



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Teplotní analýza předkomůrky

Thermal Analysis of the Pre-Chamber

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2021

Josef JAKEŠ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jakeš** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **482603**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Teplotní analýza předkomůrky

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Provedte teplotní analýzu tzv. předkomůrky, která se užívá pro nepřímý zážeh homogenní směsi v plynovém motoru. Pro analýzu si zvolte vhodný simulační program (CREO, AVL FIRE). K dispozici dostanete 3-D modely součástí a reálná data z měření na motoru. Pro stanovení okrajových podmínek výpočtu použijte dodaný simulační model motoru v programu GT-Power, který je nutné nejprve nakalibrovat na základě naměřených dat. Stanovte tepelnou bilanci hlavy válců a proveďte teplotní analýzu. Výsledky simulace porovnejte s daty z měření a stanovte vhodná doporučení pro zlepšení chlazení a celkové funkce předkomůrky.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Josef Jakeš

Název práce: Teplotní analýza předkomůrky

Anglický název: Thermal Analysis of the Pre-Chamber

Rozsah práce:

47 stran

18 obrázků

15 tabulek

6 příloh

Akademický rok: 2020/2021

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.

Klíčová slova: Předkomůrka, teplotní analýza, tepelná bilance, okrajové podmínky, hlava válce.

Key words: Pre-chamber, thermal analysis, thermal balance, boundary conditions, cylinder head.



Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je teplotní analýza předkomůrky, která je namontovaná ve zkušebním plynovém motoru a stanovení tepelné bilance hlavy válce. Analýza byla provedena metodou konečných prvků v programu PTC Creo 4.0. Okrajové podmínky, potřebné pro analýzu, byly stanoveny v programu GT-Power. Úvodní část práce je věnována funkci a historii předkomůrky a teorii přenosu tepla. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky teplotní analýzy a doporučení pro zlepšení funkce.

Abstract

The aim of the bachelor thesis is the thermal analysis of the pre-chamber mounted in a test gas engine and the determination of the thermal balance of the cylinder head. The analysis was performed in PTC Creo 4.0 software by using the finite element method. The boundary conditions required for the analysis were determined in the GT-Power software. The introduction of the thesis is devoted to the function and history of the pre-chamber and heat transfer theory. In the conclusion of the thesis, the thermal analysis results are evaluated and recommendations for improving the function.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Teplotní analýza předkomůrky” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



Poděkování

Velmi rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Zbyňku Syrovátkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.



Obsah:

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	10
2 Předkomůrka a její funkce	11
2.1 Funkce předkomůrky	11
2.2 Historie předkomůrky.....	11
2.3 Spalování chudé směsi.....	12
2.4 Předkomůrka s přívodem paliva	13
3 Teplota a teplo.....	14
3.1 Teplota.....	14
3.2 Teplo	14
3.3 Přenos tepla.....	14
3.3.1 Vedení tepla (kondukce).....	14
3.3.2 Proudění tepla (konvekce).....	15
3.3.3 Záření (radiace).....	15
3.4 Teplotní zatížení motoru	16
4 Získání okrajových podmínek	17
4.1 Metoda třítlakové analýzy	17
4.2 Kalibrace modelu	17
5 Teplotní analýza.....	19
5.1 Vstupní data simulace	20
5.1.1 Materiálové vlastnosti	20
5.1.2 Součinitel přestupu tepla v kontaktní ploše.....	21
5.1.3 Okrajové podmínky	22
5.2 Nastavení výpočetní sítě.....	24
5.3 Kontrola simulace	25
5.4 Citlivostní analýza	26
5.5 Výsledky tepelné analýzy.....	28
5.6 Vliv materiálu spodní části předkomůrky.....	30
6 Kontrola teplotní analýzy.....	32
7 Návrh umístění snímačů teploty.....	32



8 Závěr	34
Seznam použité literatury	35
Seznam obrázků.....	37
Seznam tabulek	38
Seznam příloh	39
Seznam příloh na CD.....	39



Seznam použitých zkratek a symbolů

c	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
I	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	Celková intenzita záření
L_t	$[\text{kg}_{\text{vzduchu}}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$	Množství vzduchu potřebné k dokonalému spálení 1kg paliva
m	$[\text{kg}]$	Hmotnost systému
m_s	$[\text{kg}]$	Skutečné množství přiváděného vzduchu
m_t	$[\text{kg}]$	Teoretická potřeba vzduchu pro spálení paliva
NO_x		Oxidy dusíku (NO , NO_2)
\dot{Q}	$[\text{W}]$	Tepelný tok (výkon)
grad T	$[\text{K}\cdot\text{m}^{-1}]$	Gradient teploty
\dot{q}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	Hustota tepelného toku
S	$[\text{m}^2]$	Teplosměnná plocha
T	$[\text{K}]$	Termodynamická teplota
TPA		Three-pressure analysis
t	$[\text{°C}]$	Celsiova teplota
α	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla
α_k	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla v kontaktní ploše
ΔT	$[\text{K}]$	Změna teploty
ε	$[-]$	Emisivita povrchu tělesa
λ	$[-]$	Součinitel přebytku vzduchu
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Tepelná vodivost
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota látky
σ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefanova-Boltzmannova konstanta
τ	$[\text{s}]$	Čas děje



1 Úvod

Vývoj spalovacích motorů směřuje v dnešní době k co nejvýraznějšímu snižování emisí. Zároveň je snaha o celkové navýšení termodynamické účinnosti. Palivo, při jehož spalování by v ideálním případě vznikali téměř bezemisní spaliny je vodík o vysoké čistotě. Výroba takového vodíku je ovšem stále velmi energeticky náročná. Proto se jako vhodné palivo jeví zemní plyn. Spalováním zemního plynu výrazně snižujeme produkci CO₂ ve výfukových plynech oproti konvenčním palivům jako je benzín nebo nafta. V kombinaci se spalováním chudé směsi dochází také k snížení produkce oxidů dusíku.

Pro zapálení chudé směsi se využívá předkomůrka. Jako nejvhodnější se jeví předkomůrka, která je doplněna systémem vyplachování. Její princip spočívá v přípravě vhodné směsi k zapálení uvnitř předkomůrky, která se zažehne jiskrou. Směs po zažehnutí rychle expanduje skrz otvory předkomůrky a způsobí vícebodové zapálení velmi chudé směsi, které zvyšuje rychlost hoření a zapalovací energii.

Při vývoji takovéto předkomůrky je potřeba analyzovat místa, která by se vlivem horkých plynů mohla přehřívat a tím způsobovat nežádoucí předčasné zapálení směsi. Předčasný zážeh může způsobovat detonační spalování, které by vedlo k propálení samotné komůrky, či celkové destrukci motoru. Nejednoduší řešení, jak zjistit teplotu v určité části předkomůrky, je použití snímačů teploty (kontaktních i bezkontaktních). Pokud ovšem chceme získat přehled o průběhu teploty v celé předkomůrce, je pro tyto účely výhodné použít vhodný software, který pomocí metody konečných prvků dokáže takový průběh dopočítat.

Proto je hlavním cílem této bakalářské práce vytvoření teplotní analýzy předkomůrky bez systému vyplachování včetně hlavy válce v softwaru PTC Creo 4.0. Předkomůrka byla testována ve zkušebním jednoválcovém plynovém motoru Škoda. Většina okrajových podmínek, potřebných pro výpočet, byla dopočítána v softwaru GT-Power. Model v softwaru GT-Power byl kalibrován daty získanými při reálném měření zkoušené sestavy. Teplotní analýza byla křížově kontrolována naměřenými daty z termočlánku. Výsledky simulace při konkrétním zatížení motoru byly následně použity pro výpočet tepelné bilance hlavy válce, která slouží převážně pro kontrolu okrajových podmínek získaných z GT-Poweru a okrajových podmínek dopočítaných z naměřených dat.



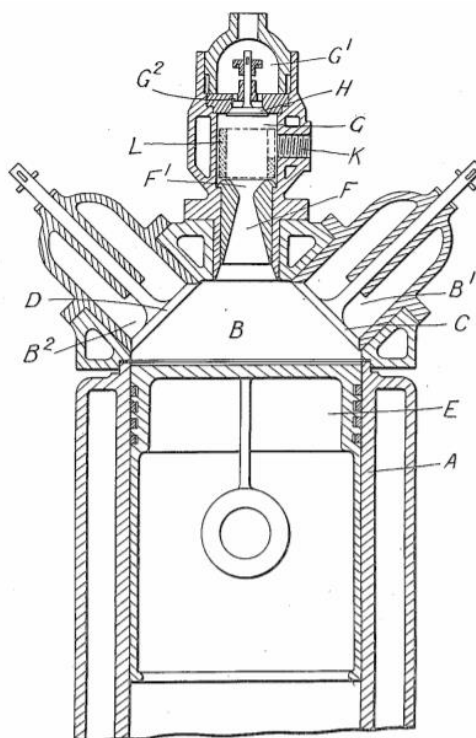
2 Předkomůrka a její funkce

2.1 Funkce předkomůrky

Předkomůrka má svůj vlastní spalovací prostor, který je spojen se spalovacím prostorem válce daným počtem otvorů určitého rozměru a tvaru. Část směsi se během komprese dostává skrze otvory do předkomůrky, kde se před horní úvratí zažehne. V komůrce shoří jen část směsi, zvýší se v ní tlak a zbývající zapálená směs je prudce vytlačena otvory do spalovacího prostoru válce. Zde způsobí vícebodové zapálení směsi a spalování se dokončí.

2.2 Historie předkomůrky

Způsob implementovat komůrku do spalovacího prostoru si jako první nechal patentovat Sir Harry Ricardo. Ricardo vynalezl v první polovině 20. století konstrukční řešení pro vznětový i zážehový motor. Jeho konstrukční řešení pro zážehový motor využívalo kromě sacího a výfukového ventilu ještě navíc ventil, který řídil přívádění bohaté směsi do komůrky. [1]

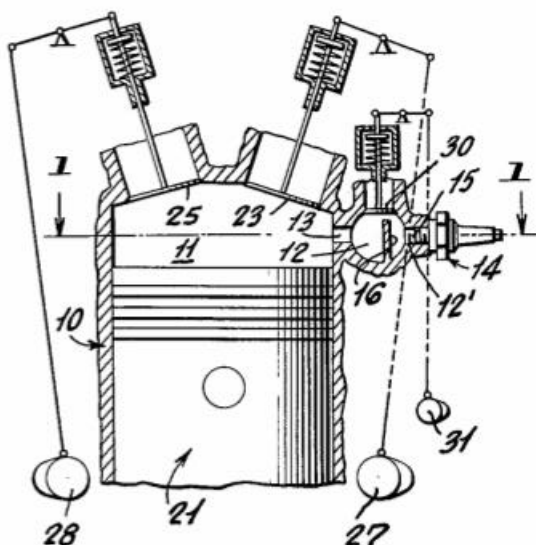


Obr. 1: Design předkomůrky podle Harry Ricarda [2]

Později se o nejvýraznější vývoj předkomůrky zážehového motoru postaral Goossak Lev Abramovich (L. A. Gussak). Ten si nechal patentovat spalovací systém tryskového zážehu LAG, kolem kterého vytvořil několik studií. Gussak se zabýval optimální velikostí komůrky, velikostí a tvarem propojovací otvorů či zapalování chudé směsi ve spalovacím prostoru pomocí bohaté směsi zažehnuté uvnitř předkomůrky. Gussak již ve svých studiích přišel na výrazné snížení tvorby oxidů dusíku, při takovéto koncepci zapalování. Později byl



tento systém spalování zakomponován do motoru ZMZ-4022, který byl montován do osobních vozů značky Gaz. [1]



Obr. 2: Schéma spalovacího systému LAG [3]

Předkomůrka se také používala u vznětových motorů s nepřímým vstřikem. Tato konstrukce motoru využívá výrazně nižší vstřikovací tlak (14 MPa) na rozdíl od motorů s přímým vstřikem. Výhodou bylo rovnoměrnější spalování, klidnější chod a nižší namáhání motoru. Velkou nevýhodou těchto motorů byly obtížné starty způsobené horší účinností spalování při studeném motoru. Proto musel být spalovací prostor komůrky doplněn o žhavicí svíčku. Tento systém využíval například německý čtyřválcový motor 4KVD8SVL, montovaný do nosičů náradí RS - 09. [4]

2.3 Spalování chudé směsi

Množství vzduchu ve spalovacím prostoru při spalování je charakterizováno součinitelem přebytku vzduchu λ . [5]

$$\lambda = \frac{m_s}{m_t} \quad (1)$$

m_s skutečné množství přiváděného vzduchu [kg]

m_t teoretická potřeba vzduchu pro spálení paliva [kg]

$$m_t = L_t \cdot m_p \quad (2)$$

L_t teoretické množství vzduchu potřebné k dokonalému (stechiometrickému) spálení 1kg paliva [kg vzduchu/kg paliva]

m_s skutečné množství přiváděného paliva [kg]

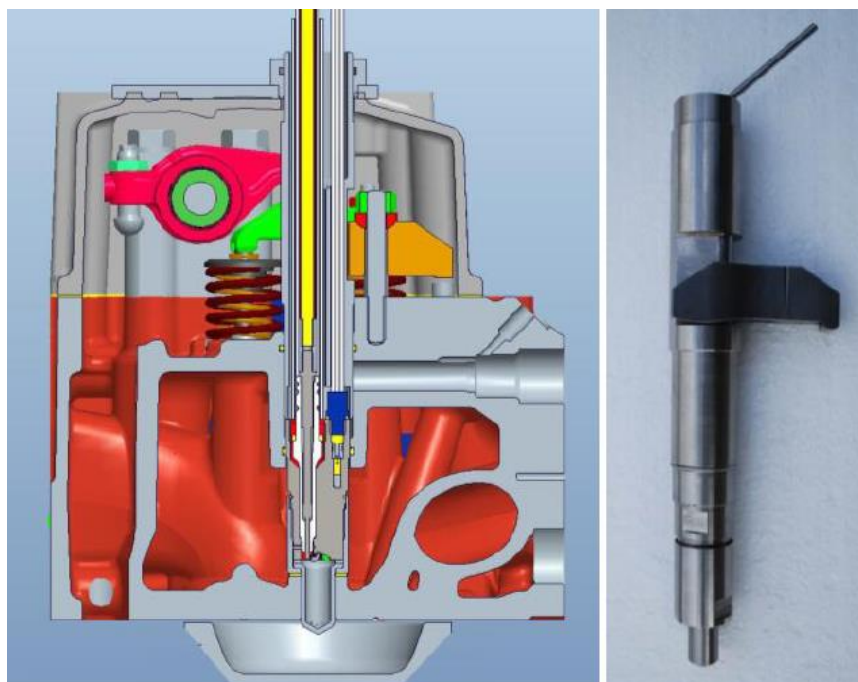


Při $\lambda = 1$ získáváme teoreticky ideální směs paliva se vzduchem, takzvanou stechiometrickou směs. Při zvýšeném množství paliva, získáváme směs bohatou, které odpovídá $\lambda < 1$. Směsi chudé odpovídá $\lambda > 1$. [5]

Výrazněji chudá směs ($\lambda > \text{cca } 1,2$) způsobuje výrazně nižší maximální teploty v průběhu spalování, čímž napomáhá k výraznému snížení NO_x emisí (oxidy dusíku). Takto chudá směs paliva se vzduchem je zatím ovšem obtížně zažehnutelná, alespoň pro klasické systémy zapalování. Zvyšováním přebytku vzduchu nad hodnotu $\lambda \doteq 1,5$ dochází při použití předkomůrky bez přívodu paliva (klasická koncepce předkomůrky) k nestabilnímu spalování směsi. Řešením tohoto problému je vyplachovaná předkomůrka, která lokálně obohacuje směs a tu lze poté stabilněji zapálit. Jde o již výše zmíněnou předkomůrku doplněnou o vlastní přívod paliva. Tato konstrukce umožňuje spalování chudé směsi, převyšující hodnotou součinitele přebytku vzduchu $\lambda = 2$. [6]

2.4 Předkomůrka s přívodem paliva

Její princip je téměř totožný s předkomůrkou bez vyplachování. Při nasávání směsi paliva se vzduchem současně dochází k plnění předkomůrky palivem. Při kompresi je chudá směs mísená s palivem v předkomůrce, tvoří se směs vhodná pro zapálení. Zažehnutá směs v komůrce rychle hoří a je vytlačována skrz otvory, čímž způsobí vícebodové zapálení chudé směsi ve spalovacím prostoru válce. Další výhodou této koncepce je výrazně lepší vypláchnutí komůrky vlastním přívodem paliva, tudíž v komůrce nezůstanou téměř žádné zbytkové plyny. Přídavné palivo zároveň ochlazuje stěny komůrky. Tento způsob spalování chudé směsi navyšuje účinnost motoru a zároveň výrazně snižuje množství vzniku oxidů dusíku. [6]



Obr. 3: Prototyp vyplachované předkomůrky a jeho umístění v motoru [7]



Oxidy dusíku vznikají v motoru při spalování za vysokých teplot a tlaků. Vznikající oxid dusný není pro živý organismus závažně škodlivý, ale při delším působení v atmosféře dojde k jeho oxidaci na oxid dusičitý. Vdechování oxidu dusičitého i v malém množství poškozuje sliznici, oslabuje odolnost lidského organismu, vyvolává pocit dušení a nutí nás ke kašli. Oxidy dusíku se dále podílejí na vzniku smogu v letních měsících a také přispívají k tvorbě kyselých dešťů. [8]

Spalováním chudé směsi dochází k poklesku maximální teploty spalování, a tím i ke snížení vzniklých tepelných ztrát. Přebytečný vzduch v chudé směsi zároveň navyšuje hodnotu Poissonovy konstanty (poměr měrných tepelných kapacit), čímž dochází ke zvýšení celkové tepelné účinnosti spalování. Tato koncepce spalování chudé směsi také umožňuje omezit nutnost škrcení pro regulaci výkonu a tím snížit pumpovní ztráty. [9]

3 Teplota a teplo

3.1 Teplota

Kinetická energie částic látky se projevuje jako teplota. Teplota je stavová termodynamická veličina, určující stav hmoty. Je charakterizována 0. termodynamickým zákonem. Za nejnižší teplotu, při které se zastaví veškerý pohyb částic, je považována teplota absolutní nuly. Ta byla převzata jako nula v Kelvinově stupnici a odpovídá - 273,15 °C. Celsiova stupnice byla stanovena dle teploty tání ledu ($t = 0\text{ °C}$) a teploty varu vody ($t = 100\text{ °C}$). Teplota, při které můžeme pozorovat vodu v pevném, kapalném i plynném skupenství se nazývá trojným bodem vody ($T = 273,16\text{ K}$; $t = 0,01\text{ °C}$). [10]

3.2 Teplo

Teplo je nestavová termodynamická veličina, značena písmenem Q. Jednotkou je joule. Vyjadřuje změnu vnitřní energie při tepelné výměně jako důsledek teplotního rozdílu. Teplo bereme jako kladné, je-li přivedeno do systému. Jestliže teplo bylo naopak odvedené ze systému, bereme ho naopak jako záporné. [10]

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

m hmotnost systému [kg]

$(T_1 - T_2)$ rozdíl teplot [K]

3.3 Přenos tepla

3.3.1 Vedení tepla (kondukce)

Jedná se o šíření mechanické formy energie prostřednictvím mikroskopického pohybu částic (molekul, atomů). Částice látky s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie vzájemnými srážkami částicím v oblasti s nižší střední kinetickou



energií. Částice se nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Tento způsob přenosu tepla je typický pro pevné látky. V kapalinách a plynech probíhá také, jeho vliv zde ovšem můžeme zanedbat vzhledem k makroskopickému proudění tekutiny. V potaz lze brát jen tehdy, kdy je proudění potlačeno. Příkladem mohou být úzké mezery či drobné dutiny. Přenos tepla vedením je popsán empirickým Fourierovým zákonem. [11]

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (4)$$

\dot{q} hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

λ tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

grad T gradient teploty [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

3.3.2 Proudění tepla (konvekce)

Uplatňuje se pouze u tekutin (kapalin a plynů), popřípadě plazmatu. Teplo se šíří makroskopickým pohybem tekutiny. Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu částí, majících odlišnou teplotu, a tedy i různou hustotu vnitřní energie. Podle typu proudění, můžeme konvenci rozdělit na: přirozenou a nucenou. [11]

Přirozené proudění je způsobené změnou hustoty tekutin při změně její teploty. Pokud ohřívána část tekutiny zmenší svou hustotu, stoupá a vytlačuje chladnější část s vyšší hustotou. Takto vzniká v tekutině proudění.

Nucené proudění je vyvoláno vnější formou energie (např.: ventilátor, kompresor, čerpadlo). Příkladem tohoto typu konvekce je běžně používané kapalinové chlazení spalovacího motoru s nuceným oběhem.

Přenos tepla prouděním mezi tekutinou a tuhou stěnou je popsán empirickým Newtonovým ochlazovacím zákonem. [11]

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (5)$$

\dot{q} hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

α součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

$(T_1 - T_2)$ rozdíl teplot mezi tekutinou a tuhou stěnou [K]

3.3.3 Záření (radiace)

Teplo se přenáší pomocí teplotního záření. Objekt emituje do prostoru energii ve formě elektromagnetického záření. Zahřátý hmotný objekt přeměňuje část své vnitřní energie na energii elektromagnetických vln, které se při dopadu na jiný hmotný objekt přemění zpět na vnitřní energii. Tím se zvýší jeho termodynamická teplota. Tento přenos tepla byl dříve označován jako sálání. Intenzita záření je popsána pomocí Stefanova-Boltzmannova zákonu. [11]



$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

(6)

I celková intenzita záření [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

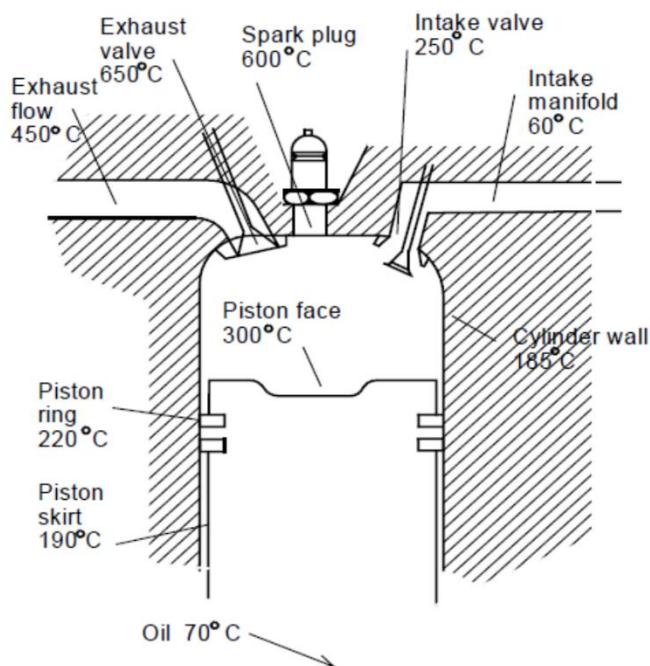
ε emisivita povrchu tělesa [1]

σ Stefanova-Boltzmannova konstanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$], $\sigma = 5,670\,400\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

T termodynamická teplota tělesa [K]

3.4 Teplotní zatížení motoru

Přesné rozložení teplot je závislé na konstrukčním řešení spalovacího prostoru i motoru jako celku. Tepelný tok do jednotlivých částí spalovacího prostoru se liší. V důsledku tohoto nerovnoměrného rozložení tepelného toku a různých tepelných odporů mezi stěnami spalovacího prostoru a stěnami, obtékanými chladicí kapalinou, je teplota jednotlivých součástí motorů rozdílná. Tepelný tok do hlavy válců je obvykle nejvyšší v oblasti výfukových sedel ventilů. [12]



Obr. 4: Typické teploty pro zážehový motor v ustáleném stavu [13]

Z obrázku 4 je patrné, že nejvyšší teploty ve spalovacím prostoru zážehového motoru jsou v okolí talířku výfukového ventilu a zapalovací svíčky. U přeplňovaných zážehových motorů může teplota talířku výfukového ventilu dosáhnout výjimečně až $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto je důležité zajistit dostatečný odvod tepla z těchto partií, z důvodu zamezení vzniku samozápalů a zajištění přijatelných teplot jednotlivých dílů pro spolehlivý provoz motoru. Pokud tedy chceme zcela vyloučit vznik předčasného zážehnutí směsi uvnitř analyzované předkomůrky, měla by se teplota stěn předkomůrky pohybovat výrazně pod touto teplotou.



4 Získání okrajových podmínek

Většina okrajových podmínek, potřebných pro samotnou tepelnou analýzu, byla získána ze softwaru GT-Power. Pro výpočet byla použita metoda třítlakové analýzy (kapitola 4.1). Nastavený model motoru mi byl poskytnut mým vedoucím závěrečné práce Ing. Zbyňkem Syrovátkou, Ph.D. Model byl následně kalibrován tak, aby jeho vstupní data odpovídaly naměřeným datům na reálném zkušebním motoru.

4.1 Metoda třítlakové analýzy

Metoda třítlakové analýzy (TPA) vyžaduje pro výpočet tři změřené tlaky: v sání, válci a výfuku. Naopak pro tuto analýzu není třeba jako vstup odhad podílu zbytkových plynů, což je její velká přednost. Výpočet probíhá po jednotlivých cyklech, dokud se nedosáhne jeho konvergence. Z výsledku je poté vypočten podíl zbytkových plynů a dalších zbytkových veličin. Součástí třítlakové analýzy jsou dva typy simulací: stacionární a multicyklová. Ve stacionárním režimu bývají vstupní data průměrována a získává se jeden průběh hoření pro jednotlivé podmínky zvlášť. Při multicyklovém přístupu jsou okamžité hodnoty v sání, válci a výfuku brány ve více po sobě jdoucích cyklech. Smyslem tohoto typu simulace je odhalit vliv mezicyklové variability. [14]

Nevýhodou této metody je potřeba většího množství naměřených dat. Další nevýhodou je pomalejší konvergence výpočtů. Tato metoda je doporučena pro případy, kdy nelze lehce odhadnout hodnotu podílu zbytkových plynů. [14]

4.2 Kalibrace modelu

Okrajové podmínky potřebné jako vstupní hodnoty pro teplotní analýzu jsou jedním z výstupů výpočtu. Těmito okrajovými podmínkami jsou teplota proudící tekutiny a součinitel přestupu tepla mezi stěnou a obklopující tekutinou. Aby tyto hodnoty odpovídali realitě a model nebyl vůči skutečnému motoru přehříván, nebo přechlazován, musí být poskytnutý model v GT-Poweru vhodně kalibrován. Při kalibraci musely být upraveny veškeré teplosměnné plochy tak, aby byly shodné se zkušebním motorem. Zvláštní pozornost se musela dbát na takové plochy, které mají nejvýraznější podíl na ohřevu a chlazení hlavy. Mezi tyto plochy patří výfukový kanál, teplosměnná plocha spalovacího prostoru či plocha pláště chladícího média. Právě součinitel přestupu tepla mezi chladícím médiem a stěnou hlavy byl další parametr, kterým musel být model v GT-Poweru kalibrován. Z literatury [15] můžeme zjistit, že součinitel přestupu tepla vody při nucené konvenci dosahuje 500 až 10 000 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Tato hodnota závisí na proudění kapaliny a teplotě stěny. Maximální hodnoty součinitele vznikají při lokálním varu kapaliny. Jelikož je součinitel zadáván jako průměrná hodnota na celou plochu stěny, byl vypočítán z naměřeného rozdílu vstupní a



výstupní teploty chladícího média v okruhu hlavy motoru. Teplota stěny byla nejdříve odhadnuta a následně aproximována pomocí simulace.

$$\alpha_{chlazení} = \frac{\dot{Q}_{chlazení}}{S_{chlazení} \cdot (T_{stěna} - T_{střední})} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T_{chlazení}}{\tau \cdot S_{chlazení} \cdot (T_{stěna} - T_{střední})} \quad (7)$$

$\alpha_{chlazení}$ součinitel přestupu tepla chlazení [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

$\dot{Q}_{chlazení}$ potřebný tepelný výkon pro ohřev chladiva [W]

c měrná tepelná kapacita chladícího média [$W \cdot h \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

m hmotnost chladícího média [kg]

$\Delta T_{chlazení}$ rozdíl vstupní a výstupní teploty v chladícím okruhu hlavy [K]

τ čas děje [hod]

$S_{chlazení}$ teplosměnná plocha pláště chladícího média [m^2]

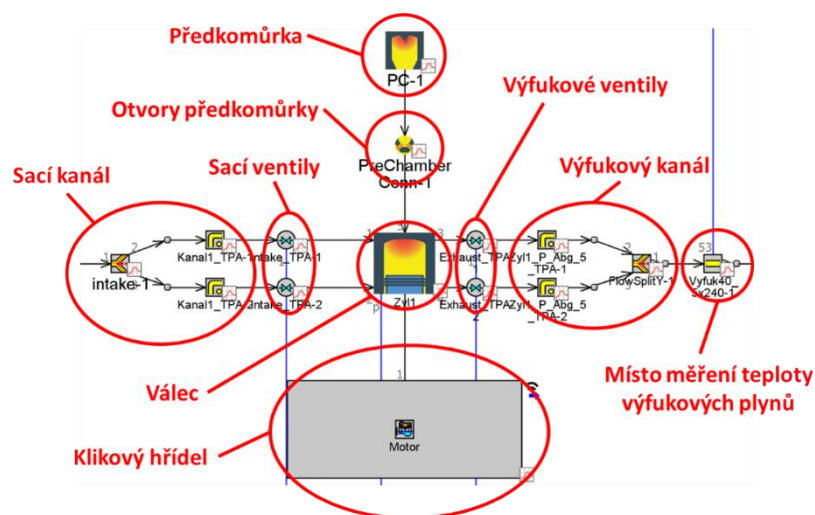
$T_{stěna}$ teplota stěny pláště chladícího média [K]

$T_{střední}$ průměrná teplota chladícího média [K]

Po kalibraci byla z výstupních hodnot programu GT-Power vytvořena bilance tepelného toku hlavy válce, kde bylo provedeno porovnání vypočteného tepelného toku do chladícího média z naměřených hodnot s hodnotou vypočtenou programem. Tato bilance slouží pro kontrolu kalibrace modelu, a tedy i pro předběžnou kontrolu získaných okrajových podmínek. V tabulce 1 jsou vypsány výsledky tepelné bilance pro obě zkoumané zatížení motoru. Tepelná bilance byla provedena v programu Microsoft Excel a je uvedena v příloze na CD, včetně naměřených hodnot. Právě pro budoucí jednodušší vytváření celkové tepelné bilance hlavy válce, která bude sloužit pro kontrolu námi vytvořené teplotní analýzy, je pro okrajové podmínky použita teplota a součinitel přestupu tepla proudící tekutiny. Tyto efektivní hodnoty součinitelů přestupu tepla a teplot po správné kalibraci modelu zaručují stejné výsledky, kterých by bylo dosaženo při použití integrálů průběhů tepelných toků.

Tepelná bilance modelu v GT-Poweru		
	Zatížení při 3000 ot/min	Zatížení při 4500 ot/min
OHŘEV	$\dot{Q} = 3762,7 \text{ W}$	$\dot{Q} = 4860,8 \text{ W}$
CHLAZENÍ	$\dot{Q} = 3833 \text{ W}$	$\dot{Q} = 5034 \text{ W}$
CELKOVÁ BILANCE	$\dot{Q} = -70,3 \text{ W}$	$\dot{Q} = -173,2 \text{ W}$
CELKOVÁ CHYBA	1,83 %	3,44 %

Tab. 1: Tepelná bilance modelu v GT-Poweru

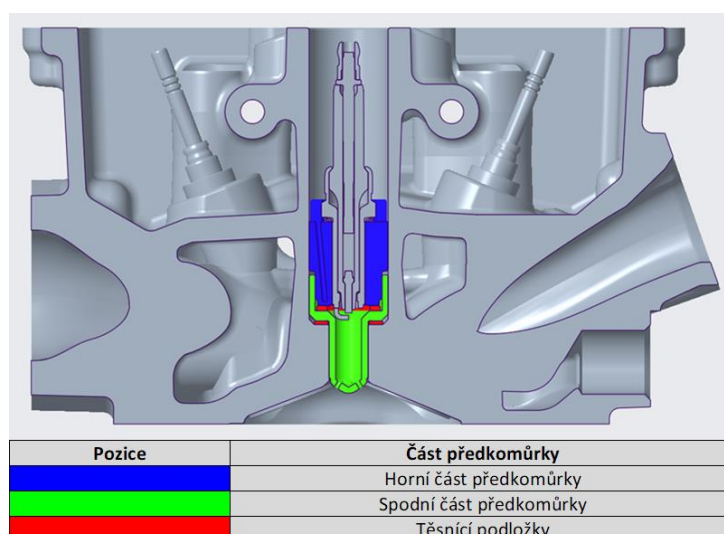


Obr. 5: Hlavní části modelu v programu GT-Power

5 Teplotní analýza

Samotná teplotní analýza byla provedena v programu PTC Creo 4.0. Jednotlivé 3D modely sestavy zkušebního jednoválcového motoru mi byly poskytnuty mým vedoucím práce Ing. Zbyňkem Syrovátkou, Ph.D. Některé geometrie jednotlivých komponent museli být upraveny tak, aby mohly být jednotlivé součásti bezproblémově sestaveny a pro celou sestavu mohla být vytvořena výpočetní síť. Jednalo se zejména o odstranění příliš ostrých hran, či malých objemů, které neovlivňují teplotu předkomůrky, a proto nemají vliv na výsledek simulace. Na nich by pak musela být vytvořena síť s velmi malou velikostí základních elementů, což by mělo za následek výrazně pomalejší konvergenci výsledků, či dokonce nemožnost vytvořit samotnou výpočetní síť.

Na obrázku 6 je zobrazeno umístění analyzované předkomůrky v hlavě válce testovaného motoru Škoda včetně popisu jednotlivých částí.



Obr. 6: Umístění předkomůrky v hlavě válce



5.1 Vstupní data simulace

Protože se teplota jednotlivých součástí po určitém čase téměř ustálí a rychlé cyklické změny teplot uvnitř obou spalovacích prostorů a výfukového kanálu vytváří jen minimální změnu teploty jednotlivých dílů, je teplotní analýza provedena jako stacionární. Pro správné zadefinování stacionární úlohy je potřeba přiřadit jednotlivým dílům vlastní materiálové vlastnosti. Dále je nezbytné mezi stykové plochy jednotlivých komponent zadat vhodný tepelný odpor jako součinitel přestupu tepla v kontaktu. Teplotní ohřívání a chlazení bylo zadáno formou okrajových podmínek. Tyto konvekce byly definovány teplotou proudícího média a součinitelem přestupu tepla mezi médiem a obtékanou stěnou.



Obr. 7: Schéma tepelných toků působících na předkomůrku

5.1.1 Materiálové vlastnosti

Nejdůležitější vlastnosti materiálu, které potřebujeme pro naši simulaci bezpodmínečně znát, jsou měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a hustota daného materiálu. Největší pozornost musí být věnována materiálovým vlastnostem zkoumané předkomůrky. Horní část předkomůrky je vyrobena z korozivzdorné austenitické oceli 17 248. Spodní část předkomůrky ze slitiny mědi CuCr1Zr. Materiálové vlastnosti pro tyto komponenty byly nastaveny podle materiálových listů, uvedených v příloze 1 a 2. Pro jednotlivé měděné těsnící podložky předkomůrky byly vlastnosti materiálu nastaveny již podle předdefinované možnosti v programu pro měď. Předdefinované materiály byly použity i pro ostatní komponenty hlavy válce a zapalovací svíčky. Materiálové vlastnosti zapalovací svíčky se ve většině případů zcela shodovali s hodnotami již přednastavenými programem. S přihlédnutím k tomu, že tyto nepřesnosti mají na výsledek zanedbatelný



dopad, mohly být předdefinované materiály použity. V případě některých součástí bylo této skutečnosti využito pro neznalost přesné jakosti materiálu. Přiřazení jednotlivých materiálů a jejich vlastností k jednotlivým částem motoru je patrné z následujících dvou tabulek.

Část motoru	Materiál	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Hlava válce	Slitina hliníku	2 710	875	157
Spodní část předkomůrky	CuCr1Zr	8 900	376	320
Horní část předkomůrky	Ocel 17 248	7 900	500	15
Podložky předkomůrky	Měď	8 940	385	394
Ventily	Nerezová ocel	7 750	474	25
Sedla ventilů	Uhlíková ocel	7 850	500	50
Vodítka ventilů	Bronz	8 810	384	60

Tab. 2: Materiálové vlastnosti jednotlivých komponent sestavy

Část zapalovací svíčky	Materiál	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Pouzdro	Ocel třídy 11	7 850	478	42
Vnější elektroda	Slitina niklu	8 900	456	70
Vnitřní těsnící podložka	Měď	8 940	38	394
Těsnící podložka	Ocel třídy 11	7 850	478	42
Izolátor	Oxid hlinitý	3 700	880	24
Střední elektroda	Stříbro	10 500	235	419
Odporový zátav	Křemík	2 330	710	150
Svorník	Ocel třídy 11	7 850	478	42
Kabelová matice	Ocel třídy 11	7 850	478	42

Tab. 3: Materiálové vlastnosti sestavy zapalovací svíčky






Pro materiál spodní části předkomůrky byla také při experimentálním testování zkušebního motoru použita nerezová ocel 17 248. V tomto případě je tedy celá předkomůrka z austenitické korozivzdorné oceli. V simulaci tedy můžeme také porovnat vliv změny materiálu této části předkomůrky na průběhu teploty na předkomůrce.

5.1.2 Součinitel přestupu tepla v kontaktní ploše

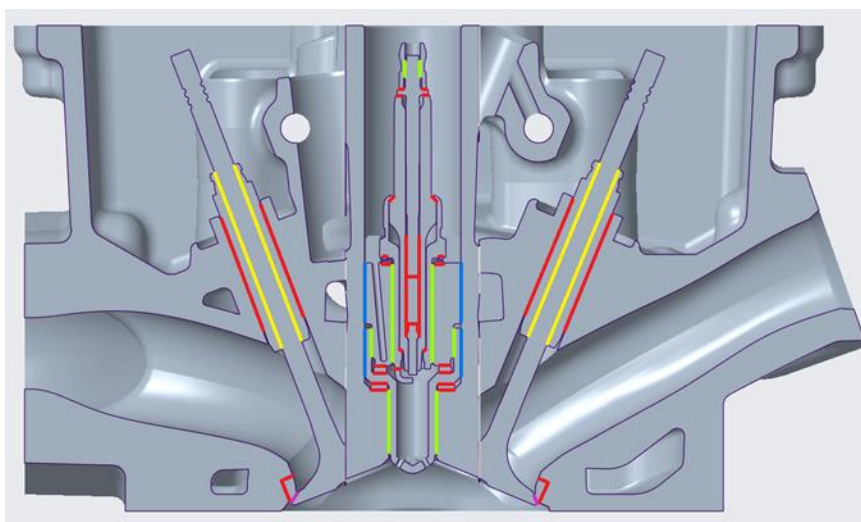
Protože stykové plochy jednotlivých komponent nejsou vlivem drsnosti povrchu a nedokonalé geometrie v dokonalém styku, dochází mezi nimi k tepelnému odporu. Tento odpor je charakterizován součinitelem přestupu tepla v kontaktu. Pro kontaktní plochy, které se spolu pevně dotýkají, byl součinitel přestupu tepla v kontaktu nastaven dle literatury [16] na $6000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro závitová spojení je předpokládán daleko nižší součinitel přestupu tepla v kontaktu, protože ovšem pro tento typ kontaktní plochy



neznáme přesnou hodnotu tohoto součinitele, musela být provedena jeho citlivostní analýza, která bude detailněji popsána v samostatné kapitole. Hodnota je zadávána na válcovou plochu, nikoli na geometrii závitu. Tepelný odpor mezi předkomůrkou a montážním otvorem hlavy válce byl po konzultaci a s přihlédnutím k literatuře [16] stanoven na $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Jednotlivé hodnoty jsou vypsány v tabulce 4. Pozice jsou patrné z obrázku 8.

Pozice	Typ kontaktní plochy	$\alpha_k [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
	Kontaktní plochy se pevně dotýkají celou plochou	6000 [16]
	Kontaktní plochy mezi ventilem a ventilovým sedlem	3750 [16]
	Kontaktní plochy mezi ventilem a vodítkem ventilu	600 [16]
	Kontaktní plocha mezi předkomůrkou a montážním otvorem	100
	Závitové spoje (zadávané na válcovou plochu)	{500÷3000}

Tab. 4: Součinitelé přestupu tepla v kontaktech





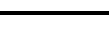


Obr. 8: Pozice kontaktních ploch

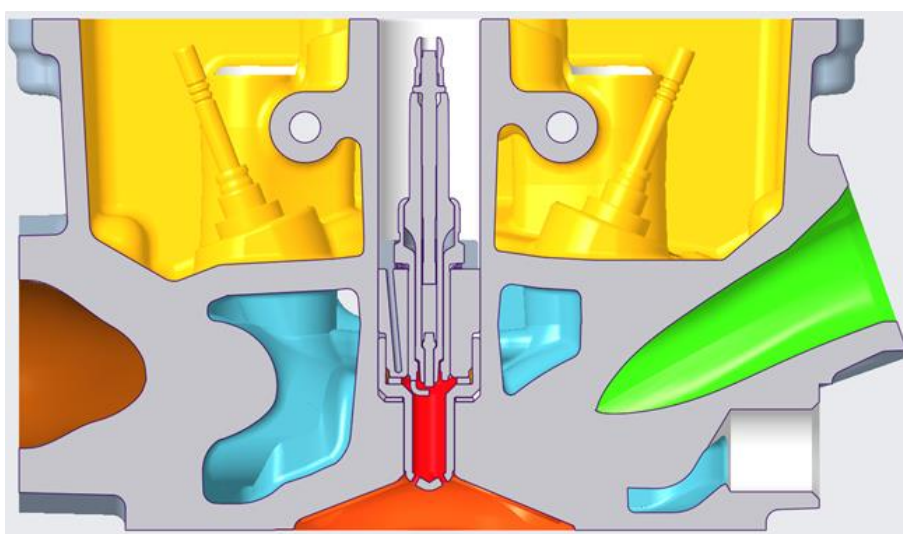
5.1.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky konvekce ve spalovacím prostoru válce a předkomůrky, sacím a výfukovým kanálu byly získány, jak již bylo uvedeno, z kalibrovaného modelu v programu GT-Power. Součinitel přestupu tepla chladícího média byl dopočítán z naměřených hodnot (podle rovnice 7) a jeho teplota byla získána měřením. Zbylé okrajové podmínky byly získány z naměřených hodnot a doplněny s přihlédnutím k literatuře [16] a [17]. V tabulce 5 jsou přiřazeny pozice jednotlivým typům okrajových podmínek. Pozice jsou patrné z obrázků 9 a 10.



Pozice	Typ okrajové podmínky
	Horké plyny ve válci
	Horké plyny v komůrce
	Výfukový kanál
	Sací kanál
	Chladící kapalina
	Vzduch s olejem pod víkem hlavy válce
	Okolní vzduch
	„Adiabatický děj“

Tab. 5: Pozice okrajových podmínek



Obr. 9: Pozice okrajových podmínek 1



Obr. 10: Pozice okrajových podmínek 2

Jednotlivé hodnoty okrajových podmínek se liší podle aktuálních provozních podmínek samotného motoru. Hodnoty pro výpočet okrajových podmínek byly zjišťovány ze zkušebního měření při namontované spodní části předkomůrky ze slitiny mědi. Analýza



byla provedena pro dvě odlišné provozní podmínky motoru. Nejprve pro zatížení motoru při 3000 ot/min a následně pro zatížení při maximálně měřených otáčkách (4500 ot/min). Základní parametry těchto provozních podmínek motoru jsou uvedeny v tabulce 6.

První případ zatížení motoru		Druhý případ zatížení motoru	
Otáčky motoru	3 000 ot/min	Otáčky motoru	4 500 ot/min
Střední indikovaný tlak	9,8 bar	Střední indikovaný tlak	9,1 bar
Točivý moment	25,3 Nm	Točivý moment	23,2 Nm
Výkon	8 kW	Výkon	10,9 kW

Tab. 6: Parametry analyzovaných zatížení motoru

Získané okrajové podmínky pro obě analyzované provozní podmínky motoru jsou vypsány v následující tabulce.

	První případ zatížení motoru		Druhý případ zatížení motoru	
	α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	T [K]	α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	T [K]
Horké plyny ve válci	327	1310	392	1297
Horké plyny v komůrce	327	960	392	998
Výfukový kanál	266	1095	356	1142
Sací kanál	146	336	186	320
Chladicí kapalina	4500	360	5000	363
Vzduch s olejem pod víkem hlavy	25 [16]	361	25 [16]	364
Okolní vzduch	5 [17]	320	5 [17]	320

Tab. 7: Získané okrajové podmínky

5.2 Nastavení výpočetní sítě

Pro jednotlivé komponenty sestavy byla postupně nastavena maximální velikost základních prvků. V místě vzniku malých objemů, zkosení či děr, musí být síť dostatečně zjemněna pro zajištění její funkčnosti. Malá velikost základních prvků zpřesňuje výsledek simulace, zvýšený počet prvků ovšem prodlužuje časový úsek, potřebný pro výpočet, a celkovou konvergenci úlohy. Proto je účelné zvolit vhodný kompromis. Maximální velikosti základních prvků nastavené pro jednotlivé části analyzované sestavy hlavy jsou vypsány v tabulce 8. Síť celé sestavy hlavy válce celkem tvoří 538 635 prvků.

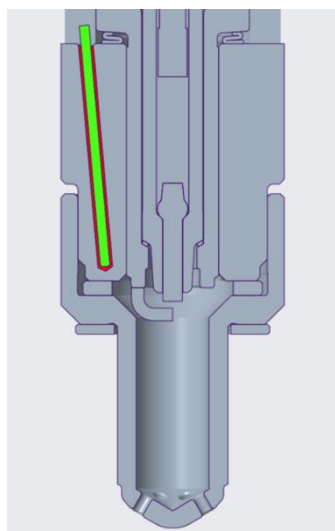


Součást	Maximální velikost základního prvku [mm]
Hlava válce	5
Hlava v místě kontaktu s předkomůrkou	2
Sedla ventilů	2
Vodítka ventilů	2
Těsnící podložky předkomůrky	1
Horní a spodní část předkomůrky	2
Ventily	2
Termočlánek	0,5
Části zapalovací svíčky	1

Tab. 8: Maximální velikosti základních prvků sestavy

5.3 Kontrola simulace

Celá úloha je kontrolována pomocí termočlánu, který je umístěn v horní části předkomůrky. V programu PTC Creo byl vymodelován jako tyčka z austenitické nerezové oceli 17 248, zasunutá do vývrtu pro termočlánek. Mezi termočlánekem a otvorem je vzduchová štěrbina, která charakterizuje nedokonalý kontakt termočlánu s předkomůrkou. Z obrázku 11 je patrné umístění teplotního snímače v předkomůrce. Ve skutečnosti je snímač dotlačen až na dno vývrtu a dotýká se tak v bodově či čárově předkomůrky. Protože by tento dotyk způsoboval chyby při vytváření sítě a není zaručené, že se teplotní snímač dotýká předkomůrky v celém průběhu měření, byla vzduchová mezera vytvořena i na dně vývrtu. Tím může vzniknout malá chyba, která ale bude způsobovat výsledné vyšší výsledné teploty na předkomůrce, čímž jsme na straně bezpečnosti.



Obr. 11: Umístění termočlánu



Materiálové vlastnosti obalu termočlánu byly zadané z materiálového listu. Z důvodu, že je vzduchová štěrbiná velmi úzká (250 μm), můžeme zanedbat přenos tepla prouděním a předpokládáme jen přenos tepla pomocí kondukcce. Vzduchové štěrbině byly zadány vlastnosti vzduchu o teplotě 250 až 300 $^{\circ}\text{C}$, získané z literatury [18]. Součinitel přestupu tepla v kontaktu mezi předkomůrkou, vzduchem a snímačem teploty byl zvolen podle literatury [17]. Jednotlivé hodnoty jsou vypsané v následujících dvou tabulkách.

Pozice	Komponenta	Materiál	c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
	Obal termočlánu	Ocel 17 248	500	15
	Vzduchová štěrbiná	Vzduch o teplotě 250 až 300	1047 [18]	0,045 [18]

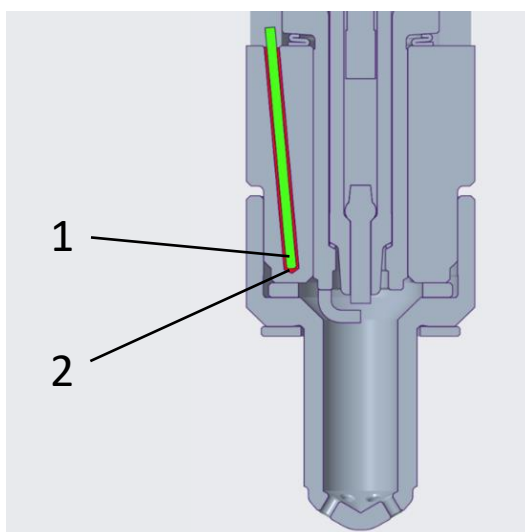
Tab. 9: Použité materiálové vlastnosti termočlánu

Kontaktní plochy	α_k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Horní část předkomůrky – vzduchová štěrbiná	20 [17]
Vzduchová štěrbiná – obal termočlánu	20 [17]

Tab. 10: Použité hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktních plochách

5.4 Citlivostní analýza

Jak již bylo výše uvedeno, jako největší neznámá je pro nás součinitel přestupu tepla v závitovém spoji. Proto musela být vytvořena citlivostní analýza tohoto parametru. Citlivostní analýza byla provedena pro testované zatížení motoru při 3000 ot/min. Postupně bylo vypočteno 7 variant. Pro každou variantu byly z výsledků simulace odečteny teploty na termočlánu. Vybrala se taková varianta, u které se nejlíže shodovaly odečtené teploty s teplotou, která byla reálně naměřena termočlánekem při daných provozních podmínkách motoru. V našem případě byla termočlánekem naměřena teplota 264 $^{\circ}\text{C}$. V tabulce 11 jsou uvedeny jednotlivé varianty součinitele včetně odečtených hodnot.

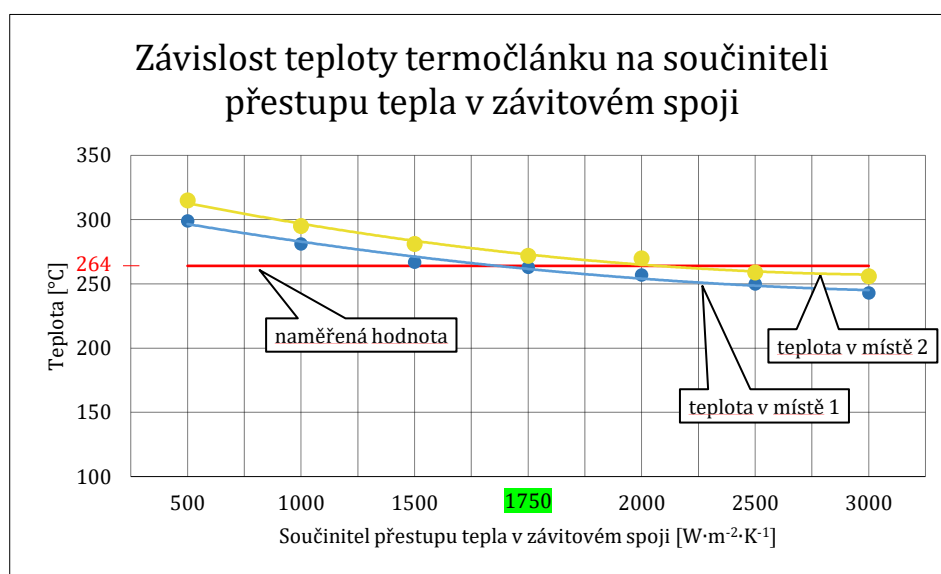


Obr. 12: Pozice odečítání teplot



Varianta	Součinitel přestupu tepla v závitovém spoji	Teplota v místě 1	Teplota v místě 2
1	$\alpha_k = 500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 299 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 315 \text{ }^\circ\text{C}$
2	$\alpha_k = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 281 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 295 \text{ }^\circ\text{C}$
3	$\alpha_k = 1500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 267 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 281 \text{ }^\circ\text{C}$
4	$\alpha_k = 1750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 262 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 272 \text{ }^\circ\text{C}$
5	$\alpha_k = 2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 257 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 269 \text{ }^\circ\text{C}$
6	$\alpha_k = 2500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 259 \text{ }^\circ\text{C}$
7	$\alpha_k = 3000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$t = 243 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 256 \text{ }^\circ\text{C}$

Tab. 11: Citlivostní analýza



Obr. 13: Graf citlivostní analýzy

Z tabulky a grafu citlivostní analýzy (obrázek 13) je patrné, že po porovnání odečítaných teplot s teplotou skutečně naměřenou termočlánkem ($t = 264 \text{ }^\circ\text{C}$) se jako nejvhodnější jeví 4. varianta, kdy je součinitel přestupu tepla v závitovém spoji $\alpha_k = 1750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Z výsledku citlivostní analýzy je tedy potvrzen náš předpoklad, že v případě použití závitového spoje na místo spojení ploch, dotýkajících se celou svou plochou, se tepelný odpor výrazně navýší. Dále je nutné uvést, že hodnota součinitele přestupu tepla v závitě byla zadávána na válcovou geometrii o jmenovitém průměru závitu, tudíž výsledná hodnota neodpovídá součiniteli přestupu tepla v kontaktu skutečné geometrie závitového spoje.

Při analýze dalšího měřeného bodu (provozní podmínky motoru při 4500 ot/min), byla použita stejná hodnota tohoto součinitele. Proto musela být provedena validace a odečtení teplot na termočlánku získaných ze simulace. Hodnoty se téměř shodovaly s hodnotou, která byla skutečně naměřena termočlánkem při daných provozních podmínkách zkoušeného motoru, která je v našem případě $302 \text{ }^\circ\text{C}$. Proto můžeme považovat citlivostní analýzu za úspěšnou.

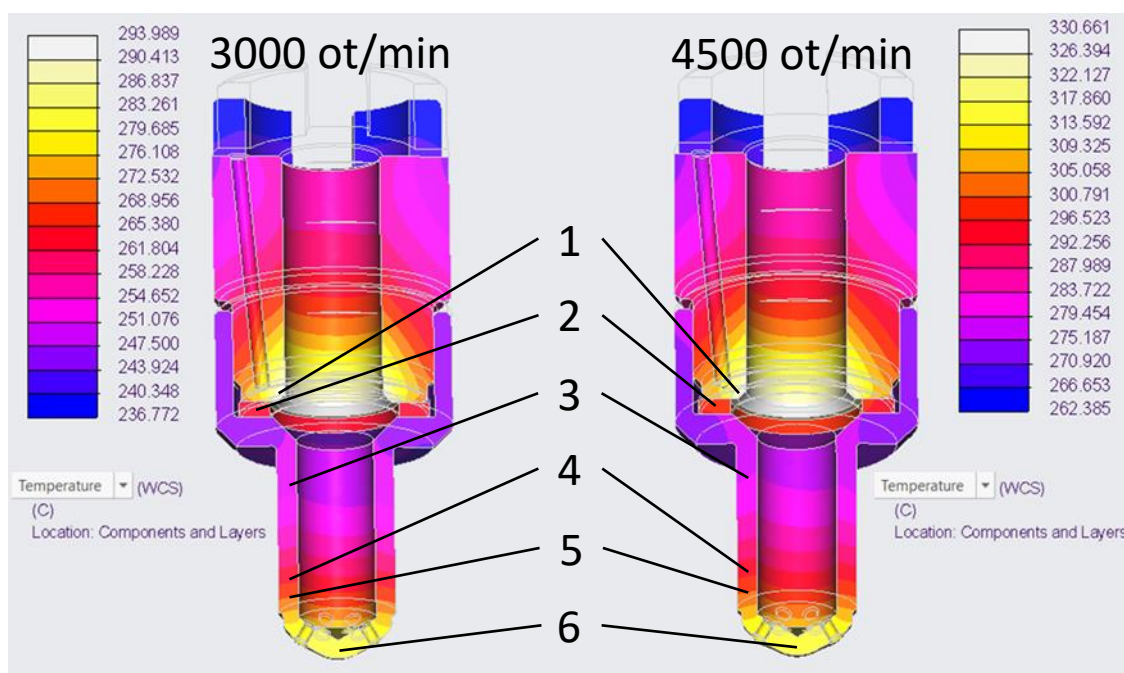


Teplota v místě 1	Teplota v místě 2	Naměřená teplota
$t = 295 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 302 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 12: Kontrola citlivostní analýzy pro zatížení motoru při 4500 ot/min

5.5 Výsledky tepelné analýzy

Po úspěšném výpočtu byly výsledky teplotní analýzy zobrazeny formou teplotního pole celé sestavy hlavy válce. Obrázek 14 zobrazuje rozložení teplot na tělese předkomůrky pro oba analyzované body měření, při použití měděné spodní části předkomůrky. Vlevo je zobrazeno teplotní pole pro zatížení motoru při 3000 ot/min, vpravo při 4500 ot/min. Jak je patrné z obrázku, průběhy teplot v obou případech mají stejný trend. V následné tabulce jsou vypsány některé významné teploty předkomůrky. Z obrázku i tabulky je zřejmé, že nejvyšších teplot je dosaženo v místě poblíž vývrtu pro snímač teploty. Dále jsou nejvyšší teploty na špičce předkomůrky, která spojuje oba spalovací prostory.



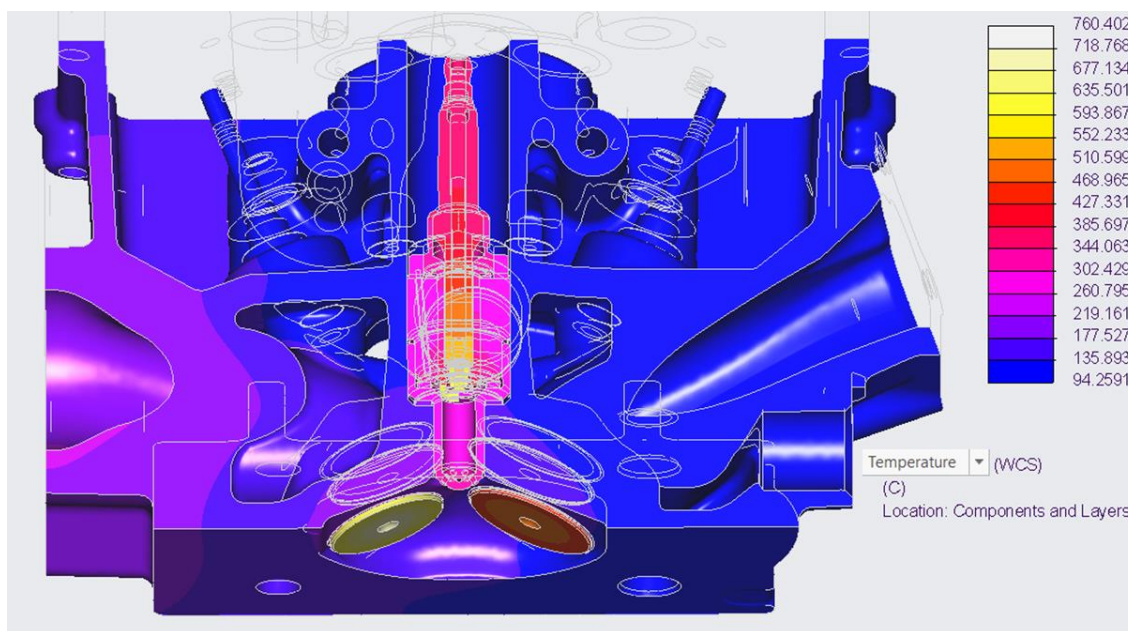
Obr. 14: Teplotní pole předkomůrky z PTC Creo 4.0

Pozice	Zatížení při 3000 ot/min	Zatížení při 4500 ot/min
1	$t = 290 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 327 \text{ }^{\circ}\text{C}$
2	$t = 265 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 297 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3	$t = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$
4	$t = 267 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 298 \text{ }^{\circ}\text{C}$
5	$t = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 303 \text{ }^{\circ}\text{C}$
6	$t = 283 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 317 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 13: Odečtené teploty ve vyznačených pozicích



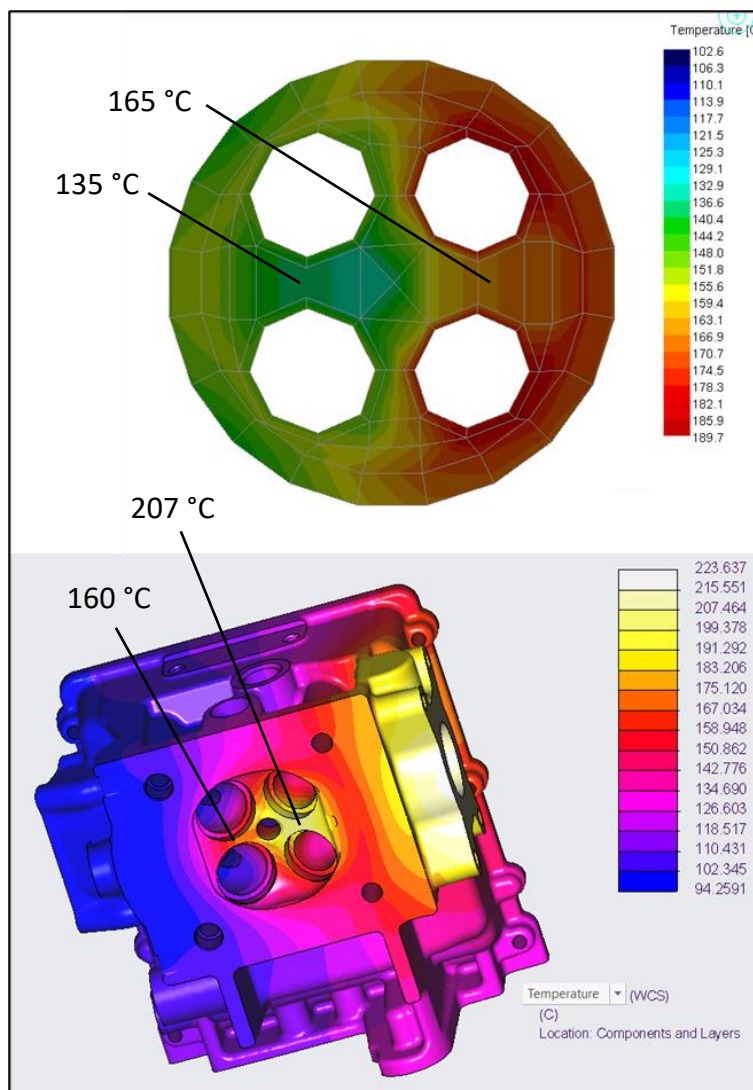
Na obrázku 15 je zobrazeno teplotní pole celé analyzované sestavy hlavy válce, při použití měděné spodní části předkomůrky a pro zatížení motoru při nejvyšších měřených otáčkách. Z obrázku je viditelné, že podle předpokladu je nejvíce přehřáté místo talířek výfukového ventilu, obě elektrody zapalovací svíčky a špička jejího izolátoru. Proto by zde mohlo dojít k riziku vzniku samozápalů, které mohou dále zapříčinit detonační spalování a následnou destrukci motoru.



Obr. 15: Teplotní pole sestavy hlavy válce při zatížení motoru při 4500 ot/min

Obrázek 16 zobrazuje teplotní pole hlavy válce a porovnává teploty mezi sedly sacích a výfukových ventilů námi vytvořené teplotní analýzy v PTC Creo 4.0 se zjednodušeným teplotním polem desky hlavy válce, vyobrazeným v programu GT-Power. Porovnání je provedeno pro analyzovaný bod při maximálně měřených otáčkách. Jak je z obrázku patrné, teplotní pole z GT-Poweru udává nižší hodnoty než námi vytvořená analýza. To může být způsobeno nepřesným přičtením přírůstku teploty od ostatních částí hlavy (např. výfukový kanál), protože model v GT-Poweru jsou kalibrovány pouze teplosměnné plochy, nikoli celkové objemy jednotlivých částí hlavy. Zároveň u tohoto modelu není podle předpokladu nejvyšší teplota na desce hlavy mezi sedly výfukových ventilů, kde se nejhůře odvádí teplo.

Teplotní pole sestavy hlavy válce i porovnání teplot mezi sedly ventilů pro druhé analyzované zatížení motoru je uvedeno v příloze 3 a 4.



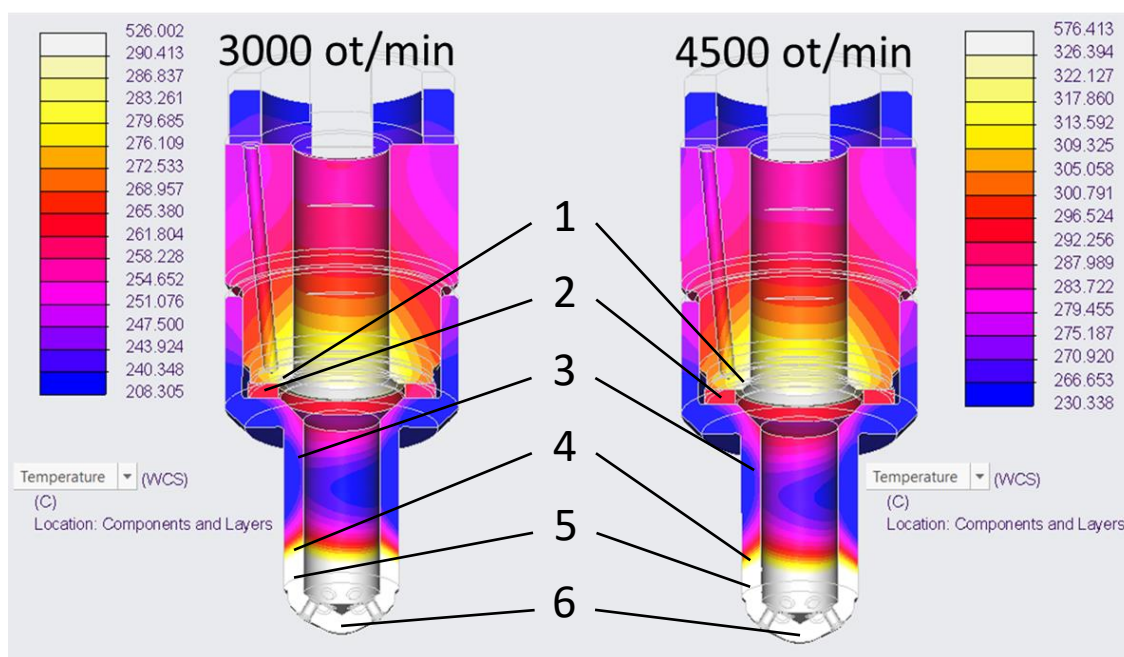
Obr. 16: Porovnání teplotních polí při zatížení motoru při 4500 ot/min

5.6 Vliv materiálu spodní části předkomůrky

Jak již bylo uvedeno, testována byla i spodní část předkomůrky z austenitické nerezové oceli 17 248. Abychom zjistili, jaký vliv má tato změna materiálu na průběh teploty předkomůrky, zadali jsme v programu PTC Creo materiálové vlastnosti spodní části předkomůrky podle materiálového listu této oceli. Výpočet byl proveden při stejných okrajových podmínkách a pro obě analyzované zatížení motoru. Projevené změny teplotního pole (obrázek 17) jsou tedy způsobené pouze odlišnými tepelnými vlastnostmi použité nerezové oceli. Z teplotních polí je patrné, že dochází k akumulaci teploty na špičce předkomůrky, čímž dochází k přehřívání samotné špičky. Protože při vyšším analyzovaném zatížení motoru teplota špičky předkomůrky přesahuje 570 °C a s přihlédnutím k tomu, že motor může být provozován při daleko vyšším zatížení, mohlo by zde dojít k riziku vzniku samozápalů, kterému bychom chtěli předejít. Naopak tam, kde je předkomůrka v kontaktu s hlavou válce, je teplota nižší než u verze se spodní částí ze slitiny mědi. V tabulce 14 jsou



porovnány teploty v jednotlivých odečítaných bodech pro obě verze spodní části předkomůrky. Z tabulky je patrné, že se teplota poblíž termočlánu při změně materiálu téměř neliší, termočlánek by tudíž pro obě verze při stejném zatížení motoru naměřil totožnou hodnotu. Z toho plyne závěr, že díky nižší tepelné vodivosti použité nerezové oceli oproti slitině mědi dochází k výrazně horšímu odvodu ze špičky předkomůrky. Zároveň nám tato skutečnost naznačuje, že nemůžeme posuzovat teplotu špičky předkomůrky vzhledem k naměřené teplotě na termočlánu.



Obr. 17: Teplotní pole předkomůrky se spodní částí z oceli 17 248

Pozice	Zatížení při 3000 ot/min		Zatížení při 4500 ot/min	
	Ocelová spodní část	Měděná spodní část	Ocelová spodní část	Měděná spodní část
1	t = 289 °C	t = 290 °C	t = 326 °C	t = 327 °C
2	t = 263 °C	t = 265 °C	t = 295 °C	t = 297 °C
3	t = 236 °C	t = 250 °C	t = 267 °C	t = 280 °C
4	t = 284 °C	t = 267 °C	t = 316 °C	t = 298 °C
5	t = 345 °C	t = 270 °C	t = 390 °C	t = 303 °C
6	t = 525 °C	t = 283 °C	t = 573 °C	t = 317 °C

Tab. 14: Porovnání teplot při použití ocelové a měděné spodní části předkomůrky



6 Kontrola teplotní analýzy

I když byl model pro získání okrajových podmínek v programu GT-Power kalibrován a kontrolován tepelnou bilancí, byla pro námi vytvořenou teplotní analýzu v programu PTC Creo vytvořena nová tepelná bilance hlavy válce. Tato tepelná bilance byla prováděna z výstupních hodnot simulace v programu PTC Creo a slouží pro celkové zhodnocení teplotní analýzy. Na rozdíl od bilance z výstupních hodnot z GT-Poweru, počítá tato bilance s reálnými objemy, geometriemi a hmotnostmi, čehož nelze kalibrací v GT-Poweru dosáhnout u všech analyzovaných dílů. V bilanci byly porovnány tepelné toky podílející se na ohřevu hlavy s toky, které hlavu ochlazují. V tabulce 15 jsou vypsány výsledky tepelné bilance pro obě zkoumané zatížení motoru, při použití měděné spodní části předkomůrky. Je zřejmé, že v obou případech dochází k mírnému ochlazení hlavy. Tato chyba, i když zanedbatelná, může být způsobena nepřesným odečítáním některých teplot, jejich zaokrouhlením, zaokrouhlením počítaného součinitele přestupu tepla chladícího média či nedostatečnou konvergencí celé úlohy. Jednotlivé přenosy teplot kondukcí byly získané přímo z výsledků simulace. Přenosy tepla pomocí konvekce musely být dopočítány pomocí Newtonova ochlazovacího zákona. Tepelné bilance byly počítány v programu Microsoft Excel a jejich detailnější verze jsou uvedeny v přílohách na CD včetně porovnání některých vypočtených a naměřených hodnot. Detailnější tabulka pro zatížení motoru při nejvyšších měřených otáčkách je uvedena v příloze 6.

Kontrola teplotní analýzy		
	Zatížení při 3000 ot/min	Zatížení při 4500 ot/min
OHŘEV	$\dot{Q} = 3843,31 \text{ W}$	$\dot{Q} = 4906,94 \text{ W}$
CHLAZENÍ	$\dot{Q} = 3970,97 \text{ W}$	$\dot{Q} = 4917,82 \text{ W}$
CELKOVÁ BILANCE	$\dot{Q} = -127,66 \text{ W}$	$\dot{Q} = -10,88 \text{ W}$
CELKOVÁ CHYBA	3,21 %	0,22 %

Tab. 15: Výsledky kontroly teplotní analýzy

7 Návrh umístění snímačů teploty

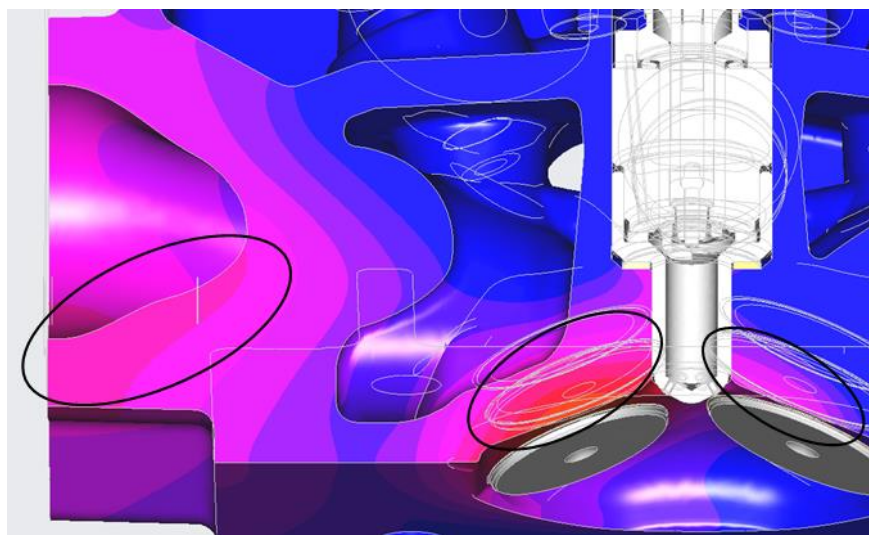
Pokud by v budoucnu byla vytvářena detailnější teplotní analýza této předkomůrky, nebo její vyplachované verze, ať už jako stacionární, či transienční úloha, bylo by vhodné umístit na zkušební motor více snímačů teploty, které by zlepšili validaci výsledků. Jako nejvhodnější by se jevil měřit teplotu špičky předkomůrky. Protože jsou ale stěny spodní části tenké, nebylo by použití kontaktního snímače teploty zcela vyhovující. Navíc umístění kontaktního snímače by bylo v našem případě konstrukčně složité. Proto by se zdálo jako přijatelnější použití optického snímače, jehož kalibrace pro dosažení dobrých výsledků by



byla samozřejmě také komplikovaná. Tato kalibrace by ovšem byla na rozdíl od použití kontaktního snímače realizovatelná. Aplikace optického snímače je tedy prozatím jediné možné řešení.

Dále by bylo vhodné zlepšit kontakt mezi již umístěním termočlánkem a předkomůrkou např. použitím termočlánku vhodného k napájení přímo k tělesu předkomůrky. Tím bychom potlačili vznik možné chyby vymodelovaného aktuálního termočlánku.

Pokud bychom chtěli provést validaci teploty hlavy válce a zpřesnit tím celou tepelnou analýzu, bylo by zapotřebí umístit snímače teploty na takové místo, kde se nejvýrazněji projevují změny teplot v závislosti na provozních podmínkách motoru. Tyto vytipovaná místa jsou vyznačena na obrázku 18.



Obr. 18: Návrh umístění snímačů teploty hlavy válce



8 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvoření teplotní analýzy předkomůrky bez systému vyplachování, namontované ve zkušebním motoru Škoda. Analýza byla prováděna v softwaru PTC Creo 4.0. Okrajové podmínky potřebné pro výpočet byly získány ze softwaru GT-Power, kde musel být pro dosažení dobrých výsledků model nejprve kalibrován podle naměřených dat. Analýza byla nejprve provedena pro sadu naměřených dat získaných pro zatížení motoru při 3000 ot/min. Následně byl proveden výpočet pro jinou sadu dat, konkrétně pro zatížení motoru při maximálních měřených otáčkách, pro vyloučení možných chyb vzniklých při měření. Převážná část vstupních dat byla získávána z vhodné literatury a naměřených dat. Největší neznámou vstupní hodnotou simulace byl součinitel přestupu tepla v závitovém spoji, pro který musela být nakonec vytvořena citlivostní analýza.

Jelikož byly pro spodní část předkomůrky testovány dva různé materiály, bylo provedeno porovnání vlivu změny materiálu této části předkomůrky na průběh teploty. Měděná spodní část předkomůrky se z výsledků zdá být vhodnější, protože lépe odvádí teplo ze své špičky a tím nedochází k jejímu nadměrnému přehřátí. Pro zatížení motoru při 4500 ot/min je špička měděné spodní části zahřátá na 317 °C. Změnou materiálu za nerezovou ocel 17 248 dojde k nárůstu teploty špičky předkomůrky o 256 °C. Protože při použití odlišného materiálu spodní části je její teplotní pole odlišné, došli jsme k závěru, že nemůžeme podle naměřené teploty na termočlánek, umístěném v horní části předkomůrky, posuzovat teplotu na spodní části a její špičce, protože jsou zde ještě prvky, které tuto teplotu ovlivňují.

Pro zlepšení odvodu tepla z předkomůrky do hlavy válce by bylo účelné použití kuželových dosedacích ploch na místo montážního závitu, který by musel být nově vytvořen na větším průměru spodní části.

Pro budoucí detailnější analýzu předkomůrky a zlepšení její validace, by bylo žádoucí umístit více snímačů teploty (kontaktních i bezkontaktních) na vhodná vtipovaná místa testovaného motoru. Již namontovaný termočlánek by dále bylo dobré nahradit takovým termočlánekem, který by byl vhodný k připájení přímo na těleso předkomůrky, čímž bychom zpřesnili validaci této úlohy.



Seznam použité literatury

- [1] SHAH, A. Improving the Efficiency of Gas Engines using Pre-chamber Ignition. Lund University, Sweden 2017. ISBN 978-91-7623-562-1
- [2] H. R. Ricardo, „Internal-combusiton engine“. US Patent 1,271,942, 1918.
- [3] Goossak Lev Abramovich. Method of prechamber-torch ignition in internal combustion engines. US Patent 3,230,939, 1966.
- [4] HYNEK, František. Učebnice pro autoškoly. 1. vydání, Praha: Naše vojsko, 1974.
- [5] MACEK, J. Spalovací motory. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012. 259s. ISBN: 978 - 80 - 01 - 05015 – 6
- [6] SYROVÁTKA, Z., VITEK, O., VAVRA, J., and TAKÁTS, M., “Scavenged Pre-Chamber Volume Effect on Gas Engine Performance and Emissions,” SAE Technical Paper 2019-01-0258, 2019, doi:10.4271/2019-01-0258.
- [7] VÁVRA, J., SYROVÁTKA, Z., TAKÁTS, M. and BARRIENTOS, E., “Scavenged Pre-Chamber on a Gas Engine for Light Duty Truck,” in ASME 2016 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference: V001T03A014, doi:10.1115/ICEF2016-9423.
- [8] HROMÁDKO, J., HROMÁDKO, J., HÖNIG, V., MILER, P., Spalovací motory. 1. vyd., Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [9] SYROVÁTKA, Zbyněk. Efektivní spalování alternativních paliv v pístovém spalovacím motoru [online]. Praha, 2020. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90858>. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.
- [10] HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J., Fundamentals of physics. 6th edition. New York, Wiley, 2001. ISBN 978-0471320005.
- [11] NOŽIČKA, J., Základy termomechaniky, ČVUT Praha, 2008
- [12] HEYWOOD, John B., Internal combustion engine fundamentals. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1-260-11610-6.
- [13] SATHISHKUMAR, S., KANNAN, M., & RAGURAMAN, V., Finite Element Analysis of IC Engine Piston Using Thermo Mechanical Approach, 2016. ISSN: 2394-9333.
- [14] GT-Power User’s Manual, GT-Suite v2020. Gamma Technologies Inc.
- [15] BLAHOŽ V., KADLEC Z.: Základy sdílení tepla. 2. vydání, Ostrava: Edice SPBI. 2000, ISBN: 80-902001-1-7.



- [16] MACEK J., POLÁŠEK M., ŠPANIEL M., TICHÁNEK R. Výpočet oběhu motorů 6C28 a stanovení okrajových podmínek pro pevnostní a deformační výpočet hlavy válce. Výpočet teplotního pole, deformace a stavu napjatosti hlavy válce. Praha. ČVUT v Praze, Fakulta strojní 2004. Technická zpráva pro ČKD Motory a.s.
- [17] BLAHOŽ V., KADLEC Z.: Základy sdílení tepla. 2. vydání, Ostrava: Edice SPBI. 2000, ISBN: 80-902001-1-7.
- [18] ŠESTÁK, J., BUKOVSKÝ, J., HOUŠKA, M. Tepelné pochody. Transportní a termodynamická data, Vydavatelství ČVUT, Praha 1986.



Seznam obrázků

Obr. 1: Design předkomůrky podle Harry Ricarda [2]	11
Obr. 2: Schéma spalovacího systému LAG [3]	12
Obr. 3: Prototyp vyplachované předkomůrky a jeho umístění v motoru [7].....	13
Obr. 4: Typické teploty pro zážehový motor v ustáleném stavu [13]	16
Obr. 5: Hlavní části modelu v programu GT-Power.....	19
Obr. 6: Umístění předkomůrky v hlavě válce	19
Obr. 7: Schéma tepelných toků působících na předkomůrku	20
Obr. 8: Pozice kontaktních ploch.....	22
Obr. 9: Pozice okrajových podmínek 1	23
Obr. 10: Pozice okrajových podmínek 2	23
Obr. 11: Umístění termočlánku	25
Obr. 12: Pozice odečítání teplot	26
Obr. 13: Graf citlivostní analýzy.....	27
Obr. 14: Teplotní pole předkomůrky z PTC Creo 4.0.....	28
Obr. 15: Teplotní pole sestavy hlavy válce při zatížení motoru při 4500 ot/min	29
Obr. 16: Porovnání teplotních polí při zatížení motoru při 4500 ot/min	30
Obr. 17: Teplotní pole předkomůrky se spodní částí z oceli 17 248	31
Obr. 18: Návrh umístění snímačů teploty hlavy válce.....	33



Seznam tabulek

Tab. 1: Tepelná bilance modelu v GT-Poweru.....	18
Tab. 2: Materiálové vlastnosti jednotlivých komponent sestavy.....	21
Tab. 3: Materiálové vlastnosti sestavy zapalovací svíčky	21
Tab. 4: Součinitelé přestupu tepla v kontaktech.....	22
Tab. 5: Pozice okrajových podmínek	23
Tab. 6: Parametry analyzovaných zatížení motoru	24
Tab. 7: Získané okrajové podmínky	24
Tab. 8: Maximální velikosti základních prvků sestavy	25
Tab. 9: Použité materiálové vlastnosti termočlánku.....	26
Tab. 10: Použité hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktních plochách.....	26
Tab. 11: Citlivostní analýza	27
Tab. 12: Kontrola citlivostní analýzy pro zatížení motoru při 4500 ot/min	28
Tab. 13: Odečtené teploty ve vyznačených pozicích.....	28
Tab. 14: Porovnání teplot při použití ocelové a měděné spodní části předkomůrky	31
Tab. 15: Výsledky kontroly teplotní analýzy	32



Seznam příloh

Příloha 1: Materiálový list slitiny mědi CUCr1Zr

Příloha 2: Materiálový list oceli 17 248

Příloha 3: Teplotní pole sestavy hlavy válce při zatížení motoru při 3000 ot/min

Příloha 4: Porovnání teplotních polí při zatížení motoru při 3000 ot/min

Příloha 5: Celkové porovnání vlivu materiálu na teplotu spodní části předkomůrky

Příloha 6: Kontrolní tepelná bilance z výstupu programu PTC Creo

Seznam příloh na CD

Příloha 1: Tepelná bilance modelu v programu GT-Power

Název souboru: Tepelna_bilance_GT-Power.xlsx

Příloha 2: Kontrolní tepelná bilance z výstupu programu PTC Creo

Název souboru: Tepelna_bilance_Creo.xlsx

Příloha 3: Naměřená data pro zatížení motoru při 3000 ot/min

Název souboru: Data_PCCU_bod648.xlsx

Příloha 4: Naměřená data pro zatížení motoru při 4500 ot/min

Název souboru: Data_PCCU_bod653.xlsx

Příloha 5: Nastavený model v programu GT-Power pro zatížení motoru při 4500 ot/min

Název souboru: SKODA_SCRE_PC_PASSIVE_bod653.gtm

Příloha 6: Nastavený model v PTC Creo pro zatížení motoru při 4500 ot/min

Název složky: predkomurka_CU_bod653



Příloha 1: Materiálový list slitiny mědi CUCr1Zr

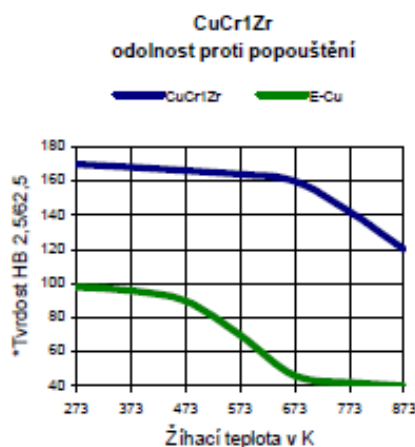
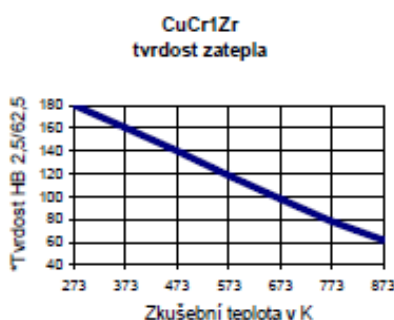
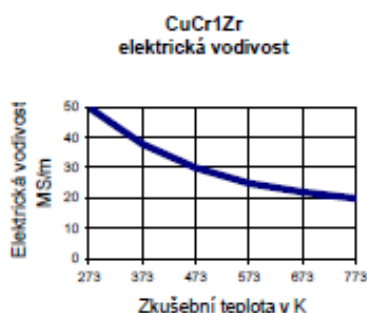
CuCr1Zr Datový list

Zkrácené označení	CW106C	Chemické složení (údaje v %)	Cr 0,8	Zr 0,08	Cu zbytek	
Zkrácené pojmenování Číslo materiálu	CuCr1Zr 2.1293					
Klasifikace	DIN ISO 5782 R.W.M.A.	Třída A 2/2 Třída 2				
Vlastnosti materiálu	Tepelně vytvrzená slitina mědi s vysokou tvrdostí a pevností při vysoké elektrické vodivosti					
Pokyny k použití	<ul style="list-style-type: none">• Elektrody pro odporové svařování a elektroerozivní vyjiskřování• Vodicí trysky s drátem pro svařování v ochranném plynu• Součásti elektrických přístrojů a zařízení, které jsou při požadované dobré vodivosti vystaveny vysokému mechanickému zatížení					
Mechanické vlastnosti	Stav		po popouštěcím žihání taženo a vytvrzeno		lisováno, po popouštěcím žihání vytvřeno	Odlitek
	Průřez		do 25 mm Ø	25-50 mm Ø	50-120 mm Ø	-
	Tvrdost	HB 10/2,5	160	150	130	100-115
	Pevnost v tahu	N/mm ²	min. 470	min. 440	min. 370	min. 320
	Mez kluzu	N/mm ²	min. 440	min. 350	min. 270	min. 195
	Tažnost L=5D	%	min. 8	min. 10	min. 18	min. 18
	Modul pružnosti	kN/mm ²	108	108	108	103
	Modul torze	kN/mm ²	45	45	45	-
	Mez stlačitelnosti	%	95 – 100% meze kluzu			
Fyzikální vlastnosti	Elektrická vodivost 293 K (20 °C)	MS/m	43-50 Odlitek 45-53 (min. 75% I.A.C.S.)			
	Elektrický odpor 293 K (20 °C)	Ωmm ² m ⁻¹	0,021			
	Teplotní koeficient elektrického odporu 273-573 K (0- 300 °C)	K ⁻¹	0,00367			
	Teplotní koeficient termické roztažnosti 273-573 K (0- 320 °C)	K ⁻¹	17,0. 10 ⁻⁶			
	Měrné teplo	Jg ⁻¹ K ⁻¹	0,376			
	Tepelná vodivost 293 K (20 °C)	Wm ⁻¹ K ⁻¹	ca. 320			
	Hustota	gcm ⁻³	8,9			
Dodávaná provedení	Kulaté, čtverhranné, šestihenné a ploché tyče, speciální profily, kotouče, prstence, plechy, tvarové kusy, trubky, výkovky, elektrody pro bodové, švové, bradavkové svařování a svařování natupo, odlitky až do váhy 300 kg					



CuCr1Zr

Datový list



*Tvrdost podle Brinella při teplotě místnosti po pětihodinovém žhání; ochlazení vzduchem

Pokyny k opracování stav: vytvrzeno

Soustružení	tvrdokov K20	rychlořezná ocel THYRAPID 3207
Řezná rychlost	do 300 m/min	do 120
Úhel čela nože	6 – 18	15 – 25
Posuv a velikost třísky	podle požadované kvality povrchu	podle požadované kvality povrchu
Lamač třísek	doporučuje se	doporučuje se

Frézování	tvrdokov K20	rychlořezná ocel THYRAPID 3207
Řezná rychlost	do 300 m/min	do 100
Úhel čela	pozitivní	pozitivní
Posuv	200 - 300	80 – 150

Vrtání	vrták podle DIN 338
Řezná rychlost	max. 20
Odvod třísek	z důvodu lepšího odvodu třísek je výhodné použít vrták s větším úhlem šroubovice

Pevnostní vlastnosti	pevnostní vlastnosti jsou odvislé od průřezu a tvaru průřezu
----------------------	--

Normy / tolerance	
DIN EN 12 163	kulaté tyče pro všeobecné použití
DIN EN 12 165	materiál pro výkovky
DIN EN 12 167	profily a hranaté tyče pro všeobecné použití

Plechý a desky válcované za tepla	
Tloušťková tolerance do 50 mm	-0 / +2 mm
nad 50 mm	-0 / +3 mm
Šířková tolerance	+8 / -0 mm

Plechý / ploché tyče kované	
Přídavky a tolerance	podle přání

Trubky	
Tolerance	podle přání

Údaje týkající se vlastností nebo použití materiálu nebo výrobků slouží k popisu. Potvrzení vlastností nebo určitého účelu použití je třeba písemnou formou.



Příloha 2: Materiálový list oceli 17 248

ČSN 41 7248		Korozivzdorná austenitická ocel						OCEL	
STN 41 7248								17 248	
Chemické složení [hm. %]									
C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P	S		
max 0,10	max 2,0	max 1,0	17,0–19,0	9,5–12,0	min 5× %C	max 0,045	max 0,030		
Polotovary									
[1] tyče				[4] trubky bezešvé					
[2] plechy				[5] tlusté plechy					
[3] tyče broušené									
Mechanické vlastnosti									
Polotovary	[1]			[2]					
Rozměr t, d [mm]	do 60	60–100	100–150	do 10	10–30				
Stav	.4			.4					
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min	205	205	195	205					
Mez pevnosti R_m [MPa]	500–750			500–750					
Tažnost A_5 [%] min	40	35		30	26				
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min	podél 120		podél 120 napříč 80	–	podél 120 napříč 80				
Polotovary	[3]		[4]			[5]			
Rozměr t, d [mm]	do 50		dle rozměrové normy			30–80			
Stav	.4		.4			.4			
Mez kluzu R_b [MPa] min	205		205			205			
Mez pevnosti R_m [MPa]	500–750		500–750			500–750			
Tažnost A_5 [%] min	40		35			napříč 34			
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min	podél 120		–			podél 90 napříč 70			
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C		
	200	194	186	179	172	165	–		
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min za zvýšených teplot	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	
Polotovary [1] d do 100 mm	190	176	165	155	145	136	130	125	
Polotovary [1] d nad 100 mm	180	169	159	150	142	–	–	–	
Fyzikální vlastnosti									
Hustota ρ [kg . m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]	Teplotní součinitel rotažnosti α [K ⁻¹]			Tepelná vodivost λ_t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]		Rezistivita ρ [Ω . m]		
7 900	500	16.10 ⁻⁶			15		730.10 ⁻⁹		



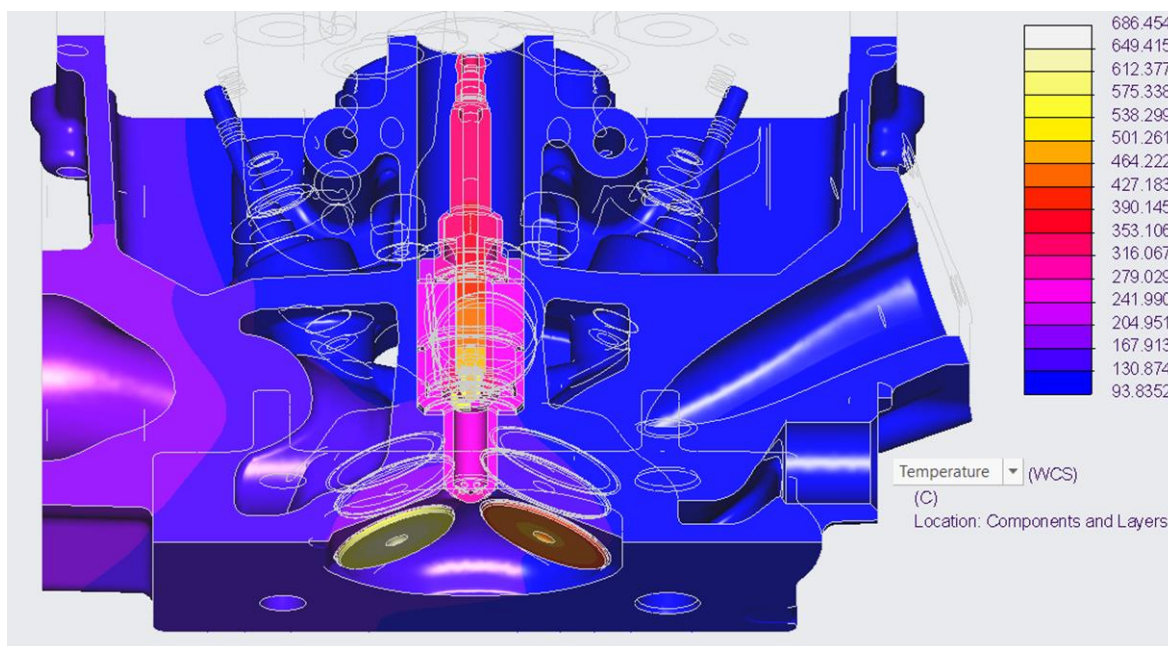
Odolnost proti degradačním procesům							
ODOLNOST PROTI KOROZI odolnost proti plošné korozi - ocel odolává kys. dusičné (kromě koncentrované za varu), slabým roztokům anorganických kyselin a silným organickým kyselinám odolnost proti mezikrytalové korozi - zaručená podle ČSN 03 8169, ocel odolává při dlouhodobé expozici v agresivních prostředích v celém rozsahu kritických teplot							
ODOLNOST PROTI OXIDACI na vzduchu do 850 °C v oxidačním sirmém prostředí (obsahujícím SO ₂) do 750 °C v redukčním sirmém prostředí (obsahujícím H ₂ S) do 600 °C v páře do 750 °C ve směsných plynech do 550 °C							
ODOLNOST PROTI TEČENÍ Mez pevnosti při tečení v tahu R _{mT} [MPa] (střední hodnoty)							
Teplota [°C]	580	600	620	640	660	680	700
R _{mT} /10 ⁴	170	142	120	101	82	65	48
R _{mT} /3 . 10 ⁴	141	118	98	79	61	46	34
R _{mT} /5 . 10 ⁴	127	107	87	69	52	37	27
R _{mT} /10 ⁵	112	92	74	55	40	31	23
R _{mT} /1,5 . 10 ⁵	102	83	64	47	35	–	–
R _{mT} /2 . 10 ⁵	96	76	58	43	32	–	–
R _{mT} /2,5 . 10 ⁵	92	72	54	40	29	–	–
Technologické údaje							
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ rozpuštěcí žhání 1 020–1 080 °C ochlazovat podle tloušťky na vzduchu nebo ve vodě							
TVAŘITELNOST teploty tváření 1 150–850°C ochlazovat na vzduchu							
SVAŘITELNOST dle ČSN 05 1310 zaručená doporučené přídatné materiály - elektroda E-B 420							
OBROBITELNOST soustružení, hoblování frézování, vrtání R _m max = 740 MPa 8b 8b							
TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY zkouška smáčknutím - bezešvé trubky při úplném smáčknutí nevykazují poškození							
Použití							
Ocel je vhodná pro stavbu chemických zařízení včetně tlakových nádob v prostředí oxidační povahy. Pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a normálních teplotách. Vhodná též pro provozy vyžadující vysokou čistotu produktů (farmaceutický a potravinářský průmysl).							
Ostatní vlastnosti							
Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010			Třída odpadu podle ČSN 42 0030			
elektroocel	červená–hnědá–černá			028			



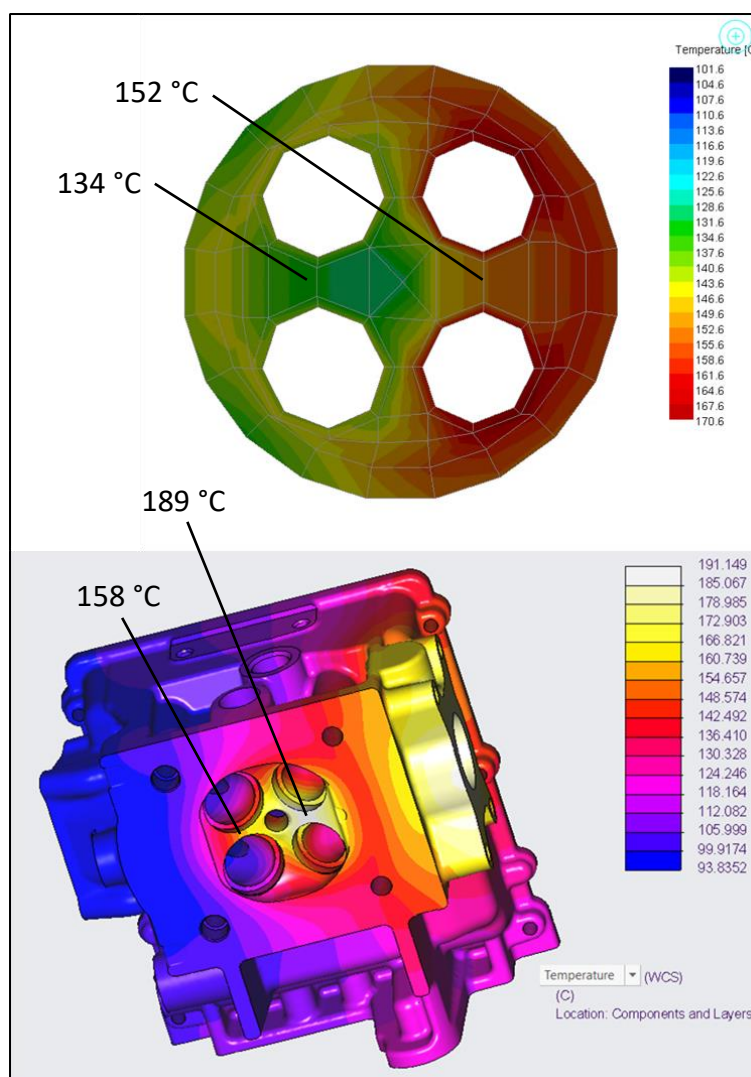
Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Německo	
Type15	ISO 683/13-86	X6CrNiTi18-10	EN 10088/1-3-95	X6CrNiTi1810 X6CrNiTi1810 X6CrNiTi1810 X6CrNiTi1810 X6CrNiTi18-10	DIN 17456-85 DIN 17455-85 DIN 17441-85 DIN 17440-85 DINEN10088/1-3-95
Francie		Velká Británie		Rusko	
Z6CNT18-10 X6CrNiTi18-10	NF A36-209-91 NF EN10088/1-3-95	321S31 321S51 X6CrNiTi18-10	BS 1501/3-90 BS 1501/3-90 BS EN 10088/1-3-95	08Ch18N 10T 12Ch18N10T	GOST 24030 GOST 5632-72
USA		Japonsko		Kanada	
Type321	ASTM A240	SUS321 SUS321TKA	JIS G4303-91 JIS G3446-91	-	-
Itálie		Rakousko		Švédsko	
X6CrNiTi1811 X6CrNiTi1811KW X6CrNiTi1811 X6CrNiTi1811KT X6CrNiTi1811KG	UNI 7500-75 UNI 7660-77 UNI EN 10088/1-3-95 UNI 7660-77 UNI 7660-77	X6CrNiTi18-10	ÖNORM M3121-91	2337	SS 142337
Polsko		Maďarsko		Norsko	
0H18N10T	PN H86020-71	H5Ti K036Ti K037Ti	MSZ 4359-82 MSZ 4360-87 MSZ 4360-87	14350 14355	NS 14350 NS 14355
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
-	-	-	-	X6CrNiTi18-10 X6CrNiTi18-10	UNE 36-016/1-89 UNEEN10088/1-3-95
Austrálie		Čína		Rumunsko	
321	AS 1449-94	0Cr18Ni10Ti	GB 1220-92	10TiNiCr180	STAS 3583-87
Bulharsko		Brazílie		-	
0Ch18N10T	BDS 6738-72	E 321	Br 400	-	-



Příloha 3: Teplotní pole sestavy hlavy válce pro zatížení motoru při 3000 ot/min

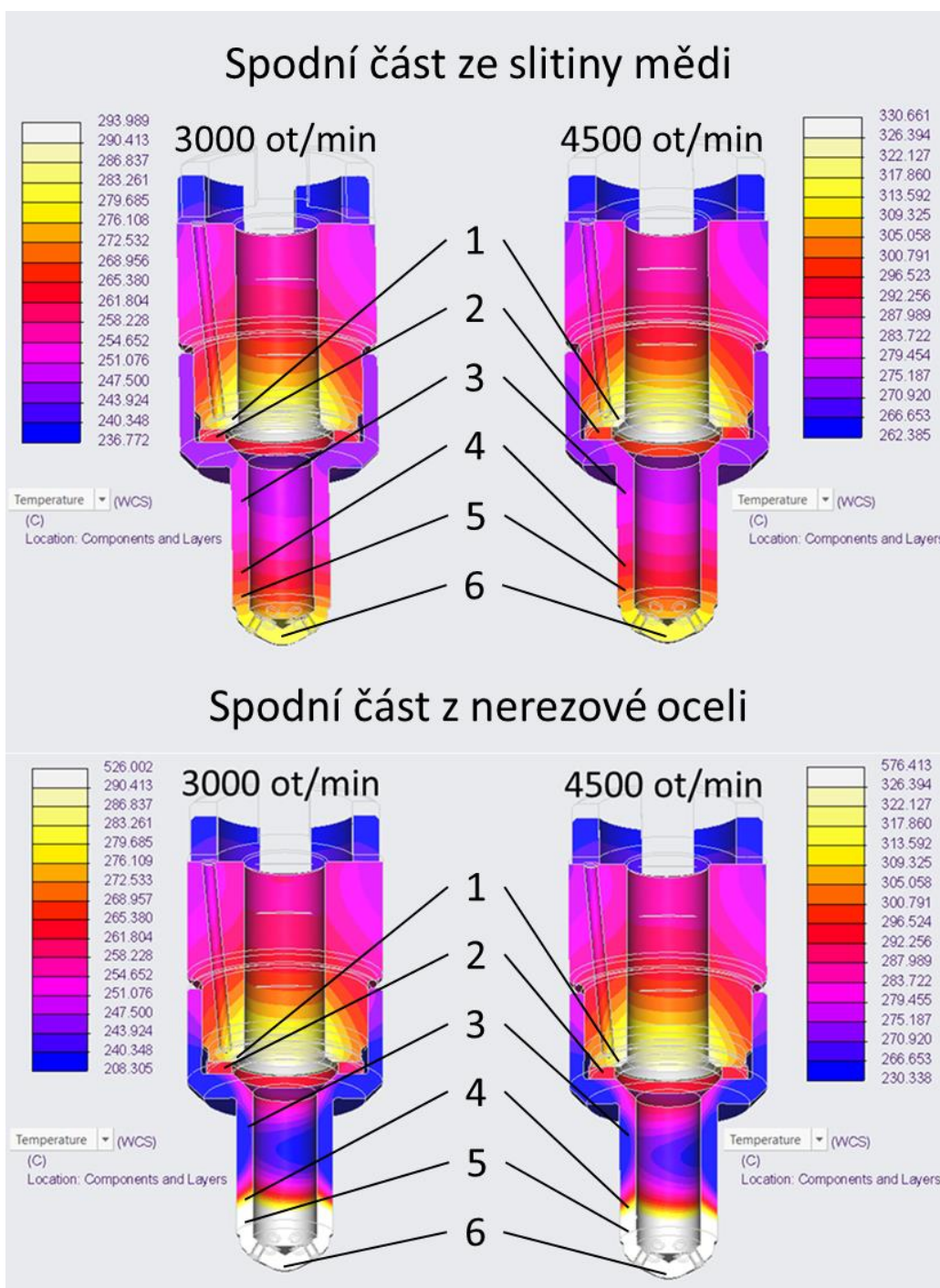


Příloha 4: Porovnání teplotních polí pro zatížení motoru při 3000 ot/min





Příloha 5: Celkové porovnání vlivu materiálu na teplotu spodní části předkomůrky



Pozice	Zatížení při 3000 ot/min		Zatížení při 4500 ot/min	
	Ocelová spodní část	Měděná spodní část	Ocelová spodní část	Měděná spodní část
1	t = 289 °C	t = 290 °C	t = 326 °C	t = 327 °C
2	t = 263 °C	t = 265 °C	t = 295 °C	t = 297 °C
3	t = 236 °C	t = 250 °C	t = 267 °C	t = 280 °C
4	t = 284 °C	t = 267 °C	t = 316 °C	t = 298 °C
5	t = 345 °C	t = 270 °C	t = 390 °C	t = 303 °C
6	t = 525 °C	t = 283 °C	t = 573 °C	t = 317 °C



Příloha 6: Kontrolní tepelná bilance z výstupu programu PTC Creo

- pro zatížení motoru při 4500 ot/min

TEPELNÝ TOK DO HLAVY	
Tepelný tok	Q [W]
Horké plyny ve válci → hlava	897,36
Plyny ve výfukovém potrubí → výfukový kanál	3027,78
Sedla sacích ventilů → hlava	233
Sedla výfukových ventilů → hlava	445,8
Předkomůrka → hlava	199,6
Vodítka sacích ventilů → hlava	3
Vodítka výfukových ventilů → hlava	100,4
TEPELNÝ TOK DO HLAVY	4906,94
TEPELNÝ TOK Z HLAVY	
Tepelný tok	Q [W]
Sací kanál → směs paliva v sacím potrubí	148,87
Hlava → vzduch s olejem pod víkem hlavy	50,4
Hlava → okolí	22,05
Hlava → chladící kapalina	4696,5
TEPELNÝ TOK Z HLAVY	4917,82
CELKOVÁ BILANCE	Q̇ = -10,88 W