



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

**Mapování tepelného zatížení ve spalovacím  
motoru**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2019**

**Aleš Flídr**

**Studijní program:** B2342 Teoretický základ strojního inženýrství  
**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový  
**Vedoucí práce:** Ing. Zbyněk Syrovátka

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Flidr** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **465327**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Mapování tepelného zatížení ve spalovacím motoru**

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši možných způsobů zjišťování tepelného zatížení dílů spalovacího motoru primárně zaměřené na obtížně přístupné součásti. Na základě zjištěných poznatků, navrhnete konkrétní způsob měření pro pokročilý zapalovací systém plynového motoru s vyplachovanou předkomůrkou.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Zbyněk Syrovátka, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Ing. Zbyněk Syrovátka  
podpis vedoucí(ho) práce


  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
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.

29.4.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# Anotační list

Jméno autora:	Aleš Flídr		
Název BP:	Mapování tepelného zatížení ve spalovacím motoru		
Akademický rok:	2018/2019		
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel		
Vedoucí BP:	Ing. Zbyněk Syrovátka		
Bibliografické údaje:	Počet stran		47
	Počet obrázků		18
	Počet tabulek		4
	Počet příloh		13
Klíčová slova:	tepelné zatížení a teplota komponent, měření teploty, termočlánek, pyrometr, vyplachovaná předkomůrka, hlava válců		
Keywords:	thermal loading and component temperature, temperature measuring, thermocouple, pyrometer, scavenged pre-chamber, engine head		
Anotace:	Bakalářská práce popisuje tepelné zatížení vybraných komponent spalovacího motoru. Dále se zabývá popisem různých metod měření teplot ve špatně přístupných místech. Na popisnou část navazuje návrh měření pro pokročilý systém zapalování s vyplachovanou předkomůrkou a následné vypracování ve 3D programu PTC Creo.		
Annotation:	The bachelor thesis describes the thermal load of selected components of the internal combustion engine. It also describes various methods of measuring temperatures in poorly accessible places. A descriptive part is followed by a measuring design for advanced ignition system with scavenged pre-chamber and the subsequent development of the design via 3D program PTC Creo.		

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu panu Ing. Zbyňku Syrovátkovi a panu Ing. Jiřímu Vávrovi, Ph.D za odborný dohled, konzultace a cenné rady při vypracování této práce. Mé poděkování patří také panu Ing. Václavu Zárybnickému z firmy Micro-Epsilon za jeho odborné rady při tvoření samotného návrhu.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Mapování tepelného zatížení ve spalovacím motoru“ vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zbyňka Syrovátky s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

.....

Aleš Flídr

# Obsah

Seznam použitých znaků a symbolů.....	8
1 Úvod .....	9
2 Teplotní zatížení komponent ve spalovacím prostoru.....	10
2.1 Teplo .....	10
2.1.1 Sdílení tepla .....	10
2.2 Teplota .....	11
2.2.1 Používané teplotní stupnice .....	11
2.3 Konkrétní případy tepelného zatížení komponent .....	12
2.3.1 Píst .....	12
2.3.2 Vložka válce .....	13
2.3.3 Výfukový ventil.....	13
3 Měření teploty .....	15
3.1 Dotykové měření teploty .....	16
3.1.1 Dilatační teploměry .....	17
3.1.2 Termoelektrický článek .....	17
3.1.3 Odporové snímače teploty .....	19
3.2 Bezdotykové měření teploty .....	21
3.2.1 Pyrometry .....	22
3.2.2 Termovize a fotometrie .....	25
3.3 Shrnutí měření teploty .....	26
4 Pokročilý systém zapalování .....	27
4.1 Návrh teplotních snímačů .....	28
4.1.1 Dotykové snímání.....	28
4.1.2 Bezkontaktní měření.....	30
5 Závěr.....	32

Seznam použité literatury .....	33
Seznam obrázků.....	35
Seznam tabulek.....	36
Seznam příloh.....	37
Seznam příloh na CD.....	37

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$c$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost světla
CFD		Computational Fluid Dynamics
$h$	$[\text{J}\cdot\text{s}]$	Planckova konstanta
$k$	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}]$	Boltzmannova konstanta
$M_0$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	Intenzita vyzařování černého tělesa
$M_{0\lambda}$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa
MKP		Metoda konečných prvků
$Q$	$[\text{J}]$	Teplo
$\dot{q}$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	Hustota tepelného toku
$T$	$[\text{K}]$	Termodynamická teplota
$t$	$[\text{°C}]$	Celsiova teplota
$t$	$[\text{°F}]$	Fahrenheitova teplota
$\Delta T$	$[\text{K}]$	Gradient teploty
$\alpha$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla
$\varepsilon$	$[-]$	Emisivita
$\lambda$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Tepelná vodivost
$\lambda$	$[\text{m}]$	Vlnová délka
$\lambda$	$[-]$	Směšovací poměr
$\sigma$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefan-Boltzmannova konstanta



# 1 Úvod

Posledních několik desetiletí se vývoj spalovacích motorů soustředí především na zvyšování celkové účinnosti a zároveň na co největší snižování emisí. S touto problematikou úzce souvisí zjišťování tepelného zatížení na těžce přístupných místech, jako jsou např. místa v oblasti spalovacího prostoru nad pístem válce. Se znalostí tepelného průběhu můžeme kontrolovat funkci jednotlivých dílů i případně upravovat konstrukci vedoucí k celkovému zlepšení (např. odstraněním ostrých hran ze spalovacího prostoru, které by způsobovaly horká místa a zároveň by vedly k nežádoucím samozápalům směsi). K zjišťování teplotního zatížení může docházet měření (použitím teplotních snímačů) nebo výpočetně, např. pomocí metody konečných prvků (MKP).

V této bakalářské práci jsou uvedeny příklady tepelného zatížení vybraných dílů spalovacího prostoru. Jednotlivé metody snímání teploty jsou rozepsány v úvodní části předkládané práce. Na zjištěné poznatky navazuje vytvoření návrhu vhodného umístění dvou různých teplotních snímačů (dotykový i bezdotykový) při použití pokročilého systému zapalování s vyplachovanou předkomůrkou, u kterého je kladen požadavek na zjištění teploty po povrchu i vně spodního dílu předkomůrky.

## 2 Teplotní zatížení komponent ve spalovacím prostoru

Chceme-li zlepšovat vlastnosti (výkon, účinnost, tvorbu emisí atd.) spalovacího motoru, nesmíme opomenout kromě jiného také tepelné zatížení jednotlivých komponent. Každá komponenta je zatěžována jiným způsobem a je požadováno, aby pracovala v určitém rozmezí teplot. Při navrhování komponent je třeba věnovat pozornost i problematice sdílení tepla. Na úvod této práce si tedy vymezíme základní pojmy týkající se této problematiky. Podrobněji popsáno v [1].

### 2.1 Teplo

Jedná se o nestavovou veličinu, která vyjadřuje změnu vnitřní energie způsobenou teplotním rozdílem mezi danou soustavou a jejím okolím. Značíme ji  $Q$  a jednotkou je joule (J). Pro výpočty byla zavedena znaménková konvekce, kde teplo přivedené do soustavy má kladné znaménko (+) a teplo odvedené ze soustavy záporné (-).

#### 2.1.1 Sdílení tepla

Ke sdílení tepla dochází třemi základními způsoby:

##### a) vedením (kondukcí)

Teplo je vedeno mikroskopickým pohybem molekul a atomů, který je způsoben změnou teploty. Takový přenos se vyskytuje nejčastěji u pevných látek. U tekutin, tj. kapalin a plynů, pouze pokud jsou v klidu. Přenos tepla kondukcí je popsán Fourieovým zákonem

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla T, \quad (2.1)$$

kde  $\dot{\mathbf{q}}$  je vektor tepelného toku (teplo, které projde jednotkovou plochou za jednotku času),  $\lambda$  je tepelná vodivost ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a  $\nabla T$  je gradient teploty.

Pro představení si dochází ke kondukcí mezi hlavou válců, stěnami válců a pístem; mezi pístními kroužky a stěnami válců.

##### b) prouděním (konvekcí)

K přenosu tepla dochází mezi pohybujícími se tekutinami a mezi pevnou látkou obtékanou tekutinou. Pokud je pohyb tekutiny vyvolán uměle, tak se jedná o tzv. nucenou konvekci.

Tepelný tok přestupující z proudící kapaliny o teplotě  $T$  do pevné látky (stěny) o teplotě  $T_w$  je popsán Newtonovým ochlazovacím zákonem

$$\dot{q} = \alpha(T - T_w) \quad (2.2)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla ( $Wm^{-2}K^{-1}$ ).

Ve spalovacím prostoru dochází hned k několika případům, kdy se jedná o nucenou konvekci. Například mezi plyny ve válci, hlavou válců, stěnami válců, ventily a písty během pracovních fází motoru.

### c) zářením (radiací)

Podstatou tohoto sdílení tepla je vyzařování a pohlcování elektromagnetických vln, které vznikají přeměnou části vnitřní energie zahřátého tělesa. Jedná se o tzv. sálání.

S takovým sdílením tepla se můžeme setkat v okolí každého teplého místa motoru. Konkrétně mezi místem zážehu směsi a stěnami spalovacího prostoru.

Na tomto místě je nutné dodat, že ve spalovacím motoru a jeho okolí nedochází pouze k jednomu způsobu sdílení tepla, ale ke kombinaci dvou i tří těchto způsobů.

## 2.2 Teplota

Teplota patří mezi základní termodynamické vlastnosti, které určují stav hmoty. K její důležitosti přispívá, že téměř každá vlastnost látek je teplotně závislá. Jedná se o míru kinetické energie pohybu molekul a atomů, jejichž rychlost pohybu se kvůli vzájemným nárazům neustále mění. Za nejnižší teplotu, ke které se lze přiblížit, ne však dosáhnout, je považovaná tzv. absolutní nula, která je rovna hodnotě 0 K. Při této teplotě veškerý pohyb ustává. Maximální hodnota teploty zatím není z žádných termodynamických zákonů zřejmá.

### 2.2.1 Používané teplotní stupnice

Jak je tomu i dnes, tak i v minulosti se užívalo několika teplotních stupnic. Teplotní stupnice by měla být nezávislá na měřené látce. Z tohoto předpokladu byla zavedena **termodynamická stupnice**, jejíž definice vychází z účinnosti Carnotova cyklu. [3] Účinnost závisí pouze na různých teplotách, ve kterém tepelný stroj pracuje, nikoliv však na použité teplotně závislé látce. Jednotkou je kelvin (K). Je definován pomocí trojného bodu vody (rovnovážný stav, při kterém je voda ve třech skupenstvích – pevném, kapalném a plynném), který má zvolenou hodnotu  $T = 273,16 \text{ K}$  ( $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Od termodynamické stupnice je odvozena **Celsiova stupnice**. Jednotkou je stupeň Celsia (°C) a je definovaná pomocí bodu tuhnutí vody (0 °C) a bodu varu vody (100 °C). Velikost dílku Celsiovy stupnice je totožný s termodynamickou stupnicí. Celsiova teplota je rovna rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K.

$$t[°C] = T[K] - 273,15. \quad (2.3)$$

Jako další se používá **Fahrenheitova stupnice**, pro kterou platí převodní vztah:

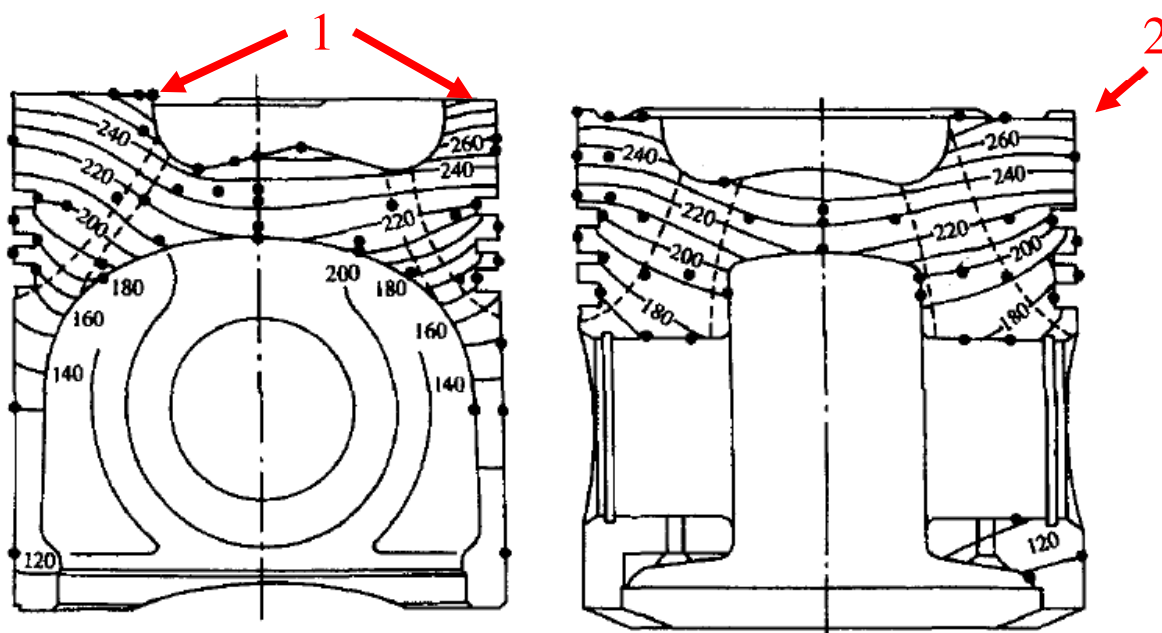
$$t[°F] = \frac{9}{5}T[K] - 459,67 = \frac{9}{5}t[°C] - 32, \quad (2.4)$$

kde T je termodynamická teplota.

Na teplotní stupnici jsou definované body dle mezinárodní teplotní stupnice ITS-90. [5]

## 2.3 Konkrétní případy tepelného zatížení komponent

### 2.3.1 Píst



Obr. 2.1: Teplotní analýza pístu na měřeném vznětovém motoru s přímým vstřikováním při plné zátěži. Vrtání 125 mm, zdvih 110 mm, kompresní poměr 17, 3000 ot/min.[1]

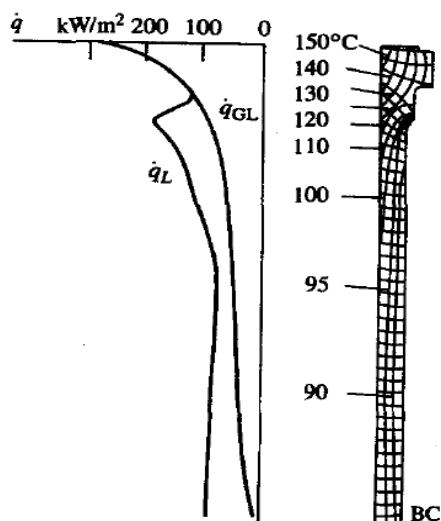
Na Obr. 2.1 vidíme, že největší teplota je v koruně pístu (pozice 1) a také mezi dnem pístu a horním můstkem (pozice 2). To je z hlavní části důsledkem přímého kontaktu se spaliny. Píst je tepelně namáhán také v důsledku vzniku tepla třením pístu a pístních kroužků o stěny válce. [2]

Tepelné rozložení je závislé na typu spalovacího motoru. I přes vyšší teploty při spalování u zážehového motoru (až 2 500 °C) je teplota na dně pístu o 50 °C nižší než u motoru

vznětového. To je způsobeno vyšší hustotou a turbulentním prouděním spalin, které zvyšují konvekční přenos tepla do dna pístu. Obdobně můžeme pozorovat změny i u použitého materiálu pístu. Kvůli dobrému odvodu tepla a také nízké hmotnosti se používají převážně písty ze slitin hliníku a křemíku. Oproti litinovým pístům pracují při teplotách nižších o 40 až 50 °C. [1]

Se znalostí tepelného zatížení pístu jsme schopni navrhnout jeho správný tvar. Při maximálním zatížení dochází ke značné tepelné roztažnosti materiálu. Z toho vychází, že profil by měl být navržen tak, aby při maximálním zatížení byl zcela válcový a nedošlo k zadření pístu ve válci. Více o konstrukci i způsobů chlazení pístů viz [14].

### 2.3.2 Vložka válce



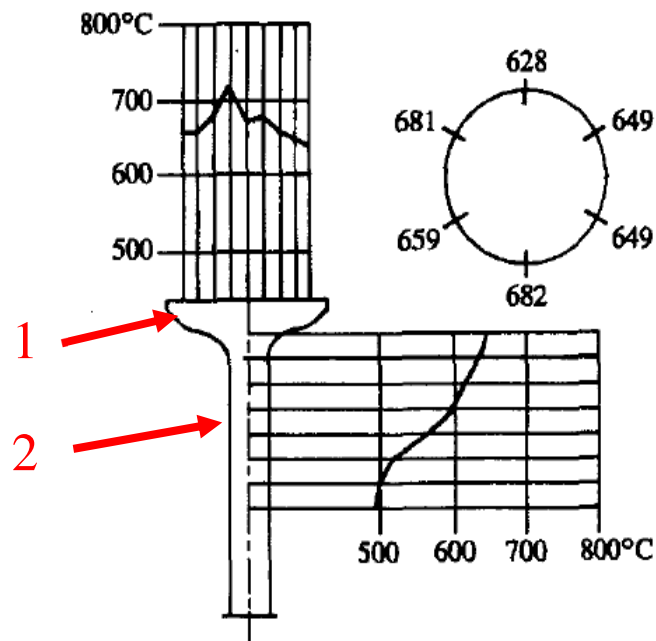
Obr. 2.2: Tepelné zatížení a průběh tepelného toku ve vložce válce vznětového motoru s přímým vstřikováním při 1500 ot/min. [1]

Z Obr. 2.2 je zřejmé, že se vzdáleností od spalovacího prostoru klesá teplota a tepelný tok. Nemalá část zatížení je způsobena třením mezi pístem a vložkou v horní části, tj. v místech poblíž horní úvrati, kde se odehrává hlavní část spalování. V průběhu tepelného toku je tato třecí ztráta znázorněna jako rozdíl mezi  $\dot{q}_{GL}$  (tepelným tokem mezi zapálenou směsí a vložkou) a  $\dot{q}_L$  (celkovým tepelným tokem vložky). [1]

### 2.3.3 Výfukový ventil

Výfukové ventily jsou vystaveny velkému tepelnému zatížení (mimo to i abrazivním a korozivním účinkům produktů spalování [2]). Průběh teploty v talíři (pozice 1) a dřívku (pozice 2) ventilu je vidět na Obr. 2.3. Při návrhu ventilu se snažíme dosáhnout co nejlepšího

přestupu tepla z dřívku ventilu do vodítka a hlavy válců. Sací ventily jsou vystaveny nižším teplotám, protože jsou ochlazovány čerstvou náplní.

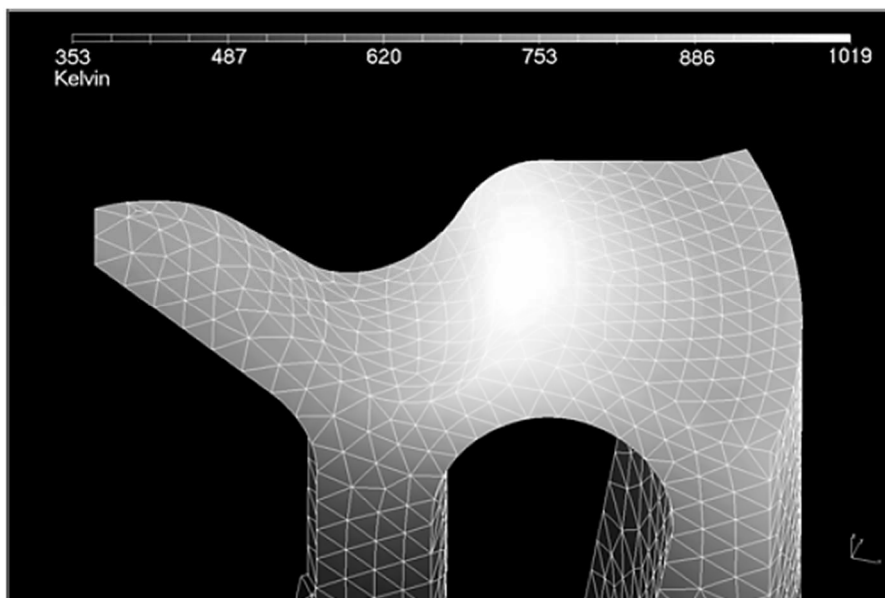


Obr. 2.3: Tepelné zatížení jednoho ze čtyř výfukových ventilů dvoudobého vznětového motoru. Vrtání 98 mm, zdvih 114 mm. [1]

Při návrhu jsou kladeny vysoké nároky na volbu materiálu, aby v důsledku vysokých teplot nedocházelo k propálení, deformaci nebo korozi ventilů. Výfukové ventily jsou, oproti sacím ventilům, bimetalické. Používá se legovaná austenitická ocel pro talíř, která disponuje vysokou tepelnou odolností. Pro dřív se využívá martenzitická ocel s dobrými kluznými vlastnostmi. Sací ventil bývá vyroben pouze z oceli martenzitické. Podrobněji v [2], [14].

### 3 Měření teploty

Rozdělení teplot na zkoumaném objektu může být numericky vypočteno nebo experimentálně změřeno. Při numerickém výpočtu je předpoklad, že známe tepelné toky na daných místech povrchu a následně jsme schopni provést výpočet pomocí metody konečných prvků (MKP). Tato metoda spočívá v částečném zjednodušení tvaru objektu, tj. nahrazení povrchu konečným počtem prvků (bodů), které pospojováním tvoří síť z geometricky popsatelných útvarů (čtyřúhelníků, trojúhelníků aj.). MKP nám tedy umožňuje hledání parametrů konečných prvků místo hledání spojitých funkcí. Výpočet je limitován požadovaným časem a použitým hardwarem. Výsledný průběh teploty je znázorněn na Obr. 3.1.

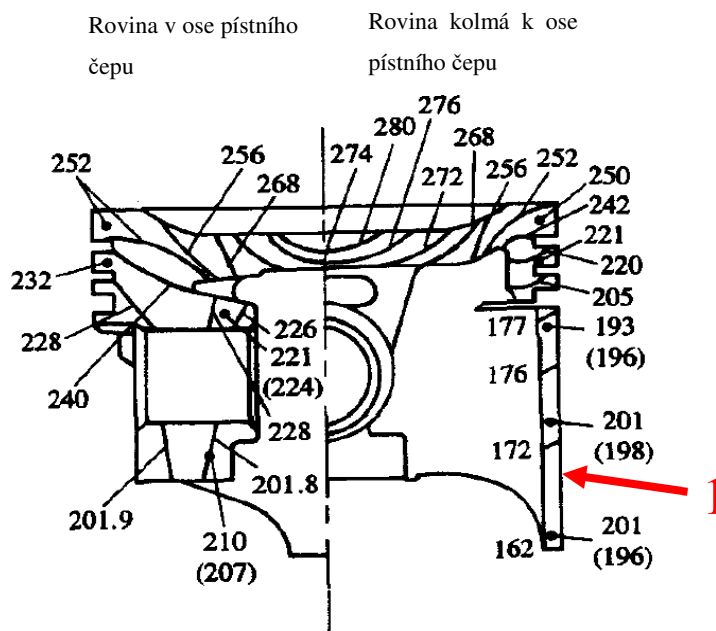


Obr. 3.1: Výpočtová síť a průběh teploty (K) v pístu vypočtený pomocí MKP.[6]

Experimentální měření teploty je realizováno pomocí měřících senzorů (snímačů). Můžeme jej dělit dle několika kritérií. Dle styku s měřeným prostředím na dotykové a bezdotykové. Dle fyzikálního principu na termoelektrické, odporové, polovodičové, dilatační, kapacitní, chemické, radiační, šumové, akustické, magnetické a aerodynamické. [3]

V praxi se nejčastěji setkáváme s těmito typy snímačů: termočlánky, odporovými termistory a teploměry, pyrometry, IR (infračervenými) snímači a bimetalovými pásky.

Na Obr. 3. 2 můžeme vidět porovnání mezi vypočtenou a změřenou teplotou částí pístu. Výsledky jsou téměř totožné, až na výjimku v oblasti pláště pístu (pozice 1), kde byl zveličený součinitel přestupu tepla  $\lambda$ . [1]



Obr. 3.2: Porovnání vypočtených a změřených (bodové odkazy) teplot částí pístu čtyřválcového zážehového motoru o objemu 2,5 l při plné zátěži, 4600 ot/min. [1]

### 3.1 Dotykové měření teploty

Při dotykovém měření dochází k přímému styku snímače a měřeného prostředí. Volba snímače a jeho upevnění musí odpovídat použití, musí mít dobrý kontakt s měřeným povrchem, kvůli dobrému prostupu tepla, a zároveň ho nesmí ovlivňovat.

#### Výhody

- jednoduchost a nižší cena přístrojů oproti bezdotykovému měření
- velké rozmezí snímaných teplot

#### Nevýhody

- nepřesnost měření způsobená špatným kontaktem snímače s povrchem
- nepřesnost měření způsobená ovlivněním povrchu snímačem
- pouze bodové měření
- není možné měřit teplotu pohybujících se (rotujících) těles



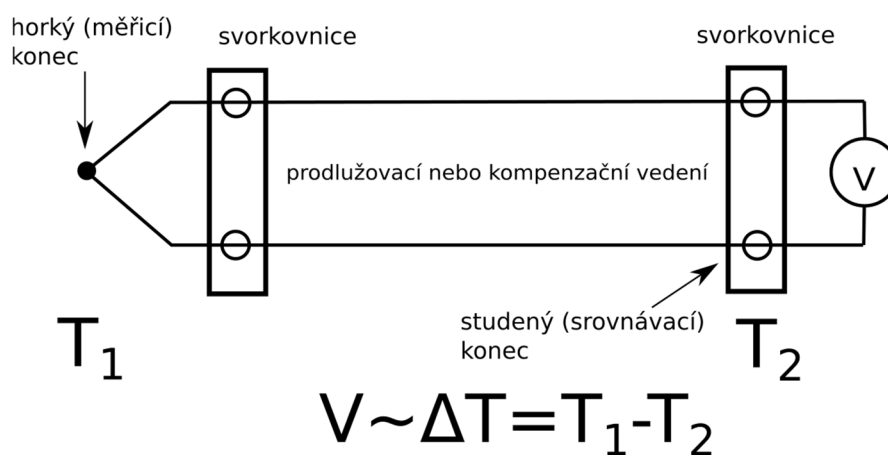
### 3.1.1 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry pracují s teplotní roztažností pevných, kapalných a plynných látek. Setkáme se s několika typy: tyčovými, bimetalickými, skleněnými a tlakovými (kapalinovými, plynovými a parními). [3]

V této práci se nebudeme zabývat jejich detailním rozbořem, neboť nejsou příliš vhodná na měření teplot ve špatně přístupných místech, a to především kvůli větším rozměrům. Podrobněji jsou dilatační teploměry popsány v [3].

### 3.1.2 Termoelektrický článek

Jedná se o snímač vzniklý spojením (svařením) dvou vodičů z různých kovů. Termoelektrické články (termočlánky) pracují na principu tzv. Seebeckova jevu. Ten říká, že pokud mají dva spoje dvou různých kovů rozdílnou teplotu, tak napětí měřené mezi těmito spoji je nenulové. Z toho vyplývá, že termočlánek lze využít jako zdroj napětí, který má malý vnitřní odpor. Abychom zjistili absolutní hodnotu měřícího konce, musíme znát teplotu studeného konce. Termočlánky jako jediné snímače měří pouze rozdíl teplot. Schéma měření je znázorněno na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma zapojení termočlánku. [4]

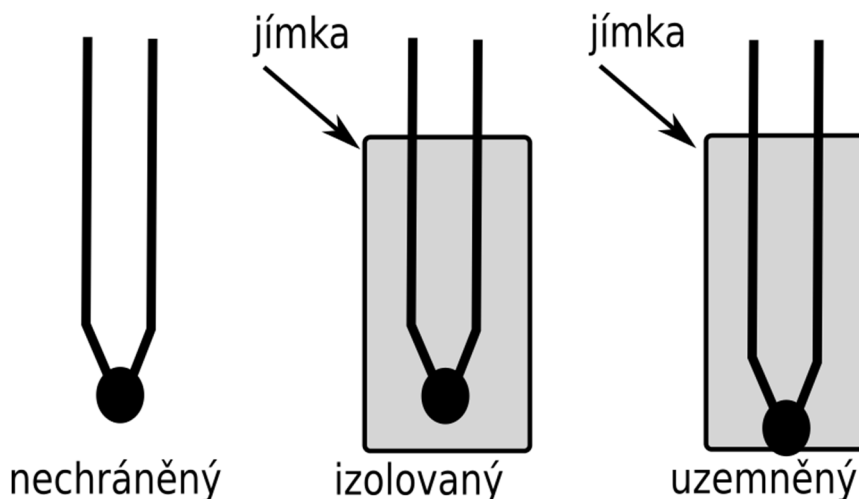
Prodlužovací vedení bývá vyrobeno ze stejného materiálu jako termočlánek. Pokud pro termočlánek použijeme drahé materiály (vzácné kovy), jako je například platina nebo rhodium, tak prodlužovací vedení ztrácí smysl a užijeme tzv. kompenzační vedení, které je z obecných kovů a v určitém rozsahu teplot (nepřesahující teplotu 200 °C [7]) má stejné vlastnosti jako prodlužovací vedení.

Nejpoužívanější termočlánky jsou typu J a K. Jejich vlastnosti a zároveň vlastnosti dalších používaných typů jsou uvedeny v Příloze č. 1.

Průměr termočlánekových vodičů se pohybuje od 0,5 mm do 3,5 mm. Vedení termočlánku bývá uloženo v izolačních, obvykle keramických, trubičkách. Setkáváme se s konstrukčními typy snímačů: bez jímky, s jímkou, tyčové, plášťový kabel, speciální sonda aj.

Plášťový kabel má termočlánekové vedení uložené v kovovém plášti trubkového průřezu. Vedení je vůči plášti izolované zhutnělou práškovou izolací z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , případně  $\text{MgO}$ . Plášť bývá z korozivzdorných ocelí, z chromniklových slitin nebo slitiny PtRh10 pro velmi vysoké teploty (termočlánek typu S). Vnější průměr se pohybuje od 0,1 mm do 8 mm. [3] Jeho hlavní výhodou je ochranné uložení vodičů po celé délce, které nám zaručuje odolnost vůči prostředí a vysokou stabilitu. Další výhodou je možnost ohybu. Minimální poloměr ohybu je pětinasobek vnějšího průměru pláště.

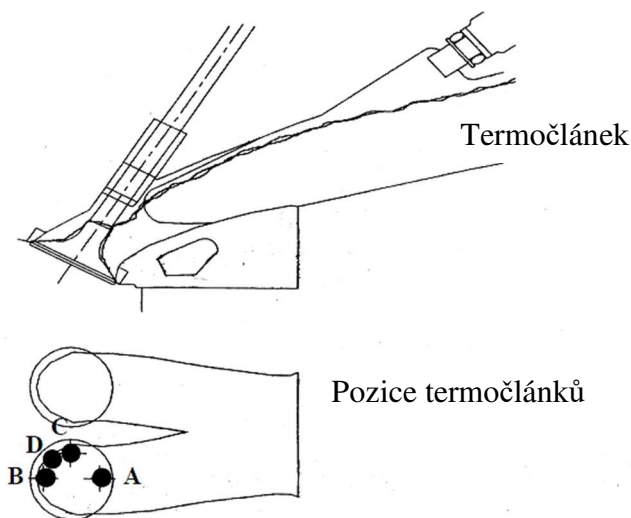
Na Obr. 3.4 vidíme konstrukční provedení plášťového kabelu. Nechráněný termočlánek je vytvořen mimo plášť, takže je zaručena nejrychlejší odezva. Není vhodný pro korozivní, vlhké měřené prostředí, které by narušilo spoj. Pro použití do korozivního prostředí je vhodný izolovaný termočlánek. Jeho nevýhodou je delší časová konstanta, kvůli které tolik nereaguje na skokovou změnu teplot. Tuto nevýhodu řeší uzemněný článek. Je vhodný do korozivních prostředí, má rychlou odezvu, ale z důvodu vodivého spojení mezi pláštěm a termočlánekem mohou vznikat nežádoucí rušení.



Obr. 3.4: Provedení termočláneků. [4]

Na Obr. 3.5 můžeme vidět praktické umístění termočláneků na sacích ventilech. Byly použity termočlánky typu K o průměrech drátů 0,76 mm. Každý termočlánek byl přivařen metodou

TIG a následně zabroušen k sedlu ventilu. Vodiče byly přichyceny k dřívku ventilu a vyvedeny přes sací potrubí mimo prostředí motoru. [10]



Obr. 3.5: Měření teplot v několika místech sacích ventilů. [10]

### 3.1.3 Odporové snímače teploty

Jejich princip spočívá v teplotní závislosti odporu kovu. V anglické literatuře se s nimi setkáme pod názvem RTD (Resistive Temperature Detector). Jedná se o jedny z nejpoužívanějších a nepřesnějších snímačů teploty. V malém rozsahu teplot ( $\pm 100$  °C) je průběh závislosti odporu na teplotě lineární. Lze ji vyjádřit vztahem

$$R_T = R_0[1 + \alpha \cdot T], \quad (3.1)$$

kde  $R_0$  představuje odpor snímače při teplotě 0 °C a  $\alpha$  je teplotní koeficient elektrického odporu, pro který platí

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}, \quad (3.2)$$

kde  $R_{100}$  je elektrický odpor snímače při 100 °C.

Teplotní koeficient elektrického odporu vyjadřuje citlivost, se kterou snímač reaguje změnou odporu na teplotu. [4]

K měření se převážně využívá čistých kovů a polovodičů.

#### Kovové odporové snímače teploty

Nejčastěji používané jsou platinové, niklové a měděné odporové snímače teploty. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1, ve které  $\rho$  je měrný elektrický odpor ovlivňující rozměry vodiče. [4]

Prvek	$\alpha \cdot 10^{-3} [K^{-1}]$	$\rho \cdot 10^{-8} [\Omega m]$	rozsah teplot [°C]
Pt	3,85	9,81	-20 až 850
Ni	6,17	12,13	-70 až 200
Cu	3,9	1,54	-50 až 150

Tab. 3.1: Vlastnosti odporových snímačů. [3], [4]

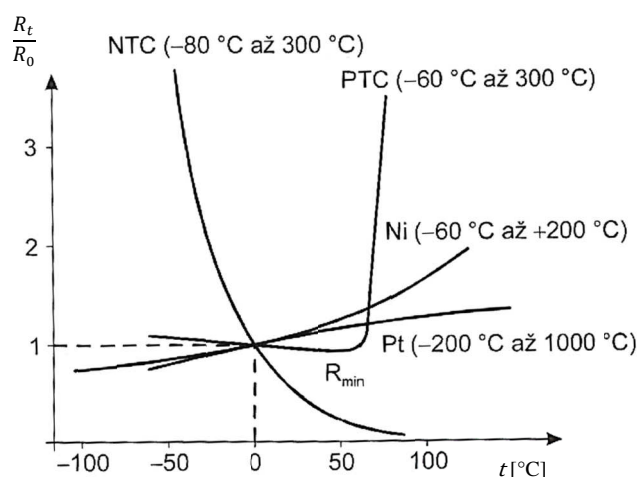
Vyrábějí se 3 typy snímačů: skleněný drátkový snímač, keramický drátkový snímač a tenkovrstvý snímač. Drátkové provedení spočívá v namotání drátku (o průměru kolem 0,05 mm) kolem skleněného nebo keramického pouzdra, přičemž do skleněného pouzdra je drátek zataven a do keramického pouzdra nikoliv. Keramické snímače se používají do vyšších teplot (až 850 °C). Tenkovrstvý snímač je vyroben nanášením a vypálením velmi tenké vrstvy kovu (v řádu  $\mu m$ ) na keramickou matrici. [4]

Označení snímačů je XY, kde X představuje použitý kov snímače a Y udává hodnotu odporu snímače při 0 °C. Pro příklad Pt100, Pt1000, Ni120 a Cu10.

Mezi hlavní výhody kovových odporových snímačů patří velká přesnost a citlivost. Nevýhodou je jejich vysoká cena, převážně u platinových snímačů. Niklové a měděné snímače se používají jako alternativa k aplikaci platinových, pokud není třeba tak velké přesnosti.

### **Termistory**

Termistory jsou polovodičové součástky, jejichž odpor je také teplotně závislý. Rozlišujeme 2 typy termistorů: NTC a PTC. NTC termistory, též negastory, mají záporný teplotní koeficient elektrického odporu, kdežto PTC termistory, též pozistory, mají teplotní koeficient elektrického odporu kladný. Průběhy teplotních závislostí termistorů v porovnání s kovovými odporovými snímači je znázorněn na Obr. 3.4.



Obr. 3.6: Teplotní závislost odporových snímačů teploty. [3]

Pro měření teploty se užívá převážně NTC termistorů. Výhodou je vysoká citlivost (několikanásobně vyšší než u kovových odporových snímačů) společně s nízkou cenou. Nevýhodou je nelinearita průběhu teplotní závislosti, nutnost kalibrace jednotlivých snímačů a horší přesnost než u platinových snímačů.

Vyrábí se ve tvaru disku, destičky, kapky, válečku aj. Teplotní rozsah bývá do -85 do 150 °C s přesností okolo  $\pm 0,4$  °C.

Odporové snímače si našly své uplatnění při měření teploty na různých částech motoru, např. měření teploty chladicí kapaliny, převodového oleje, sání a hlavy válců. [11]

### 3.2 Bezdotykové měření teploty

Pokud chceme měřit vzdálené objekty, případně ve větším rozmezí teplot, je na místě použít bezdotykové snímače teploty. Oproti dotykovým snímačům neměří teplotu, případně rozdíl teplot, ale intenzitu vyzařování, která je popsána Planckovým zákonem vyzařování pro černé těleso

$$M_{0\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (3.3)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ ),  $h$  je Planckova konstanta ( $6,62606896 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$ ),  $k$  je Boltzmanova konstanta ( $1,38064852 \cdot 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$ ) a  $T$  je termodynamická teplota. Tento zákon platí pro každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K.

[4]

Bezdotykové měření probíhá na vlnových délkách od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ , tedy výhradně v infračerveném (IR) spektru. [3]

K bezdotykovému měření absolutních hodnot teploty je nutné znát emisivitu měřeného objektu. S nepřesnou hodnotou jsme schopni změřit pouze rozdíl teplot na objektu, který má konstantní hodnotu emisivity. Emisivita je definovaná pomocí černého tělesa, které pohlcuje veškeré záření při libovolném úhlu dopadu a zároveň je ideálním zářičem, který vyzařuje maximální energii pro jakýkoliv materiál. Emisivita černého tělesa je  $\varepsilon = 1$ . Emisivita je poměr vyzařované energie objektu a vyzařované energie černého tělesa. Nabývá hodnoty od 0 (velmi lesklý povrch) až 1 (černé těleso). Emisivita je tedy závislá na materiálu, teplotě a na vlnové délce měření. Velmi ovlivňuje výsledné měření a je nutné znát její hodnotu pro daný materiál. V Tab. 3.2 jsou uvedeny hodnoty pro vybrané materiály.

Materiál	$\varepsilon_\lambda$
hliník neoxidovaný	0,12 – 0,18
železo lesklé	0,32 – 0,42
grafit	0,65 – 0,97

Tab. 3.2: Emisivita materiálů při  $\lambda=0,65 \mu\text{m}$  [7]

### Výhody

- možnost měření pohybujících se (rotujících) součástí
- měření znatelných teplotních změn
- měření teploty po celé ploše

### Nevýhody

- nepřesnost měření způsobená chybně zadanou emisivitou měřeného povrchu
- nepřesnost měření způsobená absorpcí záření okolním prostředím
- nepřesnost měření způsobená odrazem záření

Bezdotykové snímače teploty můžeme dělit na přímo měřící (pyrometry) a zobrazovací (fotometrické a termovizní). [7]

#### 3.2.1 Pyrometry

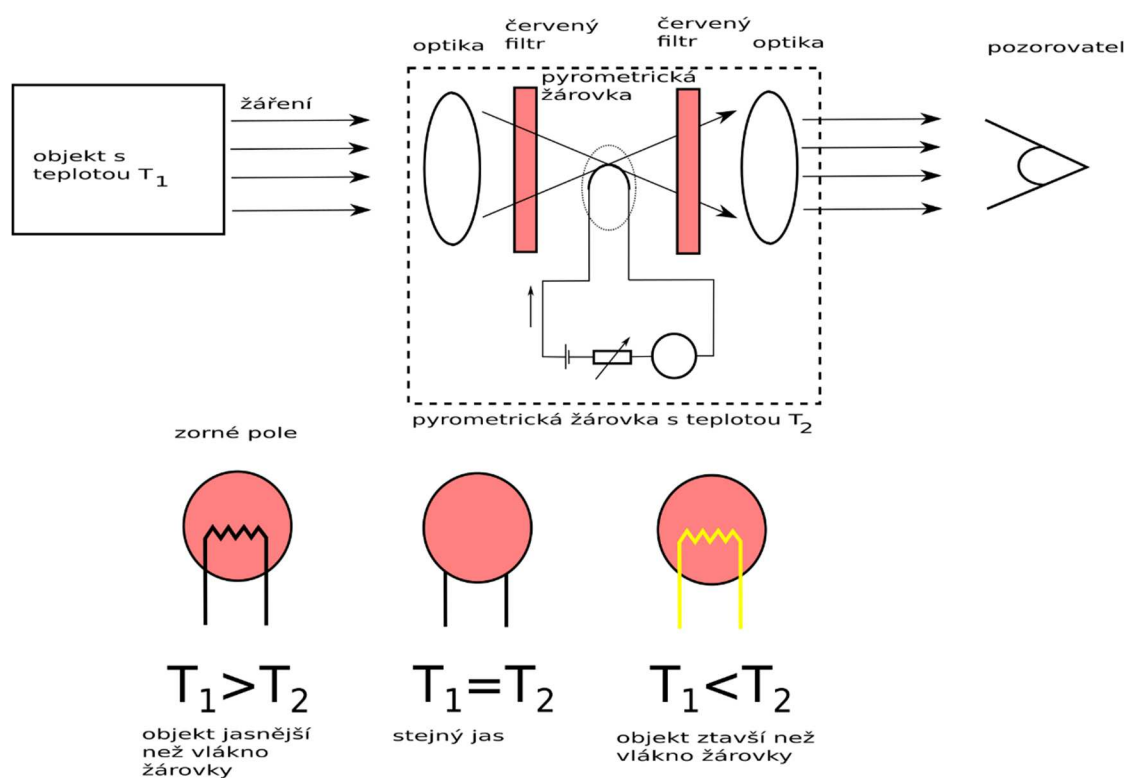
Pro měření teploty se převážně využívají monochromatické pyrometry, úhrnné pyrometry, pásmové pyrometry a poměrové pyrometry.

## Monochromatické pyrometry

Jak již z názvu napovídá, monochromatické pyrometry měří teplotu, resp. intenzitu vyzařování na jedné vlnové délce (obvykle  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ). Jedná se o subjektivní metodu měření, neboť obsluha přístroje porovnává jas vlákna pyrometrické žárovky spolu s jasnem měřeného objektu. Pokud se intenzita vyzařování vlákna žárovky a měřeného objektu rovná, tak se rovná i jejich teplota. Intenzita vyzařování žárovky je zvyšována, resp. snižována protékajícím proudem. Na Obr. 3.7 můžeme vidět princip monochromatického pyrometru.

Využívají se při měření teploty při zpracování kovů, tj. při tavení, lití, aj. Také se využívají při zpracování skla.

## Úhrnné pyrometry



Obr. 3.7: Princip monochromatického pyrometru.[4]

Oproti monochromatickým pyrometrům vyhodnocují úhrnné pyrometry teplotu teoreticky v celém spektru vlnových délek (omezení nastává propustností optiky senzoru a absorpční schopností detektoru). Pracují na principu Stefan-Boltzmanova zákona

$$M_0 = \sigma T^4, \quad (3.4)$$

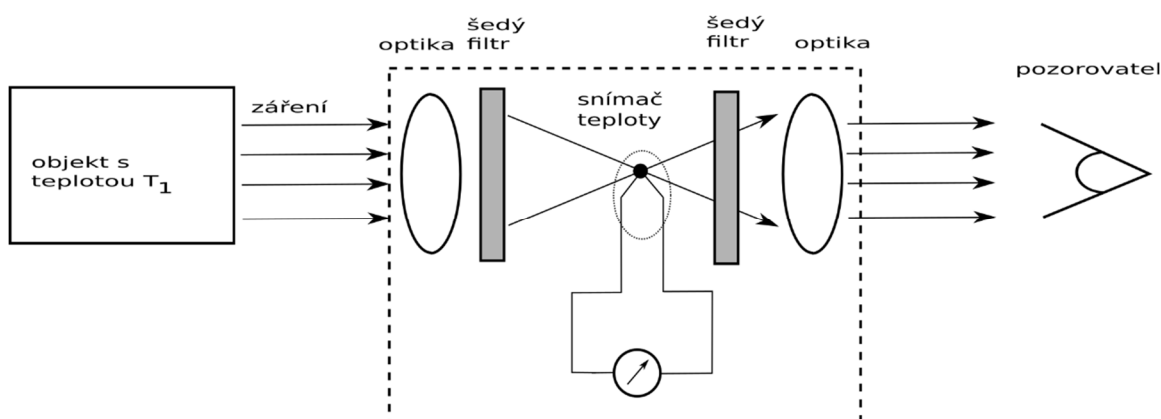
kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmanova konstanta ( $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) a  $T$  je termodynamická teplota.

Na Obr. 3.8 je vidět princip měření. Dochází k soustředění záření objektu optikou přes šedý filtr na kontaktní snímač (detektor), který bývá buď termočlánek, nebo termistor. Snímač převádí tepelné záření na elektrické napětí nebo odpor. Výstupní signál je následně zpracován elektronickými obvody a na displeji je zobrazena hodnota teploty. Kvůli nezanedbatelnému pohlcení a odražení záření optikou a kontaktním snímačem, neodpovídá teplota změřená pyrometrem  $T_p$  teplotě zářiče  $T_s$ . Vztah pro výpočet teploty zářiče je

$$T_s = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\varepsilon}}, \quad (3.5)$$

kde  $\varepsilon$  je emisivita zářiče. [7]

Rozmezí teplot je dáno kontaktním snímačem. V praxi jsou úhrnné pyrometry použitelné pro objekty s vlastnostmi blízcími se černému tělesu a pro rozmezí teplot od  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  až do  $5000\text{ }^\circ\text{C}$ . [4] Mají vysokou rychlost měření a zároveň citlivost.



Obr. 3.8: Princip úhrnného pyrometru. [4]

Využívají se např. pro kontrolu teplot v pecích, pro kontrolu teplot svařování, pro kontrolu teplot elektrických komponent při jejich zátěžových testech aj.

### Pásmové pyrometry

Jedná se o pyrometry, které měří teplotu pomocí záření ve vybraném úzkém pásmu vlnových délek. Pásmo je od 10 nm do jednotek mikrometru široké a je vymezeno optikou, filtry a citlivostí detektoru. Detektory bývají fototranzistory, fotodiody aj. [3]

Měřená teplota  $T_p$  není opět rovna skutečné teplotě  $T_s$ , a proto platí vztah

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda_p}{c_2} \ln \varepsilon_p, \quad (3.6)$$



kde  $\lambda_p$  je efektivní vlnová délka záření pásma,  $\varepsilon_p$  je emisivita pásma a  $c_2$  je druhá vyzařovací konstanta ( $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  mK).

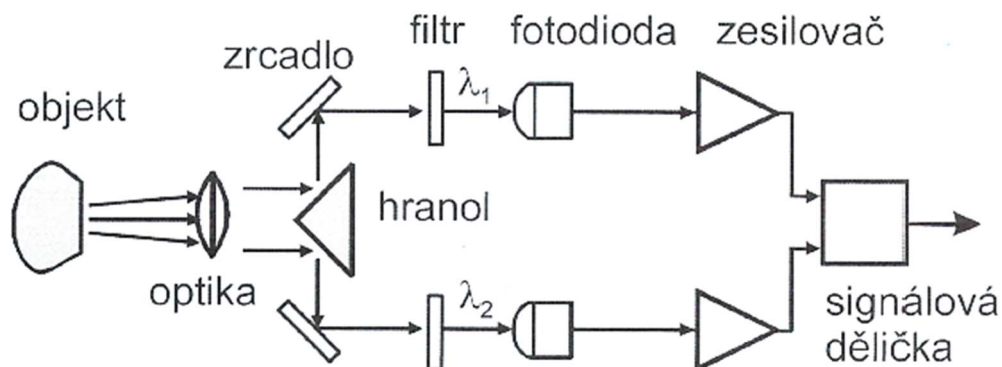
Princip pásmového pyrometru je stejný jako úhrnného pyrometru. Také jsou velmi rychlé a citlivé.

Využití pásmových pyrometrů je ve znečištěném prostředí, kde dochází k absorpci určitých vlnových délek, např. ve slévárnách, kde je znečištěna atmosféra zplodinami, vodní parou a  $CO_2$ .

### Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry vyhodnocují teplotu objektu na základě intenzity vyzařování při dvou různých vlnových délkách. Princip je podobný jako princip úhrnného pyrometru s tím rozdílem, že záření dopadající na optiku prochází do dvou filtrů, kde každý z nich propustí záření o jedné vlnové délce, které pokračuje na detektor. Detektory převedou záření na elektrický signál, kde výsledný signál je poměr oněch dvou (viz. Obr 3.9).

Hlavní využití mají při teplotním měření, kde se velmi mění spektrum vyzařování, např. při měření ohřevu dílců, při toku taveniny během odpichu aj.



Obr. 3.9: Princip poměrového pyrometru.[3]

### 3.2.2 Termovize a fotometrie

Jejich aplikace přichází v úvahu v případech, kdy nás zajímá celkové teplotní rozložení objektu a jeho okolí, nikoliv pouze teplota v jednotlivých místech. Využívají se např. v automobilovém průmyslu (tepelné zatížení motoru, kontrola brzd, vyhřívání skel, aj.), v hutnictví (kontrola vyzdívek pecí), v elektrotechnice (kontrola povrchové teploty elektromotoru) atd.

## Termovize

Termovizní systémy snímají teplotní pole po celé vybrané ploše. K tomu nám slouží speciální kamery, které obsahují tepelný detektor detekující záření v IR spektru. Používá se kvantových detektorů a bolometrů. U kvantových detektorů (nejčastěji polovodiče InSb, PbSe, GaS) dochází ke zvyšování elektrické vodivosti při dopadu IR záření. Bolometrické detektory mění svůj elektrický odpor a jsou vyrobeny z kysličníků MgO, MnO, NiO, aj. [3] Termovizní kamery zobrazují tzv. termogramy, což jsou plochy s odstupňovanými barvami dle teploty, a s teplotním měřítkem. Jsou buď černobílé, nebo barevné (viz Obr. 3.10).



Obr. 3.10: Termovizní pohled (vlevo) a pohled bez termovizní kamery (vpravo) na spalovací motor. [12]

## Fotometrie

V rámci fotometrie dochází k zobrazování teplotních polí pomocí fotografických materiálů, které jsou citlivé na IR záření. Fotoaparát obsahuje filtr, který propouští vlnové délky v oblasti IR spektra. Při focení se zaznamenává i teplotní měřítko, které je tvořeno z různě vyhřívaných destiček o známé teplotě.

Tato metoda je použitelná pro teploty v rozsahu od 50 °C do 1000 °C. Nejistoty měření vznikají nepřesnou hodnotou emisivity měřeného objektu a teplotního měřítka. [7]

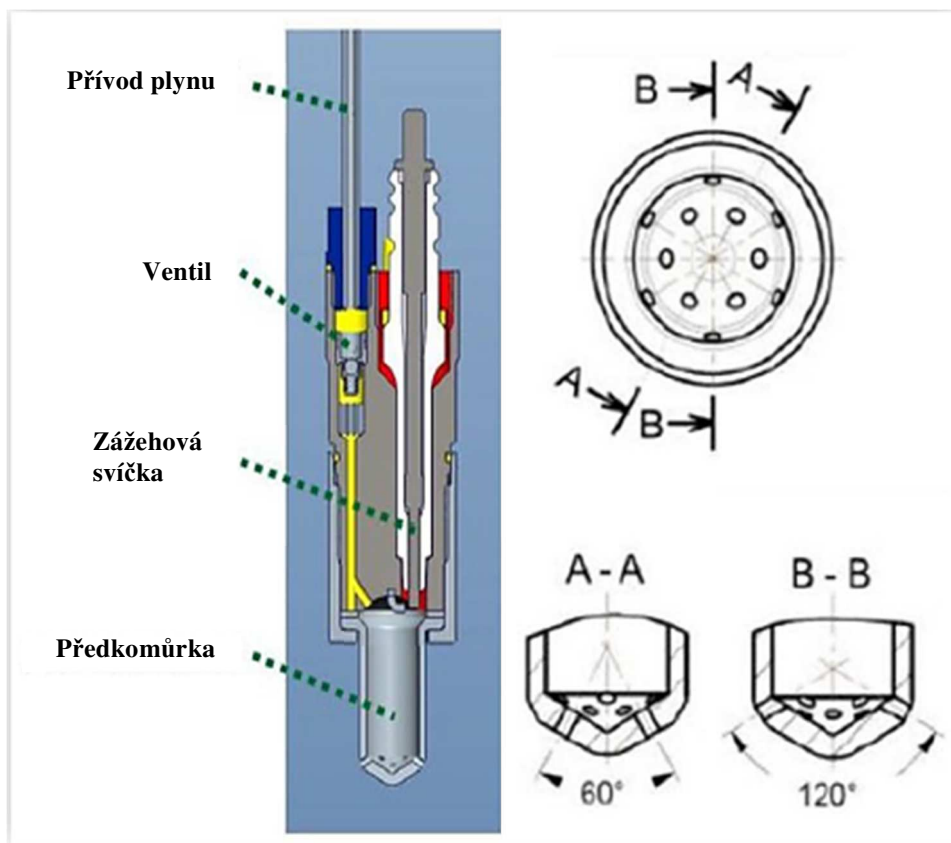
### 3.3 Shrnutí měření teploty

V příloze 2 jsou shrnuty rozsahy jednotlivých měřících senzorů.

## 4 Pokročilý systém zapalování

Jedním ze způsobů, jak dosáhnout zvýšení účinnosti motoru a zároveň snížení emisí, je tzv. vyplachovaná předkomůrka. Jde o jeden ze způsobů nepřímého zážehu homogenní směsi v hlavním spalovacím prostoru. Jedná se o součást, která je oddělena od hlavního spalovacího prostoru pomocí propojovacích otvorů. Do výplachové předkomůrky je přiveden přídavný plyn, který po zapálení zapalovací svíčkou za pomoci otvorů na konci předkomůrky způsobí vícebodové zapálení směsi nad pístem. S tímto zapalovacím systémem je možné zapálit a spalovat velmi chudou směs vzduchu a plynu. To znamená, že součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  se může pohybovat až k hodnotě  $\lambda = 2$ . Chudá směs způsobí nízkoteplotní spalování, které vede ke značnému snížení tvorby NOx emisí. [13]

Předkomůrka může být provozována i jako nevyplachovaná, a to bez přídavného přívodu plynu. K plnění předkomůrky směsí vzduchu a paliva dochází z hlavního spalovacího prostoru. Nedochozí zde k výplachu spalin přídavným plynem, tudíž je komůrka vystavena většímu teplotnímu namáhání. Pro samotné měření doporučuji využití obou pracovních režimů předkomůrky (vyplachovaná/nevyplachovaná) a porovnání jednotlivých výsledků.



Obr. 4.33: Vzhled malé předkomůrky a rozvržení otvorů o průměru  $d=1,2$  mm. [13]

V mém případě se budu zabývat návrhem teplotních snímačů pro malou verzi předkomůrky (viz Obr. 4.1.), která je navržena pro zkušební jednoválcový motor Škoda, který vychází z motoru 1.5 TSI EA211, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Typ motoru	1.5 TSI EA211
Počet válců	4
Přepřňování	Turbodmychadlem
Zdvihový objem	1,498 cm <sup>3</sup>
Vrtání	74,5 mm
Zdvih	85,9 mm
Kompresní poměr	12,5
Výkon	96 kW @ 4 750 – 5 500 min <sup>-1</sup>
Kroutící moment	200 Nm @ 1 300 – 4 500 min <sup>-1</sup>

Tab. 4.1: Parametry originálního motoru.

Při zkušebních testech v laboratoři došlo k propalování předkomůrky v oblasti otvorů. Jedním z důvodů bylo ponechání otřepů vzniklých při vrtání otvorů, čímž se objevila místa o vyšší teplotě. K hledání dalších možných důvodů je nutné znát hodnoty maximálních teplot v částech předkomůrky. Můj návrh snímání soustředí právě na spodní část a hrubě odhaduji maximální teplotu na  $t = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 4.1 Návrh teplotních snímačů

Pro měření teploty využiji jak dotykového, tak bezdotykového snímání. Detailní postup výběru a provedení je uvedeno níže. Veškeré návrhy byly provedeny pomocí 3D programu PTC Creo.

### 4.1.1 Dotykové snímání

Jelikož rozměry předkomůrky jsou velmi malé, navrhuji použití termočlánu od výrobce OMEGA. Oproti odporovým snímačům má sice nižší citlivost a přesnost měření, ale v mém případě je zcela dostačující. Jedná se o plášťový termočlánek typu J, jehož plášť je z nerezové oceli X5CrNi 18-10 (ČSN 17 240) a je použitelný do teploty 900 °C. Vnější průměr pláště je 0,25 mm. Délka termočlánu je 150 mm. K docílení rychlejší odezvy a přestupu tepla volím uzemněný konec. Termočlánek je dodáváný s miniaturním konektorem, který je vidět na Obr. 4.2 a je připojen k modulu od výrobce National Instruments NI 9219 (Obr. 4. 9). Jeho vlastnosti jsou uvedeny v [16].



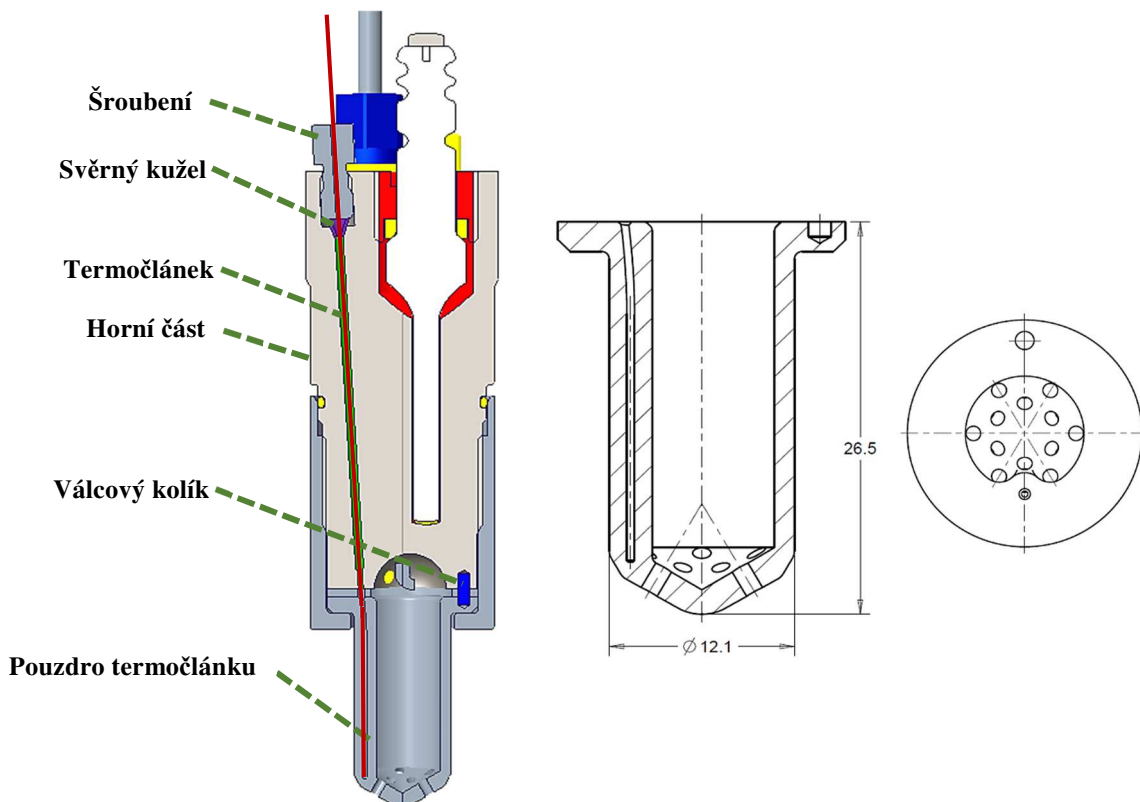
Obr. 4.2: Plášťový termočlánek s miniaturním konektorem. [15]



Obr. 4.3: Měřicí modul NI 9219. [16]

Pro samotné umístění termočláneku musí dojít k značné úpravě konstrukce systému zapalování. Na Obr. 4.3 můžeme vidět celkovou úpravu spolu s detailem předkomůrky. Samotná předkomůrka je vyrobena technologií 3D tisku ze stejného materiálu jako základní verze, tj. ze žáruvzdorné oceli X8CrNiTi18-10 (ČSN 17 248). Materiálový list je v příloze 4. 3D tisk je zvolen kvůli specifickému tvaru pouzdra pro termočlánek, které není možné vyrobit jinými konvenčními metodami. Otvor pro termočlánek je průměru 0,4 mm s oblým náběhem. Těsnění vůči tlaku spalovacího prostoru je vyřešeno upravenou podložkou s otvorem pro samotný termočlánek a válcový kolík. V horní části je vrtán otvor různých průměrů pod úhlem 3,5° od svislé osy. Nejmenší průměr je opět 0,4 mm. Poloha otvorů jednotlivých součástí při dotahování je vůči sobě definována válcovým kolíkem ISO 8734 1,5 x 4. Samotný termočlánek je zajištěn šroubením s vnějším závitem M4x0,7 a kuželem, který termočlánek svou deformací sevře a zabrání mu v pohybu.

Při návrhu jsem musel posunout a zmenšit oblast tvaru půlkoule v okolí jiskřiště, abych mohl použít těsnění přes právě jednu těsnící podložku. Takové posunutí by mohlo částečně omezit celkovou funkci systému zapalování a při vyvozování závěrů z měření je jej třeba brát v potaz. To samé platí pro zmenšení objemu předkomůrky přidáním pouzdra pro termočlánek, které ve stávající podobě činí 9,8 %. Jelikož termočlánek v daném místě slouží jako kontrolní a zároveň i kalibrační bod pro pyrometr, tak se snížení objemu nevyvarují a musím ho brát jako součást nepřesnosti měření.



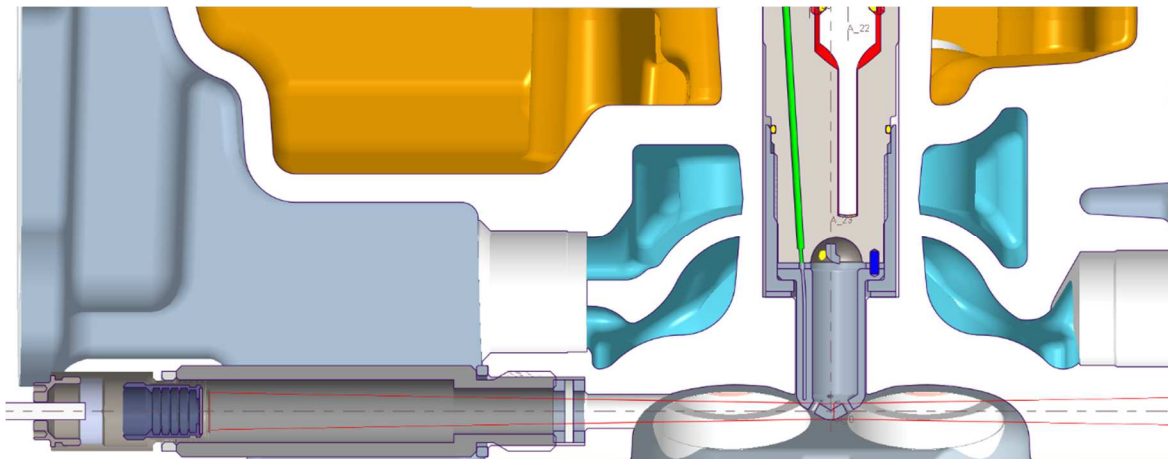
Obr. 4.4: Celková úprava malé verze (vlevo) a detail předkomůrky (vpravo).

#### 4.1.2 Bezkontaktní měření

Dotykové měření slouží pro zjištění teploty ve stěně předkomůrky. Pro snímání teploty na povrchu jsem zvolil užití infračerveného pyrometru od výrobce Micro-Epsilon. Jedná se o pyrometr CTM-2CF40-C3, jehož rozmezí snímaných teplot je od 250 do 800 °C, což je pro náš případ dostačující. Pyrometr zaznamenává spektrum o vlnové délce 1,6  $\mu\text{m}$  s odezvou 1 ms. Vybral jsem vlnovou délku 1,6  $\mu\text{m}$ , protože při takové hodnotě je ovlivnění záření plyny spalovacího prostoru ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) zanedbatelné. Jako výstup volím napěťový od 0 do 5/10 V. Optiku volím CF (Close Focus), což znamená, že zorný úhel snímacího kužele se do vzdálenosti 110 mm snižuje na nejmenší průměr snímané plochy 2,4 mm a následně se zase rozšiřuje. Více informací je uvedeno v příloze 5.

V hlavě motoru jsem vytvořil průhled, který je tvořen vnitřním závitem M14 s navazujícím otvorem o průměru 6 mm. Je zde vytvořena dosedací plocha pro těsnící teflonový kroužek, na který je přes další stejný teflonový kroužek dotaženo sklíčko, které chrání pyrometr před maximálním tlakem ve spalovacím prostoru. K dotažení slouží šroubení o vnějším závitu M14 a vnitřním M12x1 pro pyrometr. Šroubení je délky 67 mm a umožňuje částečně upravit vzdálenost pyrometru od povrchu předkomůrky. Při montování je důležité zajistit vzdálenost

blíží se co nejbližší hodnotě 110 mm. Při špatně nastavené vzdálenosti by došlo k ovlivnění výsledků okolím spodní části předkomůrky, převážně jejich jinou hodnotou emisivity. Sestavení můžeme vidět na Obr. 4.5. Okótovaný pohled s rozměry kužele je v příloze 7.



Obr. 4.5: Pohled do spalovacího prostoru s umístěným pyrometrem a termočlánkem.

Sklíčko je možné zvolit z několika různých materiálů, které velmi ovlivňují samotnou tloušťku sklíčka. V příloze 6 jsou popsány vztahy pro výpočet tloušťky. V mém případě využiji výpočet pro oboustranně zajištěné sklíčko, průměr D je 6 mm a maximální tlak na sklíčko uvažuji 15 MPa. Pro vybrané materiály dostanu tloušťku uvedenou v Tab. 4.2. Všechny údaje jsou převzaty od výrobce Crystran.

<b>Materiál</b>	<b>Rozsah přenosu</b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Bod tání</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	<b>Mez pružnosti</b> [MPa]	<b>Tloušťka</b> [mm]
Safír	0,17-5,5	2 040	276	1,5
BaF <sub>2</sub>	0,15-12	1 386	26,9	4
CaF <sub>2</sub>	0,13-10	1 360	36,5	3,5

Tab. 4.2: Tloušťka sklíčka v závislosti na materiálu.

Vybral jsem materiály, které mají vysoký bod tání a snímané záření o vlnové délce 1,6  $\mu\text{m}$  nepohlují, resp. pohlují, ale zanedbatelně. Pro příklad je v příloze 8 závislost přenosu na vlnové délce pro BaF<sub>2</sub>. Ze závislosti lze usoudit, že pro vlnovou délku od 0,22  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$  je pohlčení záření rovno 6 %, což je zanedbatelné.

## 5 Závěr

Prvním cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat a shrnout metody měření teploty. Nejprve jsem se zabýval důvodem proč vlastně měřit teplotu, k čemuž jsem použil příkladu několika komponent ve spalovacím prostoru. Dále jsem sepsal jednotlivé metody měření, které jsem rozdělil na měření dotykové a bezdotykové.

Dalším cílem bylo vypracování parametrického 3-D návrhu měření teploty předkomůrky v prostředí PTC Creo, se kterým jsem navázal na předchozí poznatky. Návrh jsem provedl pro pokročilý systém zapalování s vyplachovanou předkomůrkou, jehož hlavní funkcí a hlavním důvodem jeho vývoje je možnost snížení emisí a zvýšení účinnosti. Jelikož je předkomůrka, resp. její spodní část, velmi malých rozměrů se špatným přístupem z okolí, tak jsem použil plášťový termočlánek miniaturního průměru. Zároveň jsem chtěl uplatnit bezdotykové měření pyrometrem, které může ukázat novou cestu při vysokorychlostním snímání teploty. Při této sestavě měření bude termočlánek zároveň sloužit jako jediný referenční, resp. kalibrační bod pro pyrometr. Celkové měření může být náchylné na zkreslení. Proto je kladen požadavek na správné nastavení emisivity a zároveň i na vzdálenosti pyrometru od předkomůrky. I přes toto pracné nastavení samotného měření očekávám velmi zajímavé výsledky.

Na návrhu jsem pracoval s úmyslem následné realizace, která může být provedena v navazující diplomové práci ať už mnou, nebo dalšími kolegy. Se znalostí teploty se naskýtá i možnost provedení MKP a celkové odladění předkomůrky pro různě typy zatížení motoru.



## Seznam použité literatury

- [1] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals. Second edition.* New York: McGraw-Hill Education, [2018]. ISBN 978-1-260-11610-6.
- [2] RAUSCHER, Jaroslav. *Vozidlové motory, Studijní opory.* VUT FSI Brno, 2004
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody.* Praha: BEN, c2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] NOVÁK, Martin. *Technická měření.* v Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [5] PRESTON-THOMAS, H. *The international temperature scale of 1990 (ITS-90)* [online]. 1990 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/27/1/002/pdf>.
- [6] Tiainen, J., Kallio, I., Leino, A., and Turunen, R. *Heat Transfer Study of a High Power Density Diesel Engine.* SAE Technical Paper 2004-01-2962, 2004, <https://doi.org/10.4271/2004-01-2962>.
- [7] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření.* Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02138-6.
- [8] *ANSI and IEC Color Codes for Thermocouples, Wire and Connectors* [online]. [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: [https://br.omega.com/omegaFiles/temperature/pdf/tc\\_colorcodes.pdf](https://br.omega.com/omegaFiles/temperature/pdf/tc_colorcodes.pdf)
- [9] MUŽÁK, J. *Měření teploty brzdového kotouče za jízdy vozidla.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák.
- [10] Cowart, J. and Cheng, W. *Intake Valve Thermal Behavior During Steady-State and Transient Engine Operation.* SAE Technical Paper 1999-01-3643, 1999, <https://doi.org/10.4271/1999-01-3643>.
- [11] EL-AWAR, N., et al. *Automotive temperature sensing.* Keystone Thermometrics Corporation Application Notes, 1999.
- [12] Thermal Imaging Camera. In: COX [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://coxcamera.com/technology/thermal-imaging-camera/>
- [13] Syrovatka, Z., Vitek, O., Vavra, J., and Takats, M. *Scavenged Pre-Chamber Volume Effect on Gas Engine Performance and Emissions.* SAE Technical Paper 2019-01-0258, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0258>.

- [14] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: F. Vlk, 2002. ISBN 80-238-8756-4.
- [15] Nízkošumové termočláňkové sondy s miniaturním konektorem. In: *Omega Engineering* [online]. [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/JMQSS.html?bt=cart>
- [16] C Series Universal Analog Input Module. In: *National Instruments* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/shop/select/c-series-universal-analog-input-module?modelId=122171>
- [17] Data sheet thermoMETER CTM1/M2. In: *Micro-Epsilon* [online]. US: Micro-Epsilon [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/cat-thermometer/dax--thermoMETER-CTM1M2--en-us.html#page=2&zoom=Fit>
- [18] Design of Pressure Windows. In: *Crystran* [online]. Dorset: Crystran, 2014 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.crystran.co.uk/documents>
- [19] Barium Fluoride (BaF<sub>2</sub>). In: *Crystran* [online]. [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/barium-fluoride-baf2>

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Teplotní analýza pístu na měřeném vznětovém motoru s přímým vstřikováním při plné zátěži. Vrtání 125 mm, zdvih 110 mm, kompresní poměr 17, 3000 ot/min.[1] .....	12
Obr. 2.2: Tepelné zatížení a průběh tepelného toku ve vložce válce vznětového motoru s přímým vstřikováním při 1500 ot/min. [1].....	13
Obr. 2.3: Tepelné zatížení jednoho ze čtyř výfukových ventilů dvoudobého vznětového motoru. Vrtání 98 mm, zdvih 114 mm. [1] .....	14
Obr. 3.1: Výpočtová síť a průběh teploty (v K) v pístu vypočtený pomocí MKP.[6] .....	15
Obr. 3.2: Porovnání vypočtených a změřených (bodové odkazy) teplot částí pístu čtyřválcového zážehového motoru o objemu 2,5 l při plné zátěži, 4600 ot/min. [1] .....	16
Obr. 3.3: Schéma zapojení termočlásku. [4].....	17
Obr. 3.4: Provedení termočlásků. [4].....	18
Obr. 3.5: Měření teplot v několika místech sacích ventilů. [10] .....	19
Obr. 3.6: Teplotní závislost odporových snímačů teploty. [3].....	21
Obr. 3.7: Princip monochromatického pyrometru.[4] .....	23
Obr. 3.8: Princip úhrnného pyrometru. [4].....	24
Obr. 3.9: Princip poměrového pyrometru.[3].....	25
Obr. 3.10: Termovizní pohled (vlevo) a pohled bez termovizní kamery (vpravo) na spalovací motor. [12].....	26
Obr. 4.1: Vzhled malé předkomůrky a rozvíření otvorů o průměru $d=1,2$ mm. [13].....	27
Obr. 4.2: Plášťový termočlánek s miniaturním konektorem. [15].....	29
Obr. 4.3: Měřicí modul NI 9219. [16] .....	29
Obr. 4.4: Celková úprava malé verze (vlevo) a detail předkomůrky (vpravo).....	30
Obr. 4.5: Pohled do spalovacího prostoru s umístěným pyrometrem a termočláskem.....	31

## Seznam tabulek

Tab. 3.1: Vlastnosti odporových snímačů. [3], [4].....	20
Tab. 3.2: Emisivita materiálů při $\lambda=0,65 \mu\text{m}$ [7].....	22
Tab. 4.1: Parametry originálního motoru. ....	28
Tab. 4.2: Tloušťka sklíčka v závislosti na materiálu. ....	31

## Seznam příloh

- Příloha č. 1** Základní typy termočlánků výrobce OMEGA a jejich vlastnosti [8]  
**Příloha č. 2** Shrnutí měření teploty [8]  
**Příloha č. 3** Katalogový list plášťového termočlánku OMEGA [15]  
**Příloha č. 4** Materiálový list oceli X8CrNiTi18-10  
**Příloha č. 5** Pyrometr CTM-2CF40-C3 výrobce Micro-Epsilon [16]  
**Příloha č. 6** Výpočet tloušťky ochranného sklíčka [17]  
**Příloha č. 7** Pohled do spalovacího prostoru  
**Příloha č. 8** Závislost přenosu na vlnové délce pro BaF<sub>2</sub>[19]  
**Příloha č. 9** Výkres úpravy hlavy válce  
**Příloha č. 10** Výkres sestavy: 5-000-S  
**Příloha č. 11** Výrobní výkres horní části komůrky: 5-001  
**Příloha č. 12** Výrobní výkres vložky komůrky: 5-002  
**Příloha č. 13** Výrobní výkres podložky: 5-003

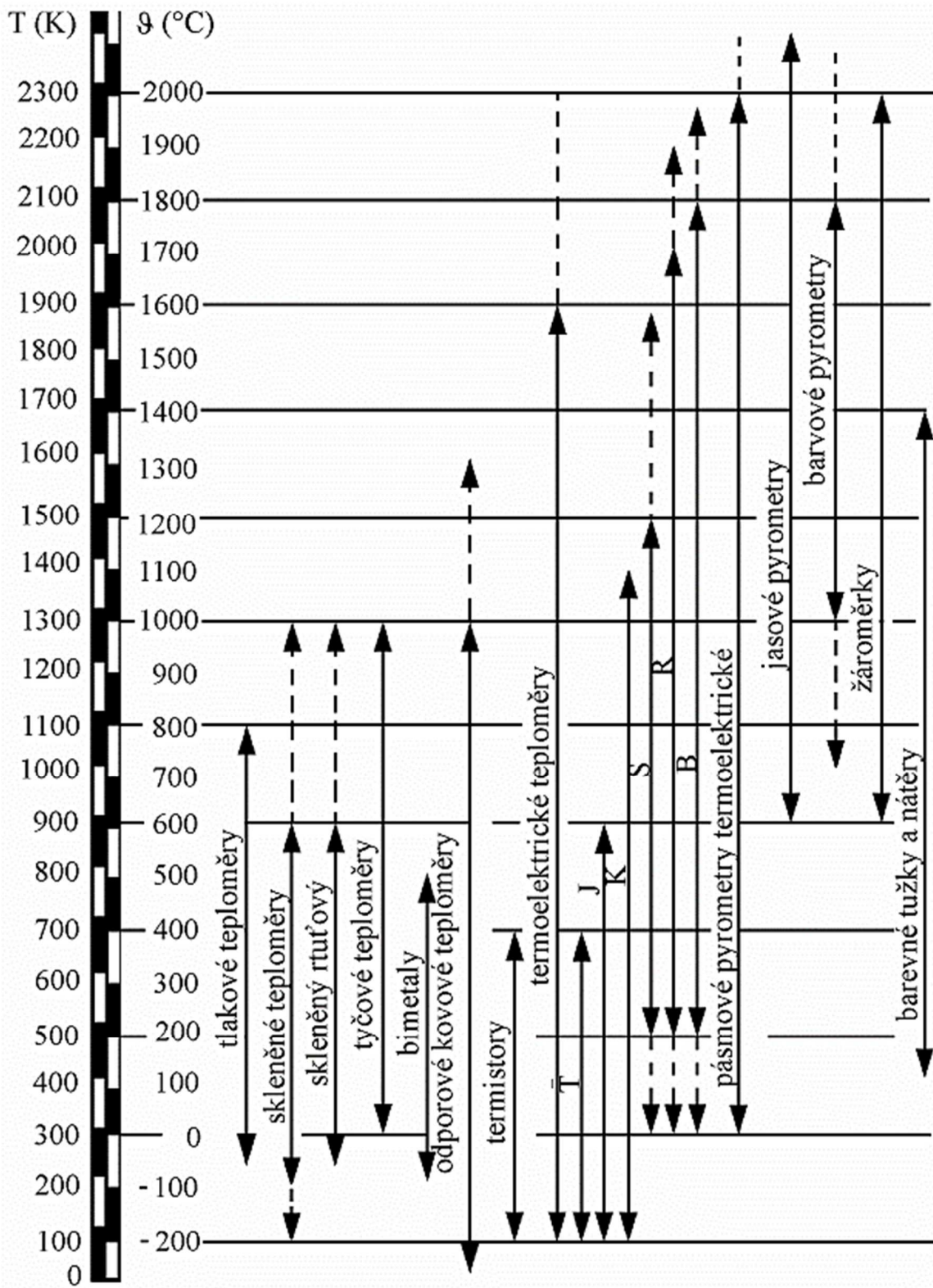
## Seznam příloh na CD

Název	Číslo výkresu
SESTAVA_HLAVA_KOMURKA	5-000-S
KOMURKA_HORNI_CAST	5-001
KOMURKA_VLOZKA	5-002
PODLOZKA	5-003
UPEVNOVACI_SROUB	5-004
SVERNY_KUZEL	5-005
VLOZKA	5-006
TESNENI	5-007
VNEJSI_PODLOZKA	5-008
ISO_POHLED	
DETAIL_POHLED	
DETAIL_KUZEL	

Příloha č. 1 Základní typy termočlánků výrobce OMEGA a jejich vlastnosti [8]

Connectors			Connectors							
ANSI Code	ANSI MC 96.1 Color Coding		Alloy Combination		Comments Environment Bare Wire	Maximum T/C Grade Temp Range	EMF (mV) Over Max Temp Range	IEC 584-3 Color Coding		IEC Code
	Thermocouple Grade	Extension Grade	+ Lead	- Lead				Thermocouple Grade	Intrinsically Safe	
J			IRON Fe (magnetic)	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidizing at High Temperatures. Not Recommended for Low Temperatures.	-210 to 1200°C -346 to 2193°F	-8.095 to 69.553			J
K			CHROMEKA® NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	ALOMEGA® NICKEL-ALUMINUM Ni-Al (magnetic)	Clean Oxidizing and Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Wide Temperature Range, Most Popular Calibration	-270 to 1372°C -454 to 2501°F	-6.458 to 54.886			K
T			COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Mild Oxidizing, Reducing Vacuum or Inert. Good Where Moisture Is Present. Low Temperature & Cryogenic Applications	-270 to 400°C -454 to 752°F	-6.258 to 20.872			T
E			CHROMEKA® NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Oxidizing or Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Highest EMF Change Per Degree	-270 to 1000°C -454 to 1832°F	-9.835 to 76.373			E
N			OMEGA-P® NICROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N® NISIL Ni-Si-Mg	Alternative to Type K. More Stable at High Temps	-270 to 1300°C -450 to 2372°F	-4.345 to 47.513			N
R	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-13% RHODIUM Pt-13% Rh	PLATINUM Pt	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.226 to 21.101			R
S	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-10% RHODIUM Pt-10% Rh	PLATINUM Pt	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.236 to 18.693			S
U	NONE ESTABLISHED		COPPER Cu	COPPER-LOW NICKEL Cu-Ni	Extension Grade Connecting Wire for R & S Thermocouples. Also Known as RX & SX Extension Wire.					U
B	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-30% RHODIUM Pt-30% Rh	PLATINUM-6% RHODIUM Pt-6% Rh	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temp. Common Use in Glass Industry	0 to 1820°C 32 to 3308°F	0 to 13.820			B
G* (W)	NONE ESTABLISHED		TUNGSTEN W	TUNGSTEN-26% RHENIUM W-26% Re	Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	0 to 2320°C 32 to 4208°F	0 to 38.564	NO STANDARD USE ANSI COLOR CODE		G (W)
C* (W5)	NONE ESTABLISHED		TUNGSTEN-5% RHENIUM W-5% Re	TUNGSTEN-26% RHENIUM W-26% Re	Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	0 to 2320°C 32 to 4208°F	0 to 37.066	NO STANDARD USE ANSI COLOR CODE		C (W5)
D* (W3)	NONE ESTABLISHED		TUNGSTEN-3% RHENIUM W-3% Re	TUNGSTEN-25% RHENIUM W-25% Re	Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	0 to 2320°C 32 to 4208°F	0 to 39.506	NO STANDARD USE ANSI COLOR CODE		D (W3)

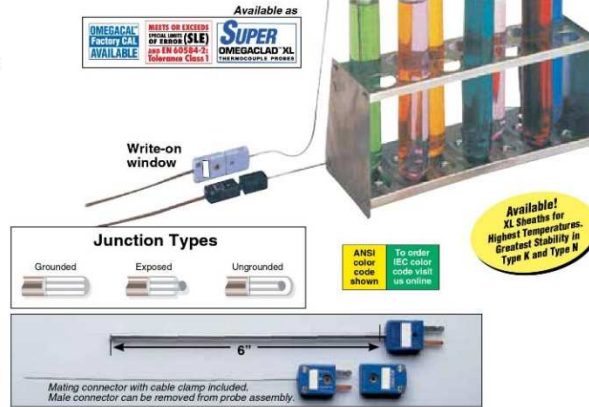
Příloha č. 2 Shrnutí měření teploty [8]



# Quick Disconnect Thermocouples with Removable Miniature Connectors

## Standard Dimensions

- ✓ Glass Filled Nylon Connector Body Rated to 220°C (425°F)
- ✓ 304, 310, 316, 321 SS, Inconel, or Super OMEGA CLAD™ XL Sheath
- ✓ Standard 6 and 12" Lengths Available
- ✓ Sheath Diameters from 0.010 to 0.125"
- ✓ Grounded, Ungrounded, or Exposed Junction
- ✓ Color-Coded SMP Miniature Connector Termination
- ✓ Mating Connector, Cable Clamp, and Locking Pin Sold Separately
- ✓ LCP and Ceramic Connectors Available
- ✓ Custom Length Available
- ✓ Cal-5 Available



### Thermocouple Assemblies with Subminiature Connector

Alloy/ANSI Color Code	Sheath Dia. inches	Model No. 6" Length	Model No. 12" Length	Sold Separately		
				Mating Connector PN	Cable Clamp PN	Safety Clip PN
Iron-Constantan 304 SS Sheath <b>J</b>	0.010	SICSS-010(*)-6	SICSS-010(*)-12	SMPW-(*)-F	PCLM-SMP	SMCL
	0.020	SICSS-020(*)-6	SICSS-020(*)-12			
	0.032	SICSS-032(*)-6	SICSS-040(*)-12			
	0.062	SICSS-062(*)-6	SICSS-062(*)-12			
	0.125	SICSS-125(*)-6	SICSS-125(*)-12			
CHROMEGLA™-ALOMEGA™ 304 SS Sheath <b>K</b>	0.010	SCASS-010(*)-6	SCASS-010(*)-12			
	0.020	SCASS-020(*)-6	SCASS-020(*)-12			
	0.032	SCASS-032(*)-6	SCASS-032(*)-12			
	0.040	SCASS-040(*)-6	SCASS-040(*)-12			
	0.062	SCASS-062(*)-6	SCASS-062(*)-12			
CHROMEGLA™-ALOMEGA™ Super OMEGA-CLAD™ XL Sheath <b>K</b>	0.010	SCAXL-010(*)-6	SCAXL-010(*)-12			
	0.020	SCAXL-020(*)-6	SCAXL-020(*)-12			
	0.032	SCAXL-032(*)-6	SCAXL-032(*)-12			
	0.040	SCAXL-040(*)-6	SCAXL-040(*)-12			
	0.062	SCAXL-062(*)-6	SCAXL-062(*)-12			
OMEGA-P™ -OMEGA-N™ Super OMEGA-CLAD™ XL Sheath <b>N</b>	0.020	SNNXL-020(*)-6	SNNXL-020(*)-12			
	0.032	SNNXL-032(*)-6	SNNXL-032(*)-12			
	0.040	SNNXL-040(*)-6	SNNXL-040(*)-12			
	0.062	SNNXL-062(*)-6	SNNXL-062(*)-12			
	0.125	SNNXL-125(*)-6	SNNXL-125(*)-12			
CHROMEGLA™-Constantan 304 SS Sheath <b>E</b>	0.010	SCXSS-010(*)-6	SCXSS-010(*)-12			
	0.020	SCXSS-020(*)-6	SCXSS-020(*)-12			
	0.032	SCXSS-032(*)-6	SCXSS-032(*)-12			
	0.040	SCXSS-040(*)-6	SCXSS-040(*)-12			
	0.062	SCXSS-062(*)-6	SCXSS-062(*)-12			
Copper-Constantan 304 SS Sheath <b>T</b>	0.020	SCPSS-020(*)-6	SCPSS-020(*)-12			
	0.032	SCPSS-032(*)-6	SCPSS-032(*)-12			
	0.040	SCPSS-040(*)-6	SCPSS-040(*)-12			
	0.062	SCPSS-062(*)-6	SCPSS-062(*)-12			
	0.125	SCPSS-125(*)-6	SCPSS-125(*)-12			

**Note:** Each probe includes mating connector and cable clamp. Other lengths available, consult Sales Department.  
 \* Specify junction type: "G" (Grounded), "E" (Exposed), or "U" (Ungrounded). \*\* Specify calibration.  
 To order with Inconel sheath, (except 0.010 Dia. Type J and T probes), change "SS" in model number to "IN", no additional cost.  
 To order with 310, 316, or 321 SS sheath, change "SS" in model number to "310SS", "316SS", or "321SS", respectively, no additional cost.  
 To order Super OMEGA CLAD™ XL (for highest temperature and stability rating in Type K and Type N), change "SS" in model number to "XL".  
**Ordering Examples:** SCAIN-125G-6, subminiature quick-disconnect probe, Type K, 0.125" OD, Inconel sheath, 6" length, grounded junction.  
 SCA321SS-062U-6, subminiature quick-disconnect probe, Type K, 321 stainless steel sheath, 0.062" O.D., ungrounded junction, 6" long.  
 SCAXL-125G-6, subminiature quick-disconnect probe, Type K, CHROMEGLA™-ALOMEGA™, Super OMEGA CLAD™ XL sheath, 0.125" OD, grounded junction, 6" length.

### Operating Atmosphere – Typical Sheath Materials

Material	Maximum Temperature	Application Atmosphere			
		Oxidizing	Hydrogen	Vacuum	Inert
304, 310, 316, and 321SS	900°C (1650°F)	Very Good	Good	Very Good	Very Good
Inconel 600	1150°C (2100°F)	Very Good	Good	Very Good	Very Good
Super OMEGA CLAD™ XL	1335°C (2440°F)	Excellent	Good	Very Good	Very Good
Platinum-Rhodium Alloy	1650°C (3000°F)	Very Good	Poor	Poor	Poor
Molybdenum	2200°C (4000°F)	Not Rec.	Fair	Good	Fair
Tantalum	2300°C (4200°F)	Not Rec.	Not Rec.	Good	Not Rec.



**Příloha č. 4** Materiálový list oceli X8CrNiTi18-10

WNr. (číslu materiálu) <b>1.4878</b>		Žáruvzdorná austenitická ocel										<b>OCEL</b> kurzname (značka) <b>X8CrNiTi18-10</b>		
<b>Chemické složení [hm. %]</b>														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti							
max 0,10	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0–19,0	9,00–12,0	5 x C – 0,80							
<b>Normy DIN</b>														
DIN EN 10095-99 – oceli a niklové slitiny žáruvzdorné														
SEW 470-76 – válcované a kované žáruvzdorné oceli														
<b>Mechanické vlastnosti</b>														
Rozměr l [mm]	ploché výrobky l ≤ 75													
Stav	po rozpouštěcím žhání													
Mez kluzu R <sub>p</sub> 0,2 [MPa] min	190													
Mez kluzu R <sub>p</sub> 1,0 [MPa] min	230													
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	500–720													
Tažnost A [%] min	40													
Kontrakce Z [%] min	–													
Nárazová práce [J]	–													
Tvrdost HB max	215													
<b>Fyzikální vlastnosti</b>														
Hustota	Měrná tepelná kapacita	Teplotní součinitel roztažnosti	Tepelná vodivost		Rezistivita									
ρ [kg.m <sup>-3</sup> ]	c <sub>p</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	α [K <sup>-1</sup> ]	λ <sub>1</sub> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]		[Ω.m.m <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> ]									
7 900	500	17,0.10 <sup>-6</sup>	15		0,73									
<b>Odolnost proti degračním procesům</b>														
ODOLNOST PROTI OXIDACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT														
– na vzduchu do 850 °C (ztráta hmotnosti okujením není průměrně vyšší než 1 g . m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> pro 120 h namáhání se čtyřmi meziochlazeními)														
– v oxidujícím prostředí s obsahem síry – střední														
– v redukčním prostředí s obsahem síry – malá														
– v prostředí bohatém na dusík s nízkým obsahem O <sub>2</sub> – vysoká														
– v nautičujícím prostředí – střední														
<b>ODOLNOST PROTI TEČENÍ</b>														
Mez pevnosti při tečení v tahu R <sub>pm</sub> [MPa]														
Teplota [°C]	600											700	800	
R <sub>pm</sub> /10 <sup>3</sup>	200											88	30	
R <sub>pm</sub> /10 <sup>4</sup>	142											48	15	
R <sub>pm</sub> /10 <sup>5</sup>	65											22	10	
Mez tečení v tahu R <sub>T</sub> [MPa]														
R <sub>T</sub> /10 <sup>3</sup> /1	110											45	15	
R <sub>T</sub> /10 <sup>4</sup> /1	85											30	10	
<b>Technologické údaje</b>														
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ <sup>(3)</sup>														
rozpouštěcí žhání <sup>(1)</sup>														
1 020–1 120 °C ochlazovat na vzduchu nebo ve vodě <sup>(2)</sup>														
TVARITELNOST														
vhodná ke tváření za tepla i za studena														
teploty tváření														
1 150–800 °C														
SVARITELNOST														
svařitelná všemi metodami svařování														
doporučené přídavné materiály pro svařování X5CrNiNb19-9, X12CrNi22-12														
<b>Použití</b>														
Části určené též pro vysoké mechanické namáhání, např. žhací, cementační a kalící přípravky.														
<b>Ostatní vlastnosti</b>														
způsob výroby: volí výrobce														
magnetičnost: nemagnetická (slabě magnetická, pokud je tvářena za studena)														

**Příloha č. 5** Pyrometr CTM-2CF40-C3 výrobce Micro-Epsilon [17]

	28	Non-contact temperature sensor for metal processing	thermoMETER CTM1/M2



**thermoMETER CTM1/M2**

Miniaturized temperature sensor with 1.0 and 1.6 $\mu$ m measuring wavelength

- Measuring range from 250°C to 2200°C
- Up to 125°C ambient temperature without cooling
- For metal processing such as welding, soldering, forming, sintering and for measurements of metal oxides and ceramics
- Extended compensation for measuring errors using short measuring wavelength (e.g. with emissivity changes or misadjustment)
- High compatibility with electromagnetic fields e.g. with induction welding
- Compact sensor for installation in confined spaces
- Selectable and scalable analog output, optional digital interfaces

**Optical specifications thermoMETER CTM1/M2**

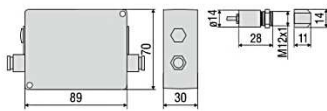
□ = smallest spot size / focal point (mm)

Standard Focus										
1SF40/2SF40	40:1	6.5	10.7	14.9	19.1	23.3	27.4	31.6	35.8	40
1SF75/2SF75	75:1	6.5	8.4	10.2	12.1	13.9	15.8	17.6	19.5	21.3
distance in mm		0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Close Focus (integrated CF lens)										
1CF40/2CF40	40:1	6.5	4.4	2.7	6	10.2	14.4	18.6	22.8	27
1CF75/2CF75	75:1	6.5	3.8	1.5	4.4	8	11.7	15.3	19	22.6
distance in mm		0	60	110	150	200	250	300	350	400



Model	CTM-1SF40-C3	CTM-1SF75-C3	CTM-1SF75H1-C3	CTM-2SF40-C3	CTM-2SF75-C3	CTM-2SF75H1-C3
Optical resolution	40:1	75:1		40:1	75:1	
Temperature range <sup>1</sup>	485 to 1050°C	650 to 1800°C	800 to 2200°C	250 to 800°C	385 to 1600°C	490 to 2000°C
Spectral range	1.0µm			1.6µm		
System accuracy <sup>2,3</sup>	±(0.3% of reading +2°C)					
Repeatability <sup>2</sup>	±(0.1% of reading +1°C)					
Temperature resolution	0.1°C					
Response time <sup>4</sup>	1ms (90%)					
Emissivity/gain <sup>1</sup>	0.100 to 1.100					
Transmissivity/gain <sup>1</sup>	0.100 to 1.100					
Signal processing <sup>1</sup>	peak hold, valley hold, average; extended hold function with threshold and hysteresis					
Certificate of calibration	optional					
Outputs/analog	channel 1	0/4 to 20mA, 0 to 5/10V, thermocouple J, K				
Outputs/analog	optional	relays: 2 x 60VDC/42 VAC <sub>err</sub> ; 0.4A; electrically isolated				
Alarm output		open collector (24V / 50A)				
Outputs/digital	optional	USB, RS232, RS485, CAN, Profibus DP, Ethernet				
Output impedances	current output	mA max. 500Ω (with 8 to 36VDC)				
	voltage output	min. 100kΩ load impedance, thermocouple 20Ω				
Inputs	programmable functional inputs for external emissivity adjustment, ambient temperature compensation, trigger (reset of hold functions)					
Cable length	3m (standard), 8m, 15m					
Power supply	8 to 36VDC; max. 100mA					
Protection class	IP65 (NEMA-4)					
Ambient temperature	sensor	-20°C to 100°C			-20°C to 125°C	
	controller				0°C to 85°C	
Storage temperature	sensor	-40°C to 100°C			-40°C to 125°C	
	controller				-40°C to 85°C	
Relative humidity	10 to 95%, non-condensing					
Vibration	sensor	IEC 68-2-6: 3 G, 11 to 200Hz, any axis				
Shock	sensor	IEC 68-2-27: 50 G, 11ms, any axis				
Weight	sensor: 40g; controller: 420g					

<sup>1</sup> adjustable via programming keys or software  
<sup>2</sup> ambient temperature: 23±5°C  
<sup>3</sup> ε=1, response time 1s  
<sup>4</sup> with dynamic adaption at low signal levels



**Product identification**

CTM-	1	SF40-	C3
Cable length [3m (standard) / 8m / 15m]			
Focus [SF40 / SF75 / CF40 / CF75]			
Spectral range [1=1µm / 2=1.6µm]			
thermoMETER CTM			

**Accessories page 40 - 43**

- Protective window
- Rail mount adapter for controller
- Digital-interface kits
- Mounting bracket / mounting bolt
- Massive housing
- Certificate of calibration
- Air purge collar
- Protective tube
- Right angle mirror
- Laser sighting aid

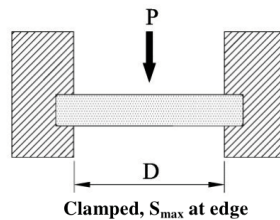
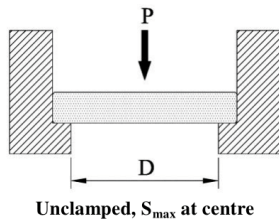
Příloha č. 6 Výpočet tloušťky ochranného sklíčka [18]



The Design of Pressure Windows

Notes to calculate thickness of optical windows used in vacuum or pressure applications

The maximum stress  $S_{max}$  on a uniformly loaded window is given by:  
 $S_{max} = (K \cdot D^2 \cdot P) / (4 \cdot T^2)$  and also  $S_{max} = F_a / SF$  (See Safety Factor Box)  
 and then solving for thickness T  
 $T = D \cdot \sqrt{(SF \cdot K / 4)} \cdot \sqrt{(P / F_a)}$  (CIRCULAR WINDOWS)  
 $T = L \cdot \sqrt{(SF \cdot K / 2)} \cdot \sqrt{(P / (F_a \cdot (1 + R^2)))}$  (RECTANGULAR WINDOWS)



DEFINITIONS	
$S_{max}$	= Maximum stress
SF	= Safety Factor
$F_a$	= Apparent Elastic Limit = or Rupture Modulus
K	= Empirical Constant
D	= Unsupported $\varnothing$ for circular window
L, W	= Length & Width for rectangular window
R	= L / W
T	= Thickness of window
P	= Load per unit area

**CLAMPED**

Circular Window (Safety Factor of 4 &  $K_c = 0.75$ )

$$T = 0.866 D \sqrt{(P / F_a)}$$

Rectangular Window (Safety Factor of 4 &  $K_c = 0.75$ )

$$T = 1.23 L \sqrt{(P / (F_a \cdot (1 + R^2)))}$$

**UNCLAMPED**

Circular Window (Safety Factor of 4 &  $K_u = 1.125$ )

$$T = 1.06 D \sqrt{(P / F_a)}$$

Rectangular Window (Safety Factor of 4 &  $K_u = 1.125$ )

$$T = 1.50 L \sqrt{(P / (F_a \cdot (1 + R^2)))}$$

CONSTANT K	
The value of K depends on the method of support, upon the force introduced in clamping and upon the brittle / ductile character of the window material involved.	
Empirically, a K value of 0.75 is found suitable for most optical crystals when the perimeter is clamped, and a value 50% greater when unclamped.	
$K_c$	= 0.75
$K_u$	= 1.125

SAFETY FACTOR	
To avoid plastic deformation, the maximum stress ( $S_{max}$ ) should be less than the Apparent Elastic Limit ( $F_a$ ) by an appropriate Safety Factor (SF)	
$S_{max} = F_a / SF$	
A modest safety factor of 4 (i.e., maximum stress equals one quarter of the elastic limit) seems to suffice for many laboratory applications where the operating conditions are reasonably under control. Severe conditions such as thermal shock require special consideration and may even result in a decision to use a <i>reduced</i> thickness. The published Apparent Elastic Limit of some materials may not be completely reliable. Crystals vary and cleavage may occur according to grain boundaries or the particular cut of the ingot. Ultimately, the final design thickness must be a carefully considered decision and may need to be empirically tested. Crystran Ltd can accept no responsibility for the adoption of these calculations and recommendations.	

**CRYSTRAN LTD**

1 Broom Road Business Park, Poole, Dorset, UK BH12 4PA

TEL: +44 1202 307650 FAX +44 1202 307651

Email: [sales@crystran.co.uk](mailto:sales@crystran.co.uk)

[www.crystran.co.uk](http://www.crystran.co.uk)

© Crystran Ltd October 2014

### Worked Examples

**CaF<sub>2</sub> window** 50mm Ø with 1 atmosphere P.D

Safety factor of 4

T = 2.8mm unclamped

T = 2.3mm clamped

**CaF<sub>2</sub> window** 52mm x 20mm with 1 atmosphere P.D

Safety factor of 4

T = 1.5mm unclamped

T = 1.2mm clamped

**Sapphire window** 25mm Ø with 3800 psi P.D

Safety factor of 4

T = 7.7mm unclamped

T = 6.3mm clamped

*With sapphire, for pressures above 500psi it is recommended to use windows with the axis of the crystal parallel to the axis of the window. (Perpendicular to the surface)*

**KRS5 window** 40 Ø with 1 atmosphere P.D

Safety factor of 4

T = 2.6mm unclamped

T = 2.2mm clamped

**Fused silica window** 100mm Ø with 1000 kPa P.D

Safety factor of 10

T = 22.6mm unclamped

T = 18.5mm clamped

**ZnSe window** 80mm Ø with 1 atmosphere P.D

Safety factor of 4

T = 3.6mm unclamped

T = 3.0mm clamped

#### COMMON APPARENT ELASTIC LIMITS

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Sapphire)	= 276MPa	= 45000psi
BaF <sub>2</sub>	= 26.9MPa	= 3900psi
BK7 glass	= 63.5MPa	= 9210psi
CaF <sub>2</sub>	= 36.5MPa	= 5300psi
Germanium	= 89.6MPa	= 13000psi
KRS5	= 26.2MPa	= 3800psi
LiF	= 11.2MPa	= 1620psi
MgF <sub>2</sub>	= 49.6MPa	= 7200psi
Silica glass	= 55.0MPa	= 7980psi
ZnS (FLIR)	= 103.4MPa	= 15000psi
ZnSe	= 55.1MPa	= 8000psi

#### NORMAL ATMOSPHERIC PRESSURE

Traditionally measured in:

- (1) pounds/sq inch 14.7 psi
- (2) inches of mercury 29.9213"
- (3) mm of mercury 760 mm
- (4) millibar 1013.240 mBar

Now measured in SI units:

- (5) Pascals 101.324 kPa

(2) and (3) are straightforward measures of a column of mercury supported by 1 atmosphere.

$$1" = 25.4\text{mm} \quad 1\text{mm} = 0.03937"$$

(4) and (5) are actual measures of pressure (force/area) and take account of the density of mercury (13.595gm/cc at 0°degC) and the acceleration due to gravity (980.665 cm/sec<sup>2</sup>) when converting from a mercury barometer reference.

$$\begin{aligned} \text{Pressure at 1 atmosphere} \\ &= 0.76\text{m} \times 13595 \text{ kgm.m}^{-3} \times 9.80665 \text{ m.s}^{-2} \\ &= 101324 \text{ Pa (N/m}^2\text{)} \text{ (m}^{-1}\text{.kgm.s}^{-2}\text{)} \\ &= 101.324\text{kPa} \end{aligned}$$

#### NOTES:

- A carefully designed window may still break before any significant loading if the mounting introduces any localised stress.
- Mismatch of expansion coefficients generally dictates the use of resilient material between window and mounting.
- Thermal outgassing used in UHV systems should be undertaken with caution with crystal windows as thermal shock may initial cleavage in some crystals
- The constant for clamped mounting allows for no flexure at the wall. The use of soft gaskets may allow flexure so the formula for the "unclamped" condition should be used.

#### CRYSTRAN LTD

1 Broom Road Business Park, Poole, Dorset, UK BH12 4PA

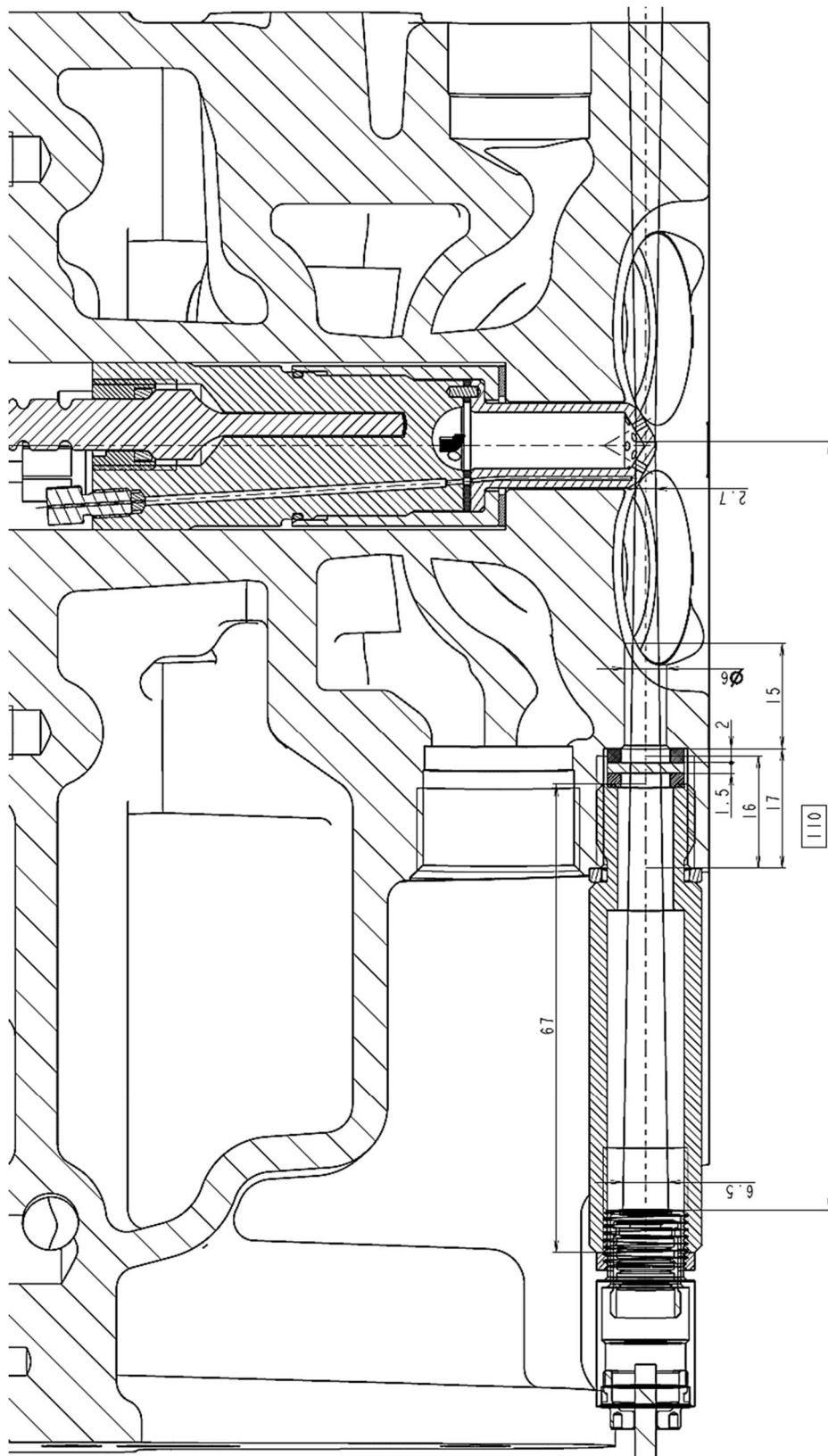
TEL: +44 1202 307650 FAX +44 1202 307651

Email: [sales@crystran.co.uk](mailto:sales@crystran.co.uk)

[www.crystran.co.uk](http://www.crystran.co.uk)

© Crystran Ltd October 2014

Příloha č. 7 Pohled do spalovacího prostoru



**Příloha č. 8** Závislost přenosu na vlnové délce pro BaF<sub>2</sub>[19]

