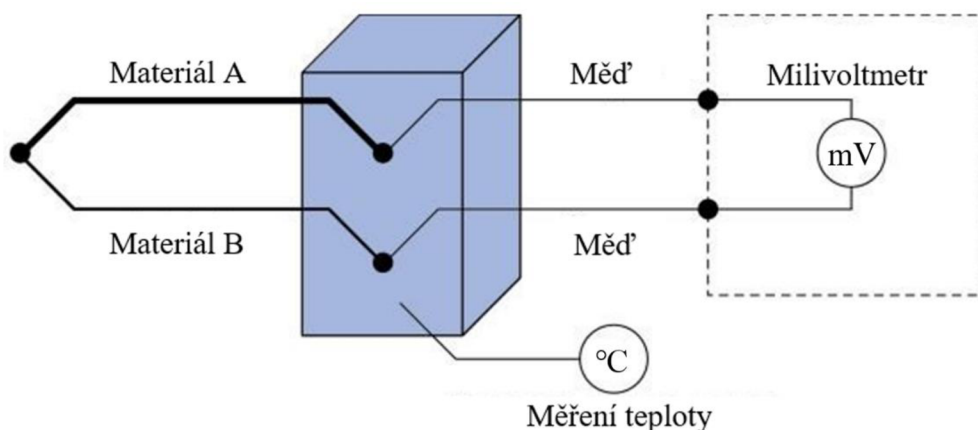
V provozních podmínkách je možno využít kompenzační krabice. Nejdůležitější součástí této krabice je odporový můstek, kde jsou tři odpory, jež jsou vyrobeny z konstantanu a jsou tepelně nezávislé, zatímco čtvrtý, měděný odpor, je tepelně závislý. Tento můstek je vyvážen na vztažnou teplotu například $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud se teplota můstku a srovnávacího konce sníží nebo zvýší, dojde vlivem změny odporu mědi k rozvážení můstku a vznikne napětí, které provede korekci termoelektrického na správnou hodnotu. Kompenzační krabice je použitelná pouze pro jeden termočlánek.

Další metodou je srovnávací konec udržovat pomocí termostatu na vyšší teplotě, než má okolí, například $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, jako je znázorněno na obrázku 19. Vyšší teplota se volí z toho důvodu, že je snadnější srovnávací místo zahřívat než chladit. Tímto způsobem je možno pomocí jednoho termostatu kompenzovat několik termočláneků.



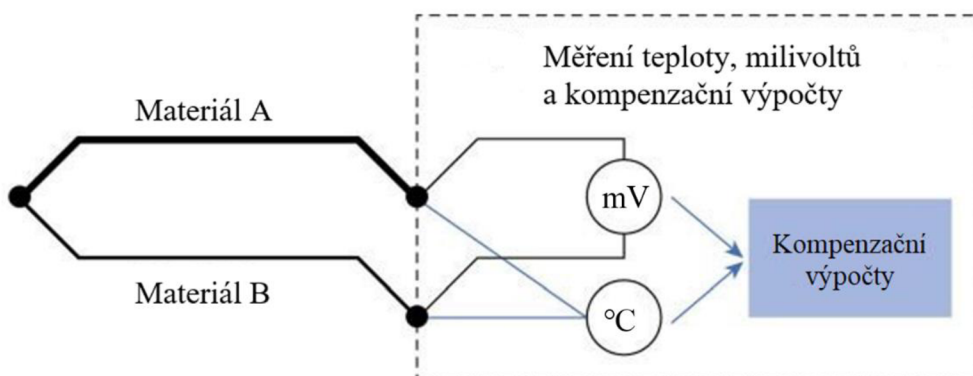
Obr. 19 Termočlánek se známou teplotou [38]

Pokud srovnávací konec není regulován jako u předchozích příkladů, je možné měřit jeho teplotu pomocí teplotní sondy a následně provést matematickou kompenzaci jako je znázorněno na obrázku 20. Toto řešení je složitější, jelikož je potřeba znát typ termočlátku, neustále měřit teplotu studeného konce a provádět výpočty k odstranění odchylek způsobených měnící se teplotou.



Obr. 20 Termočlánek s měřením teploty [38]

V dnešní době však existují přístroje, které jsou schopny provádět tyto výpočty v reálném čase automaticky. Schéma je vidět na obrázku 21. Toto z nich dělá nejpraktičtější a nejjednodušší způsob kompenzace při běžných měřeních, protože není potřeba složité přípravy studeného konce.



Obr. 21 Termočlánek s automatickou kompenzací [38]

3 POUŽITÍ V PRAXI [2], [11], [18], [22], [26], [35], [39], [40]

Pro správné fungování termočlánků je potřeba zvolit vhodné umístění snímače. Při volbě místa je při měření pevných látek potřeba zajistit co nejmenší tepelný odpor a dokonalý styk mezi snímačem a měřeným objektem. V případě měření teploty tekutin potom co největší součinitel prostupu tepla mezi snímačem a prostředím. Dále musí být brán ohled na snadnou montáž, výměnu a údržbu zařízení a na to, aby nebylo narušené tepelné pole v okolí senzoru.

V případě měření prostorové teploty vzduchu (obr. 22) je důležité snímače umístit do míst s reprezentovatelnou teplotou pro daný sledovaný proces a neumísťovat je například v blízkosti zdrojů tepla nebo chladu, jako třeba okolí ventilačních otvorů nebo sklepních okének a na místa vystavená slunečnímu záření.

Při měření teploty kapalin v nádobách je potřeba zajistit dostatečné míchání, čímž se zvyšuje součinitel přestupu tepla a nedochází k nerovnoměrnému rozložení teplot v nádobě.

Pokud se provádí měření kapalin a plynů v potrubí, je potřeba správného umístění snímače. Aby nevznikla chyba měření, je potřeba snímač ponořit do doporučené hloubky:

- pro kapaliny – 8 až 10 násobek průměru měřicího konce jímky,
- pro plyny – 10 až 15 násobek průměru měřicího konce jímky.

Prostor mezi ochrannou trubicí a stěnou se izoluje pomocí tepelně nevodivých materiálů, aby se zamezilo přisunu studenějšího vzduchu z okolí. Pokud by se tak stalo, teplota v okolí měřicího snímače by neodpovídala skutečné hodnotě celého měřeného prostředí a měření by bylo zkreslené. Jímka se do potrubí umísťuje buď přímo nebo šikmo, při šikmé instalaci konec jímky směřuje proti proudění. Pokud je nutné umístit snímač do potrubí malých průměrů, potom je doporučeno umístit jej šikmo nebo do kolene potrubí proti směru proudění média jako je znázorněno na obrázku 23.



Obr. 22 Prostorový snímač [40]



Přímý návarek

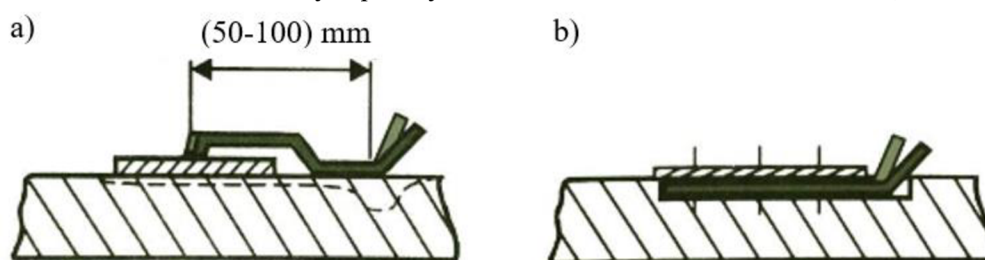
Šikmý návarek

V koleně potrubí

Obr. 23 Možnosti umístění snímače [39]

Měření tuhých těles se dělí na:

- Uvnitř – pro získání této teploty je potřeba mít v součásti vyvrtaný otvor, do kterého bude termočlánek uložen. Tímto však v daném místě dochází k narušení struktury a zhoršení mechanických vlastností, proto je ideální, aby bylo s tímto zásahem počítáno již při návrhu součásti.
- Na povrchu – zde bývá používáno termočláneků s co nejmenším průřezem a malým součinitelem teplotní vodivosti a je potřeba zajistit co nejmenší narušení tepelného pole. Lze použít tenkou destičku s velkou tepelnou vodivostí, například z mědi, a termoelektrický článek na ni připájet. Tato destička je následně důkladně přitlačena či přišroubována, aby mezi ní a povrchem nebyla vzduchová mezera, která by měla negativní vliv na měření (obr. 24a). Teplotní spád je taktéž možno zmenšit vedením drátů podél tělesa, aby nedocházelo k odvodu tepla do okolí, nebo umístěním článku do drážky a překrytí destičkou z měřeného materiálu (obr. 24b).

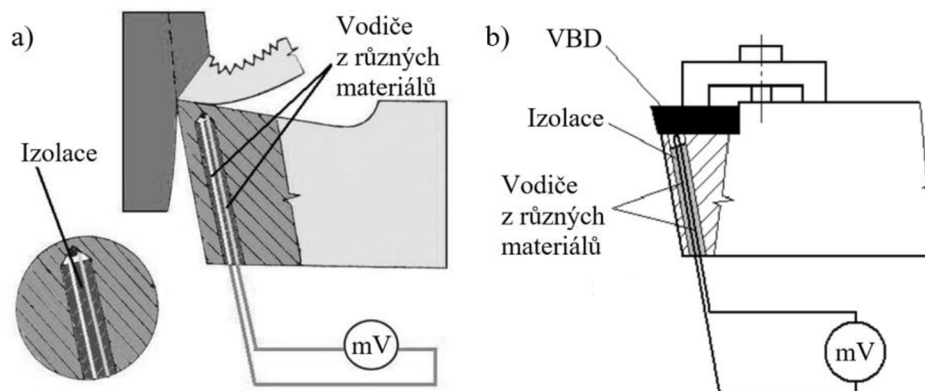


Obr. 24 Měření povrchové teploty [11]

3.1 Příklady [18], [33], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50]

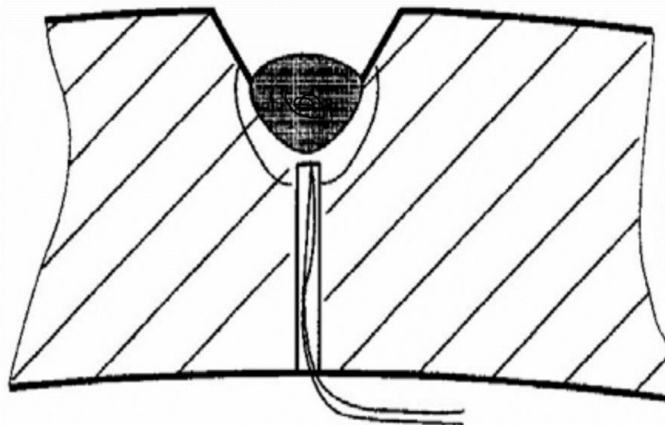
Termočláanky se v dnešní době díky různým možnostem provedení používají téměř ve všech odvětvích průmyslu. Velký význam mají pro měření teploty v oborech jako je například:

- ❖ Obrábění – kde pomocí termočláneků je možné provádět měření v různých místech nástroje či obrobku, kromě stykových ploch břitu s třískou a plochou řezu. Nejčastější využití je pro určování teploty na břitu nástroje. Jednou z možností je v nástroji vytvořený otvor, do něhož je termočlánek vložen (obr. 25a). Zabudování však může být poměrně komplikované a také se v daném místě mění podmínky vedení tepla, což může v některých případech vést i k znehodnocení obráběcího nástroje. Z tohoto důvodu se tento způsob využívá mnohem častěji u nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou například ze slinutých karbidů nebo rychlořezné oceli. Termočlánek tak může být pevně zabudovaný v nástroji a zaznamenává teplotu na zadní straně břitové destičky (obr. 25b). Při jejím ztupení dojde pouze k její výměně a termočlánek zůstává na svém místě.



Obr. 25 Měření teploty při obrábění [41]

- ❖ Svařování – zde se termočlánky dají použít pro měření tepelně ovlivněné oblasti. Pomocí tohoto poznatku je možné určit předpokládané mikrostruktury v jednotlivých oblastech svarového spoje, což slouží k odhadnutí předpokládaných mechanických vlastností. K tomuto měření se nejčastěji používají termočlánky typu ‚J‘ (Fe-ko), ‚K‘ (NiCr-Ni), ‚S‘ a ‚R‘ (PtRh-Pt). Konkrétní typ se volí dle měřeného cyklu. Termočlánky jsou malých rozměrů, obvykle okolo 0,5 mm, aby mohly měřit konkrétní oblast tepelného cyklu, a ne průměrnou teplotu svaru. Pro co nejpřesnější měření je třeba zajistit kovový kontakt s měřeným místem, což je možné dosáhnout přivařením kondenzátorovou impulsní svářečkou. Teplotní cykly je možné měřit buď na povrchu zkušebního vzorku, nebo uvnitř materiálu, kdy se termočlánky umístí a přivaří do připravené válcové díry v určité vzdálenosti od hranice ztavení. Schéma tohoto zapojení je na obrázku 26.



Obr. 26 Schéma měření teplotních cyklů [42]

- ❖ Slévárství (obr. 27) – jelikož se zvyšujícími se nároky na kvalitu odlitků, je kladen stále vyšší důraz na dodržování jejich technologických postupů výroby. K tomuto je důležité znát přesné teploty v průběhu výroby, jelikož teplota má nezanedbatelný vliv na výslednou kvalitu výrobků. Jedním z nejpřesnějších a nejpoužívanějších způsobů měření taveniny a odlitků jsou právě termočlánky, které se tu dělí na kontaktní a ponorné. Ke kontaktnímu měření se využívají termočlánky typu K, ke zjišťování teploty přehřátých pánví, chladičů odlitků atd. Ponorné termočlánky jsou vyrobeny ze vzácných kovů, nejčastěji typ ‚S‘ a používají se pro měření teploty taveniny kovů nad 900 °C. Vyrábí se buď pro jednorázové měření, tato možnost má své uplatnění ve velkých a těžko dostupných agregátech, nebo pro opakované měření, vhodné pro menší slévárské agregáty s lepším přístupem k tavenině a možností odstranění strusky z povrchu taveniny. Ukázka ponorné termočlánekové sondy je na obrázku 28.



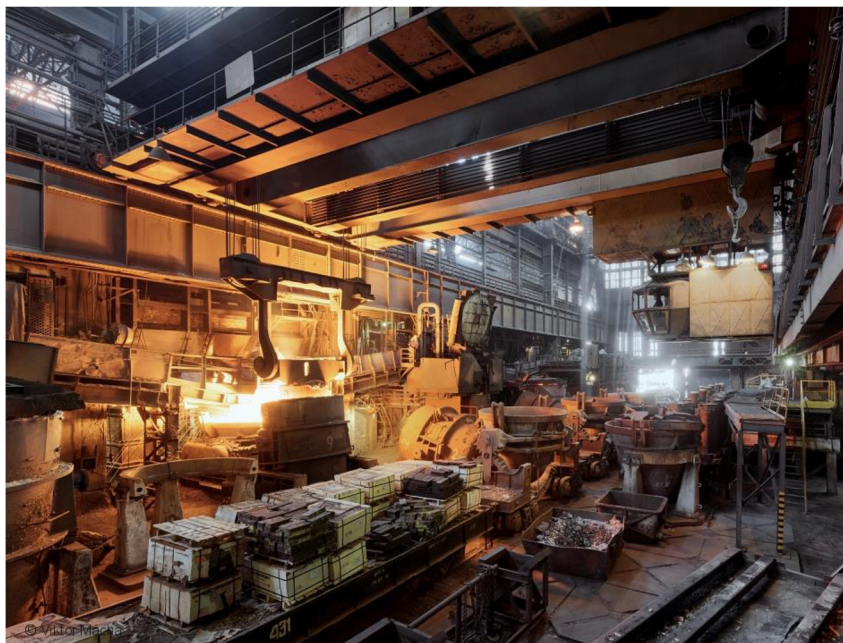
Obr. 27 Slévárství [44]



Obr. 28 Ponorná termočláneková sonda [28]

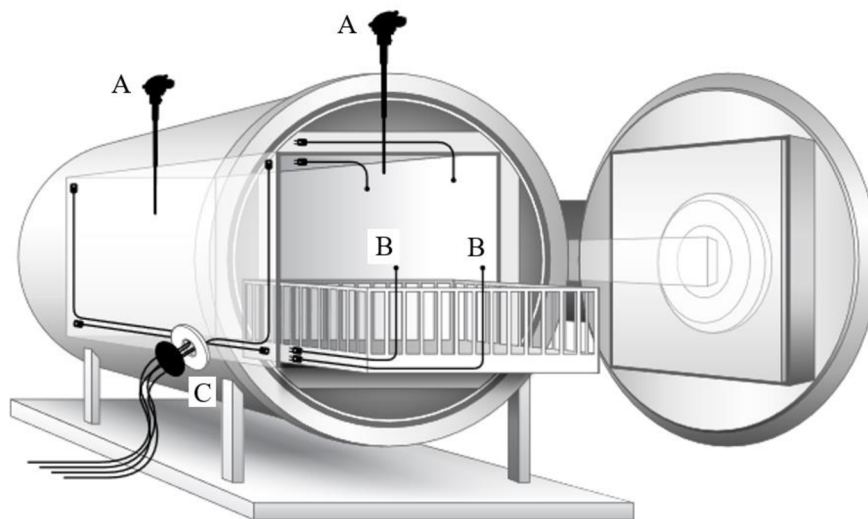
Ke konkrétním příkladům jednotlivých termočlánků se mohou řadit:

- Siemens-martinské pece (obr. 29) - termočlánek typu „K“ zde měří v rourách na odpadní plyny teploty okolo 600 °C a termočlánek typu „S“ pracuje v komorách generátorů při teplotách kolem 1350 °C. Krátkodobě se také typ „S“, speciální konstrukce, ponořuje do taveniny, kde se teplota pohybuje okolo 1600 °C.



Obr. 29 Siemens-martinská pec [46]

- Vytvrzovací a sušící pece – tyto pece jsou využívány k sušení výrobků po předpovrchové úpravě, pro výpal v práškových a sušení v mokřých lakovnách, temperaci plastů a technologickým ohřevům. K zajištění správnosti procesů je potřeba dosažení vysoké a rovnoměrné teploty. Pro tyto účely se zde nachází dva typy termočlánků, jako je vidět na obrázku 30. Termočlánky značené písmenem „A“ monitorují teplotu komory a druhé, vsázkové termočlánky, jsou použity na měření rozložení teploty na povrchu, popřípadě uvnitř součástí a značeny písmenem „B“. Dráty termočlánků se odvádí pomocí procesní průchodky „C“ mimo pec, kde dochází ke zpracování naměřených hodnot.



Obr. 30 Vytvrzovací pec [18]

- Keramické pece – pro zaručení uspokojivé kvality výsledného produktu, je potřeba dodržet teploty udávané konkrétním technologickým postupem, jelikož při nekontrolované teplotě uvnitř pece by mohlo dojít k deformaci výrobku a k jeho znehodnocení. Z tohoto důvodu jsou voleny termočlánky a při jejich výběru je potřeba znát předpokládanou teplotu uvnitř pece v průběhu celého procesu. Pro nižší teploty je možné volit termočlánek typu K, pro vyšší je potom potřeba vybrat typy ze vzácných kovů. V dnešní době jsou termočlánky součástí naprosté většiny elektrických pecí a díky regulátoru kontrolují požadovanou křivku výpalu a ovládání topné spirály od začátku procesu až do konce. Tímto je možné celý postup zautomatizovat a zajistit reprodukovatelnost výsledků. Ukázka keramické vypalovací pece je na obrázku 31.

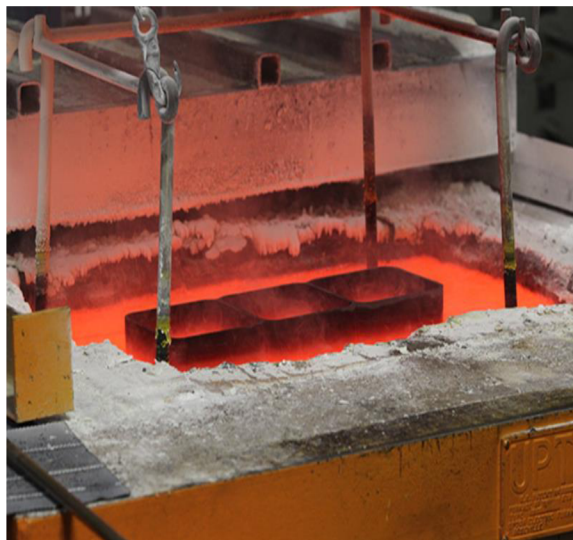


Obr. 31 Keramická vypalovací pec [49]

- Kalení v solných lázních – kde se je z důvodu agresivních výparů potřeba použít zahnutý tvar ochranné jímky termočlánek (obr. 32), aby se připojovací hlavice s kompenzačním vedením nenacházela přímo nad těmito místy, a tudíž se zamezuje poškození snímače. Pro toto funkci je používána titanová ponorná jímka. Ukázka solné lázně je vidět na obrázku 33.



Obr. 32 Zahnutá jímka [18]



Obr. 33 Solná lázeň [50]

4 EXPERIMENT

Byl proveden experiment za účelem porovnání různých termočlánků. Pro tyto účely byly zvoleny tři termočlánky typu „K“ pro různé teplotní rozsahy, které byly použity pro měření totožné teploty a rozdíly mezi naměřenými hodnotami byly porovnány a vyhodnoceny. Zvolené termočlánky byly následující:

- Termočlánek 9993 s rozsahem od -200 °C do 600 °C
- Termočlánek 2294 s rozsahem od -50 °C do 250 °C
- Termočlánek 5293 s rozsahem od -200 °C do 900 °C

S ohledem na tyto rozsahy teplot byla k porovnávání zvolena za vhodnou teplota 100 °C. Pro samotné měření byly tyto termočlánky připojeny k měřicí soupravě Testo 901 zobrazené na obrázku 34.



Obr. 34 Měřicí souprava Testo 901

Při plánování tohoto experimentu byla potřeba vymyslet, jakým způsobem bude teplota navozena a udržována. Prvním návrhem bylo použít vařič zahřátý na určitou teplotu. Tato metoda však byla po bližším zvážení zavrhnuta z důvodu, jakým způsobem vařiče fungují. Uvnitř těchto přístrojů je termostat, který při dosažení požadované teploty zastaví ohřev do doby, než se nastane ochlazení pod určitou úroveň a ohřev se znovu obnoví. Toto by způsobilo neustálé výkyvy teploty, které je pro porovnávací měření nežádoucí. Proto byla zvolena druhá možnost, a to měření teploty zahřátého odporu při stálém napětí.

Pro tyto účely byl zvolen stabilizovaný zdroj s připojeným odporem 11 Ω , který byl válcovitého tvaru s dírou uprostřed, do níž byly termočlánky vkládány. Tímto se omezil vliv okolí na měření, jelikož i malý závan vzduchu mohl způsobit výkyv teploty. Fotografie této sestavy je na obrázku 35. Po celou dobu měření byla teplota v místnosti rovna 23,4 °C.

Po provedení potřebných příprav k experimentu byl zdroj zapnut a vyčkalo se dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k rovnoměrnému zahřátí odporu na konstantní teplotu.



Obr. 35 Zdroj s odporem

4.1 Kalibrace [15]

Následně byla potřeba provést kalibrace na stanovených 100 °C. Toho bylo dosaženo pomocí velmi přesného laboratorního přístroje TERM 2102, který je ukázán na obrázku 36 a ukázka měření je na obrázku 37. Naměřené stejnosměrné napětí na odporu při teplotě 100 °C bylo rovno 8,6 V.



Obr. 36 TERM 2102



Obr. 37 Ukázka měření

Také bylo provedeno kontrolní měření pomocí univerzálního, digitálního multimetru FLUKE 258, který je schopen měřit v mV s až třemi desetinnými místy a k tomuto multimetru byl připojen velmi přesný termočlánek SU 10 - typ ‚J‘ (Fe-Ko) do 500 °C jak je ukázáno na obrázku 38.



Obr. 38 FLUKE 258 s termočlánekem SU 10

Tímto přístrojem bylo naměřeno výstupní napětí 4,019 mV. Pokud byl odpor na správné teplotě, toto napětí by mělo odpovídat napětí v referenční tabulce (tab. 5) pro rozdíl teplot mezi odporem a teplotou okolí. Teplota okolí byla rovna 23,4 °C, tudíž rozdíl teplot je roven 76,6 °C.

Tab. 5 Výřez referenční tabulky termočláneků typu J [15]

[°C]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	3,116	3,169	3,222	3,275	3,329	3,382	3,436	3,489	3,543	3,596
70	3,650	3,703	3,757	3,810	3,864	3,918	3,971	4,025	4,079	4,133
80	4,187	4,240	4,294	4,348	4,402	4,456	4,510	4,564	4,618	4,672

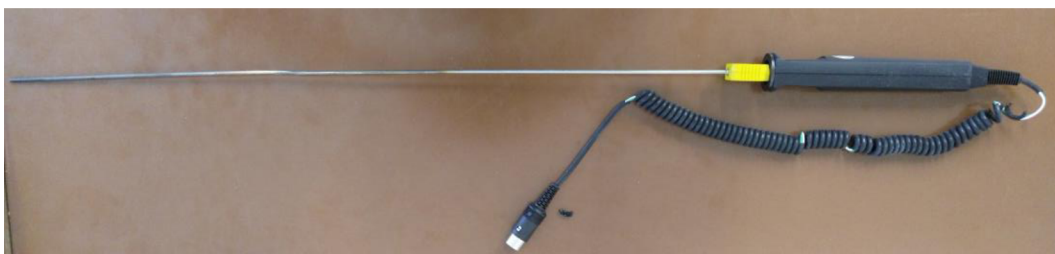
V tabulce je možné vidět, že napětí odpovídá předpokládanému, a jelikož byla kalibrace úspěšná, mohlo se přejít k samotnému měření.

4.2 Měření

Jako první byl k měřicímu přístroji Testo 900 připojen termočlánek 9993 (obr. 39) a vložen do zahřátého odporu. Jelikož tento konkrétní měřicí přístroj umožňuje připojení až dvou různých termočláneků, byl taktéž připojen i termočlánek 5293 (obr. 40) a obdobně zasunut do měřeného místa.



Obr. 39 Termočlánek 9993



Obr. 40 Termočlánek 5293

Jakmile byly snímače na svém místě, bylo potřeba vyčkat dostatečně dlouhou dobu, dokud se naměřené hodnoty neustálily. Po celou dobu měření byl omezen pohyb kolem přístrojů, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Fotografie z průběhu experimentu je na obrázku 41.



Obr. 41 Průběh experimentu

Po ustálení byly hodnoty z displeje odečteny a zapsány. A následně byl termočlánek 5293 vyměněn za termočlánek 2294 (obr. 42) a měření proběhlo stejným způsobem znovu. Po

vyrovnání nová hodnota naměřená termočlánekem 9993 použitým u obou měření odpovídala předchozí, což poukazuje na to, že teplota odporu zůstala během experimentu neměnná.



Obr. 42 Termočlánek 2294

Po posledním úspěšném měření byly tyto hodnoty odečteny a zapsány. Všechny naměřené teploty jsou vypsány v tabulce 6.

Tab. 6 Naměřené hodnoty.

Termočlánek	9993	5293	2294
Naměřená teplota [°C]	113,4	96,8	105,3

Jak je z této tabulky možno vidět, mezi jednotlivými čidly jsou značné rozdíly. Tyto odchylky byly nejpravděpodobněji způsobeny různými rozsahy teplot jednotlivých termočláneků. Jelikož charakteristiky materiálů, z nichž jsou termočláanky vyrobeny, nejsou lineární k jejich fungování v celém určeném rozsahu, je potřeba linearizovat přímkou. Při tomto procesu však dochází ke vzniku různě velkých odchylek mezi počátkem a koncem rozpětí, což se projevuje na přesnosti měření. Pokud by každý z těchto termočláneků byl linearizován pro menší rozsah teplot, byly by odchylky znatelně menší.

5 ZÁVĚRY

Termočláanky patří do skupiny dotykových teploměřů, což znamená, že snímač musí přijít do kontaktu s měřeným objektem, popřípadě prostředím. Vznikají spojením dvou vodičů rozdílných materiálů a pokud je tento spoj přiveden na vyšší teplotu, vzniká na volných koncích rozdíl napětí, které je možné měřit a dle jeho velikosti určit měřenou teplotu. Jelikož termočláanky a jejich ochranné jímky mohou být tvořeny z mnoha materiálů a o různých průměrech, mohou být použity pro mnoho aplikací.

Mezi jejich hlavní výhody nepatří pouze možnost aplikace v různých prostředích, ale také široké teplotní rozsahy, nízká cena a jednoduchost. Ke správnému fungování v konkrétních podmínkách je však potřeba správně zvolit typ, ochranu a jejich zabudování.

Byl proveden experiment za účelem porovnání tří různých termočláanků typu „K“ pro různé teplotní rozsahy na zahřátém elektrickém odporu. Po sepsání a zhodnocení výsledků je možno konstatovat odchylky od měřené, udržované, teploty. Tyto rozdíly byly zdůvodněny různou linearizací jednotlivých termočláanků.

Termočláanky mají díky své flexibilitě obrovské využití a v některých průmyslových odvětvích jsou stále naprosto nenahraditelné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [51]

1. SVOBODA, Miroslav. Měření teploty v energetice a průmyslu. *All for power* [online]. AF POWER agency, 5.5.2009 [cit. 2019-04-17]. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/mereni-teploty-v-energetice-a-prumyslu/>
2. *SENSIT: extend your senses* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, c2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.sensit.cz/>
3. HAVLÍK, Marek. Automatizace. *Střední průmyslová škola Elektrotechniky a Informatiky* [online]. Ostrava: SPŠei Ostrava, c2006-2019, 2002 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.spsei.cz/att/soubory/automatizace.pdf>
4. Termovize. In: *Energetika a technická zařízení budov* [online]. Liberec: Bon Group, c2012 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://bongroup.cz/sluzby/termovize>
5. Pyrometr. In: *Metrostanice* [online]. Markvartice: I & CS [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.meteostanice.cz/pistolove_infra_tplomery-voltcraft_infracerveny_tplomery-voltcraft_irf_65012dip,_optika_12:1,_35_az_650_%C2%B0c,_pyrometr-295919974-559635696-infracervene-teplomery/
6. Dilatační teploměr. In: *Pan Fitinka* [online]. Olomouc: Pan Fitinka, c2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://eshop.panfitinka.cz/p/sitem-teplomery-bimetalovy-12-80-mm>
7. Termočlánek. In: *Vše je měřitelné* [online]. Markvartice: Epřístroje.cz, c2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.epristroje.cz/wifi-teplotni-datalogger-pro-termoclanky-j--k--n--t--wifi-tc/>
8. FOIT, Julius a Lubomír HUDEC. *Součástky moderní elektroniky*. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 363 s. ISBN 80-010-1789-3.
9. REICHL, Jaroslav. Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/910-seebeckuv-jev>
10. How to Prevent Temperature Measurement Errors When Installing Thermocouple Sensors and Transmitters. *The leadear in industrial I/O* [online]. Wixom: Acromag, c2018 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://www.acromag.com/sites/default/files/How_to_prevent_temperature_measurement_errors_when_installing_thermocouple_sensors_and_transmitters_926A.pdf
11. KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
12. SCERVINI, Michele. Thermocouples: the operating principal. *University of Cambridge* [online]. Cambridge: University of Cambridge, c2019, 31. August 2009 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/teThermocouplesOperatingPrinciples.html>
13. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1983, 371 s. Automatizace a regulace

14. BUREŠ, Jiří. Seebeckovy koeficienty. *ConVERTER* [online]. Jiří Bureš, c2002 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>
15. Termoelektrický článek typ "J". *Měřicí a regulační technika* [online]. Nový Bor: MAVIS Nový Bor, c2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.mavis.cz/editor/filestore/File/Tabulky/Mavis%20-%20Tabulka%20termoelektrickeho%20napeti%20clanek%20typ%20J.pdf>
16. DVOŘÁK, Otto a Pavel POLEDNÁK. Měření teploty termočlánky při požárních zkouškách. *TZB-Info* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2019, 24.4.2017 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/15663-mereni-teploty-termoclanky-pri-pozarnich-zkouskach>
17. FRK, Martin a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi. *Elektrorevue: Časopis pro elektrotechniku*. 2012(14/4). ISSN 1213-1539.
18. *Termočlánekové snímače teploty* [online]. Schwaig: GÜNTHER, c2016 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu>
19. ZÁBRANSKÝ, Jaroslav. *Korekce a kompenzace při měření teplot* [online]. Brno, 2018, 70 s. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15547. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce František Vdoleček.
20. *Thermocouple info* [online]. San Diego: REOTEMP Instrument Corporation, c2011 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.thermocoupleinfo.com/index.htm>
21. *Hotcontrol* [online]. Plzeň: Hotset [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.hotset.com/cz/>
22. Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost. *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha: E-konstrukter, c2013-2017, 5.7.2014 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
23. How to Determine Thermocouple Accuracy with Initial Calibration Tolerances. In: *Learning Instrumentation And Control Engineering* [online]. c2009-2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.instrumentationtoolbox.com/2014/07/how-to-determine-thermocouple-accuracy.html>
24. CAPGO. *Thermocouples* [online]. Balwyn: Capgo, c1998-2013 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html>
25. Opláštěný termočlánek. In: *FURUYA METAL* [online]. FURUYA METAL, c2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.furuyametals.co.jp/english/products/product06/thermocouple_04.html
26. SLÁDEK, Zdeněk a František VDOLEČEK. *Technická měření*. Brno: VUT Brno, 1992, 220 s. ISBN 80-214-0414-0.

27. Výroba platinových termočlánků. *MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2013, **2013**(9), 116. 130903. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-platinovych-termoclanku.html>
28. [Opláštění]. In: *A Global Leader in Automated Test and Automated Measurement Systems* [online]. Austin: National Instruments, c2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/image6892343376860590777.png>
29. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
30. How To Use Thermocouple Protection Tube Correctly. *HUANSHANG HIGHTECH CO., LTD*, [online]. Jiangsu: HUANSHANG HIGHTECH, 4 April 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.hshightec.com/info/how-to-use-thermocouple-protection-tube-correc-24899773.html>
31. W. DEAN, S. Božidar LIŠČIĆ, Saša SINGER a Božo SMOLJAN. *Prediction of Quench-Hardness within the Whole Volume of Axially Symmetric Workpieces of Any Shape*. 2010/02/01, **7**. DOI: 10.1520/JAI102647.
32. [Ochranné jímky]. In: *Come alive* [online]. Noida: IndiaMART InterMESH, c1996-2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/pid-temperature-controllers-15976676612.html>
33. *Přístroje na měření teploty SITRANS T: Termočlánky* [online]. Praha: Siemens, 2011 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://www1.siemens.cz/ad/current/content/data_files/procesni_instrumentace/mereni_teploty/katalog_termoclanky_2011_cz.pdf
34. Termočlánková kompenzační vedení. ZPA NOVÁ PAKA. *ZPA Nová Paka* [online]. Nová Paka: ZPA Nová Paka, c2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.zpanp.cz/files/doc/kompenzacni-vedeni-pro-termoclankove-snimace-teploty-21-1.pdf>
35. *Měření teploty: Termočlánky* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mtttd.htm>
36. *Construction and application of thermocouples* [online]. Fulda: JUMO GmbH & Co., 2009 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://www.jumo.cz/media/PDFs/Support_Download/FAQ/Temperature_measurement/t90.1000en.pdf
37. KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, 1993, 224 s. ISBN 80-858-2700-X.
38. *Thermocouple Cold (Reference) Junction Compensation* [online]. LAURILA, heikki. Beamex, c2019, Sep 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/thermocouple-cold-junction-compensation>
39. Měření teploty - 1: Doplněná inovovaná přednáška. In: *Katedra textilních a jednoúčelových strojů - TUL* [online]. Liberec: Katedra textilních a jednoúčelových strojů TUL, c2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Mereni_teploty_1_ver2.pdf

40. ThermaData® WiFi Thermocouple Logger (2 channel, Type K). In: *ThermoWorks* [online]. American Fork: ThermoWorks, c2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: 40. <https://www.thermoworks.com/ThermaData-WiFi-Type-K>
41. Měření teploty při obrábění. *Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_04.pdf
42. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
43. Měření teploty tavenin kovů. *MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2001, **2001**(1), 36. 010188. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-teplot-tavenin-kovu.html>
44. Slévárna. In: *Stolle castable solutions* [online]. Pardubice: Kovostrojservis, c2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.slevarna-stolle.cz/informace/galerie-obrazku/site/1/>
45. Měření a vizualizace teploty taveniny od TSK. *DETYCON Solutions* [online]. Liberec: DETYCON Solutions [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.detycon.com/index.php/portfolio2/mereni-teploty-taveniny>
46. MÁCHA, Viktor. Ocelárna Petrostal, odpich siemens-martinské pece. In: *Industrial blog* [online]. Mácha, c2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.industrialnifotografie.cz/blog/martinska-ocelarna-v-petrohradu-37.html>
47. Elektronické vytvrzovací a sušící pece. *H+V VMD Grygov* [online]. Grygov: H+V VMD Grygov, c2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.hvgrygov.cz/cz/elektricke-a-plynove-pece/>
48. Výpal keramiky v elektrické peci. *Humany* [online]. Humany, 2011 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.humany.cz/vypal-keramiky-v-elektricke-peci-t-103.html>
49. Vypalovací keramická pec Nabertherm. In: *Vypalovací keramické pece* [online]. Blansko: keramicka-pec.cz [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.keramicka-pec.cz/-/eshop/1-1-Kategorie-produktu-1/0/5/1-Vypalovaci-keramicka-pec-Nabertherm-TOP-45-zaruka-3-roky>
50. [Solná lázeň]. In: *BCD* [online]. Skokie: Best Cutting Die [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: [http://bestcuttingdie.com/?page_id=7143#prettyphoto\['rpwCRTNVAYF41GOVAO PPTecISUWJJT6RT4O'\]/2/](http://bestcuttingdie.com/?page_id=7143#prettyphoto['rpwCRTNVAYF41GOVAO PPTecISUWJJT6RT4O']/2/)
51. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a_i	i-tý koeficient polynomu	$[\mu\text{V}\cdot^\circ\text{C}^{-i}]$
b_i	i-tý koeficient inverzního polynomu	$[\text{C}\cdot\mu\text{V}^{-i}]$
c_0, c_1	Konstanty normované pro teplotní rozsahy -270 až 0 $^\circ\text{C}$ a 0 až 1300 $^\circ\text{C}$	$[-]$
E	Termoelektrické napětí	$[\text{mV}]$
n	Řád polynomu	$[-]$
T_1, T_2, T_3	Teplota	$[\text{K}]$
t	Naměřená teplota	$[\text{C}]$
t_1	Absolutní teplota měřeného konce	$[\text{C}]$
t_2	Absolutní teplota srovnávacího konce	$[\text{C}]$
t_{90}	Teplota ITS-90	$[\text{C}]$
U_1, U_2, U_3	Napětí	$[\text{mV}]$
α	Seebeckův koeficient pro kombinaci materiálů	$[\mu\text{V}/^\circ\text{C}]$
α_A	Seebeckův koeficient pro materiál A	$[\mu\text{V}/^\circ\text{C}]$
α_B	Seebeckův koeficient pro materiál B	$[\mu\text{V}/^\circ\text{C}]$
$\alpha'_{A,B}$	Seebeckovy koeficienty druhého řádu pro kov A a B	$[\mu\text{V}/^\circ\text{C}^2]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Termovize [4].....	9
Obr. 2 Pyrometr [5]	9
Obr. 3 Dilatační teploměr [6]	9
Obr. 4 Termočlánek [7]	9
Obr. 5 Provedení spoje [13].....	10
Obr. 6 Princip termočláneků [12].....	10
Obr. 7 Nelinearita [11].....	11
Obr. 8 Charakteristiky [19].....	12
Obr. 9 Opláštění [25].....	14
Obr. 10 Možnosti provedení teplého konce [28].....	15
Obr. 11 Průřez testovaným čidlem [31]	15
Obr. 12 Časové konstanty [31].....	16
Obr. 13 Příklady jímek [32].....	16
Obr. 14 Průřez jímkou [18].....	16
Obr. 15 Kompenzační vedení [15]	17
Obr. 16 Schéma zapojení [11]	17
Obr. 17 Grafické znázornění korekce [10]	18
Obr. 18 Termočlánek s ledovou lázní [38].....	18
Obr. 19 Termočlánek se známou teplotou [38]	19
Obr. 20 Termočlánek s měřením teploty [38]	19
Obr. 21 Termočlánek s automatickou kompenzací [38].....	19
Obr. 22 Prostorový snímač [40]	20
Obr. 23 Možnosti umístění snímače [39]	20
Obr. 24 Měření povrchové teploty [11].....	21
Obr. 25 Měření teploty při obrábění [41]	21
Obr. 26 Schéma měření teplotních cyklů [42].....	22
Obr. 27 Slévárenství [44]	22
Obr. 28 Ponorná termočláneková sonda [28].....	22
Obr. 29 Siemens-martinská pec [46]	23
Obr. 30 Vytvrzovací pec [18].....	23
Obr. 31 Keramická vypalovací pec [49].....	24
Obr. 32 Zahnutá jímka [18]	24
Obr. 33 Solná lázeň [50].....	24
Obr. 34 Měřicí souprava Testo 901	25
Obr. 35 Zdroj s odporem	25
Obr. 36 TERM 2102.....	26
Obr. 37 Ukázka měření.....	26
Obr. 38 FLUKE 258 s termočlánekem SU 10.....	26
Obr. 39 Termočlánek 9993	27
Obr. 40 Termočlánek 5293	27
Obr. 41 Průběh experimentu.....	27
Obr. 42 Termočlánek 2294.....	28

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Seebeckovy koeficienty [14].	11
Tab. 2 Ukázka referenční tabulky [15].	12
Tab. 3 Nejčastěji používané typy [11].	13
Tab. 4 Barevné označení [21].	14
Tab. 5 Výřez referenční tabulky termočlánku typu J [15].	26
Tab. 6 Naměřené hodnoty.	28







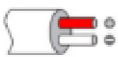



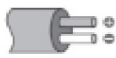
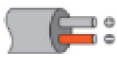
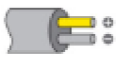



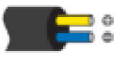
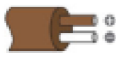





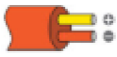
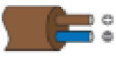







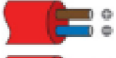




SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Referenční tabulka pro typ J [15]
- Příloha 2 Barevné značení termočlánků [21]
- Příloha 3 Toleranční třídy [18]



hotcontrol

Mezinárodní barevné označení termočlánků v měřicí technice

Typ termočlánku		 DIN EN 60584	 DIN 43714	 ANSI MC 96.1	 NF C 42-324	 BS 4937/1843
R	⊕ Platin-13% Rhodium ⊖ Platin					
S	⊕ Platin-10% Rhodium ⊖ Platin					
B	⊕ Platin-10% Rhodium ⊖ Platin-8% Rhodium					
J	⊕ Železo ⊖ Měď-Nikl					
T	⊕ Měď ⊖ Měď-Nikl					
E	⊕ Nikl-Chrom ⊖ Nikl					
K	⊕ Nikl-Chrom ⊖ Nikl			 	  	 
N	⊕ Nikl-Chrom-Silikon ⊖ Nikl-Silikon					
U	⊕ Měď ⊖ Měď-Nikl					
L	⊕ Železo ⊖ Měď-Nikl					

Hotset ČR s.r.o. = Pálevská 1426/7, 393 00 Píseň = tel.: +420 377 259 042 = fax: +420 377 530 364 = www.hotset.cz = e-mail: hotset@hotset.cz
 Hotset SK s.r.o. = Nám. Slobody 11, 968 01 Nová Baňa = tel.: +421 88 55 378 = fax: +421 88 55 378 = www.hotset.sk = e-mail: hotset@hotset.sk
 HOTSET Hungary Kft. = Kossuth Lajos 75, 2500 Esztergom = tel.: +36 33 404 660 = fax: +36 33 404 660 = www.hotset.hu = e-mail: hotset@hotset.hu
 TOV Hotset Ukraine = st. Bestuzhev 12/16, 880 09 Uzhhorod = tel.: 050 589 56 39 = fax: 067 310 52 47 = www.hotset.com.us = e-mail: hotset@hotset.com.us

Příloha 3 Toleranční třídy [18]

1/1

Type	Rozsah	Třída 1	Rozsah	Třída 2	Rozsah	Třída 3
K	-40...1000°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...1200°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C or 0,0015*(t)
J	-40...750°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...750°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-----	-----
S/R	0...1600°C	±1,0°C tj. 1,0+0,003(t-1100)°C	0...1600°C	±1,5°C tj. 0,0025*(t)	-----	-----
B	-----	-----	600...1700°C	±1,5°C tj. 0,0025*(t)	600...1700°C	4°C tj. 0,005*(t)
N	-40...1000°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...1200°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C tj. 0,0015*(t)
T	-40...350°C	±0,5°C tj. 0,004*(t)	-40...350°C	±1,0°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±1,0°C tj. 0,0015*(t)
E	-40...800°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...900°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C tj. 0,0015*(t)