

SOLUTION OF TEMPERATURE AND STRESS FIELDS FOR COMBUSTOR FLAME TUBE

S.Veselý*

Summary: *The flame tube separating the air stream area from the area, in which the combustion takes place, is a very important part of the combustor design. The flame tube separates the air along the combustion space while on its border an air loss Δp_L develops, which corresponds to the velocity of air streams from the flame tube edge to the combustion and mixing space. The flame tube is exposed to radiating heat flow from the flame to the flame tube wall and this flow can achieve the values $E = 300 - 500 \text{ kWm}^{-2}$. A method of heat exchange between the flame and the flame tube wall was elaborated and some results are shown in [1]. With regard to the high radiating heat flows from the flame to the flame tube, it is inevitable to cool down the flame tube walls. One of the methods is film cooling, during which a strong axial non-uniformity of the temperature field of the wall material develops. The paper analyses one design variant of film cooling of the flame tube wall and its impact on the formation of temperature stresses.*

Použitá označení:

C_S	- výstupní rychlost	t_S	- teplota stěny
C_2	- rychlost vzduchu	t_m	- teplota na hranici mezní vrstvy
C_3	- rychlost spalin	N	- počet cyklů
D	- vzdálenost	p_2	- tlak vzduchu
d	- průměr otvoru	p	- rozteč otvorů
E	- měrný sálavý tok	Δp_L	- tlakový spád ve stěně
f_{stech}	- stechiometrický palivový poměr	q_{SAL1}	- sálání z plamene na plamenec
H_u	- výhřevnost	q_{SAL2}	- sálání s plamence na plášť
I	- vzdálenost	q_{SAL5}	- sálání z izolace do okolí
L	- vzdálenost	Q_K	- konvekce
L_K	- vzdálenost	Q_{V5}	- vedení
$\dot{m}_2$	- hmotnostní průtok vzduchu	r	- poloměr
$\dot{m}_{CH}$	- hmotnostní průtok chladicího vzduchu	T_0	- teplota okolí
t_2	- teplota vzduchu	T_2	- teplota vzduchu
t_3	- teplota spalin	T_3	- teplota spalin
t_{EF}	- efektivní teplota sálající vrstvy		

* Doc.Ing.Stanislav Veselý,CSc., EKOL spol. s r.o., Křenová 65, 60200 Brno, tel.:+420 543531702, fax.: +420 543242912, e-mail:ekolsro@ekolbrno.cz

Řecké symboly: α_{1K} - součinitel přestupu tepla konvekci na vnitřní straně plamence α_{2K} - součinitel přestupu tepla konvekci na vnější straně plamence α_{3K} - součinitel přestupu tepla konvekci na vnější straně pláště α_{5K} - součinitel přestupu tepla konvekci na izolaci $\varepsilon_1, \varepsilon_{ef}, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_5$ - sálavost plamene, plamence uvnitř, plamence vně, pláště, izolace σ_0 - Stefan Boltzmannova konstanta $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4$ - součinitel tepelné vodivosti plamence, pláště, izolace η_s - účinnost spalování σ_H / σ_C - hmotové podíly vodíku a uhlíku v palivu δ_{CH} - chladicí poměr**1. 0 Axiální nerovnoměrnost teplot v plamenci**

Při chlazení stěn plamence závojem chladicího vzduchu vzniká na každém chlazeném kroužku axiální nerovnoměrnost teploty vnitřního i vnějšího povrchu plamence. Přitom rozdíl teplot na počátku a konci kroužku může činit až 400°C. Tato axiální nerovnoměrnost může způsobit takové teplotní napětí, která mohou být pro danou konstrukci nebezpečná z hlediska nízkocyklové únavy nebo mohou způsobit tvarovou nestabilitu.

Na obr.1 je znázorněn plamenec spalovací komory, který má celkem 8 chlazených segmentů. Každý segment má délku $x_i = 50$ mm a celková délka plamence je tedy 400 mm. Na obr. 1 je rovněž znázorněn vypočtený průběh teploty spalin t_{3i} , efektivní teploty t_{EF} , součinitele přebytku vzduchu α a sálavosti plamene ε_1 a účinnosti spalování η_s . Efektivní teplota t_{EF} charakterizuje sálavé vlastnosti vrstvy plamene. Výpočet se provádí zonální metodou uvedenou ve [2]. Z obr.1 je zřejmé, že nejvyšší teplota spalin t_{3i} je v prostoru 5. kroužku, který bude rovněž nejvíce zatížen sálavým tokem

1.1 Konvektivní přestup tepla na vnitřní straně plamence

Vnitřní strana plamence je chlazena závojem chladicího vzduchu, který se přivádí do každého segmentu soustavou otvorů. Otvory mají průměr d . Ostatní geometrické parametry kovaného kroužku jsou na obrázku 2. Geometrie je definována těmito rozměry:

$$d = 0,8 \text{ mm}$$

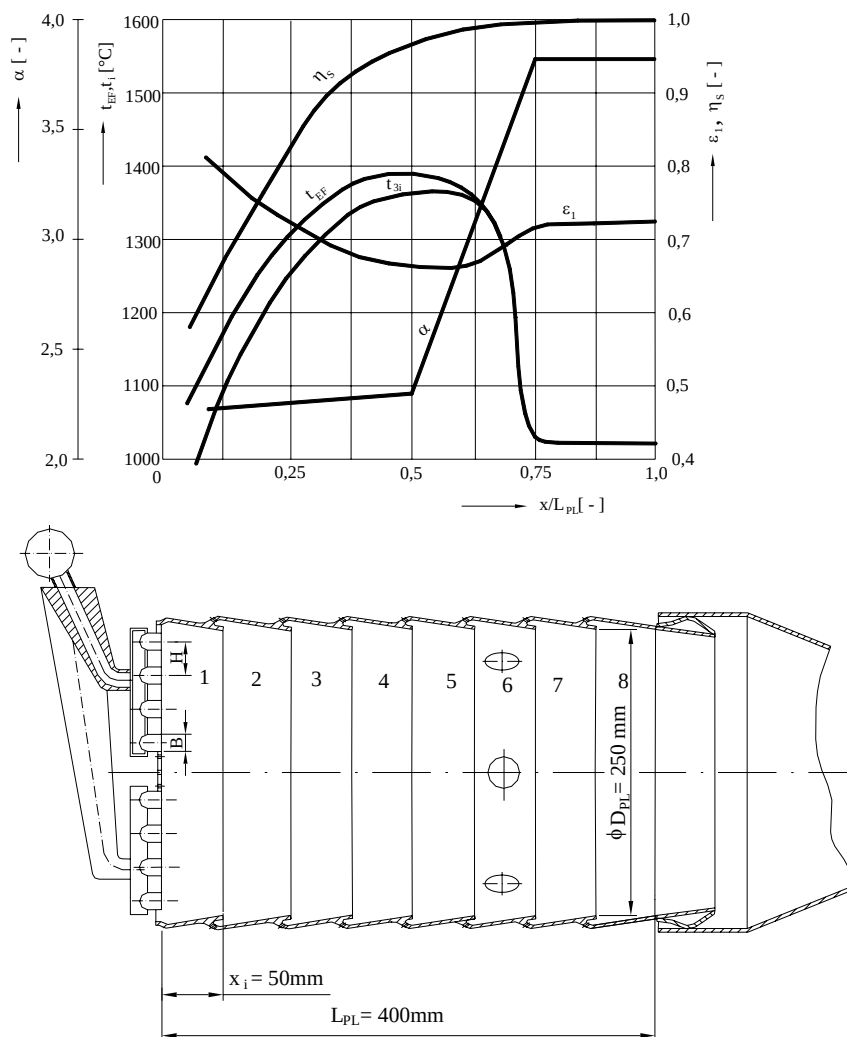
$$p = 1,6 \text{ mm}$$

$$L_K = 6 \text{ mm}$$

$$I = 3,5 \text{ mm}$$

$$s = 1,4 \text{ mm}$$

$$D = 3,5 \text{ mm}$$

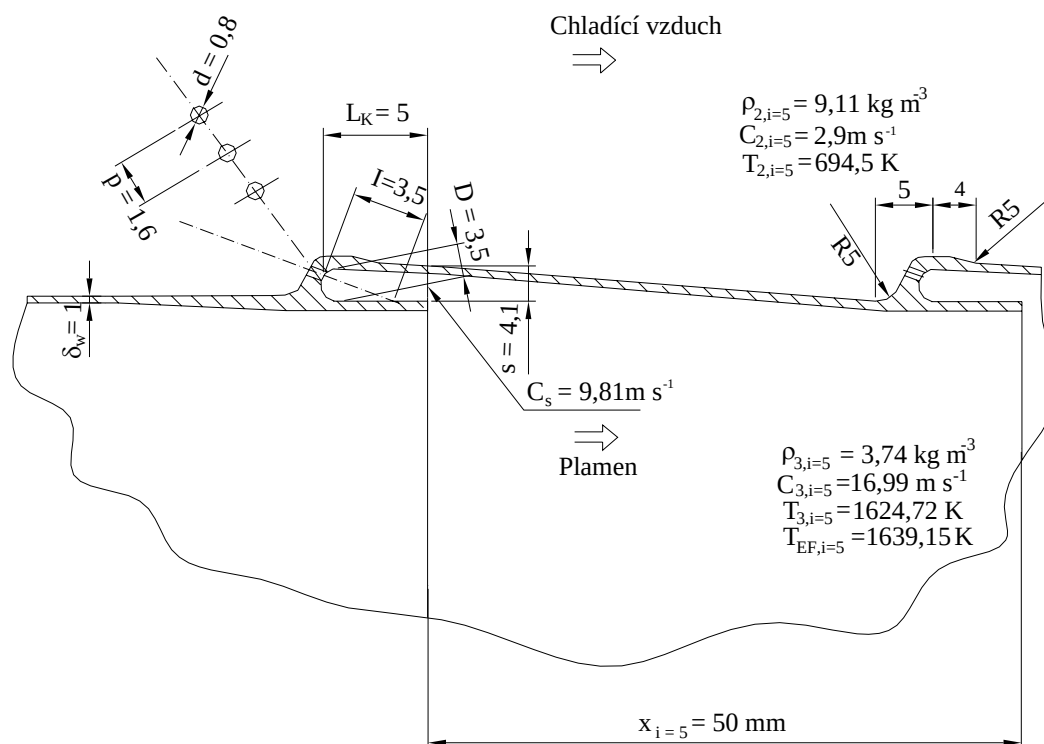


obr.1: Průběh efektivní teploty plamene t_{EF} , adiabatické teploty t_{3i} , účinnosti spalování η_s a sálavosti plamene ϵ_1 podél spalovací zóny ve spalovací komoře s následujícími parametry:
 $p_2 = 1,814 \text{ MPa}$; $t_2 = 421,3^\circ\text{C}$; $f_{stech} = 0,08768$; $\sigma_H / \sigma_C = 0,3339$; $H_u = 49172 \text{ kJkg}^{-1}$; palivo – zemní plyn .

Geometrický parametr je definovaný podle rovnice

$$M = \frac{psI}{dDL_K} = 0,467 \quad (1)$$

Hodnota parametru $M = 0,467$ znamená, že podle [2] je geometrie chladicího systému zvolena správně.



obr.2: Geometrie kovaného kroužku chlazeného závojem chladicího vzduchu. Geometrický parametr $M = \frac{psI}{dDL_K} = 0,467$. Parametry pro kroužek č.5; $i = 5$

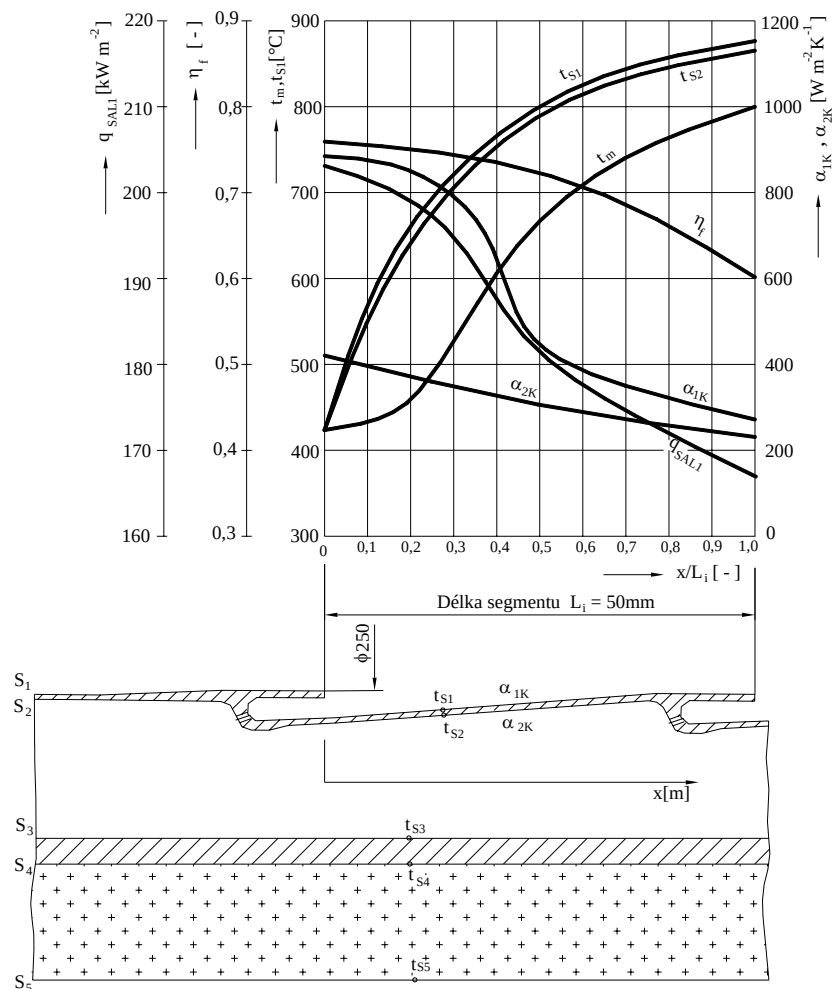
Všechny délkové rozměry jsou v mm.

Pro geometrické, termodynamické a aerodynamické parametry v 5té zóně, kde je umístěn 5tý segment plamence podle obrázku 2 můžeme vypočítat zvláštním programem součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně plamence α_{1K} podél chlazeného povrchu a rovněž teplotu na hranici mezní vrstvy mezi chladicím závojem a přechodovou mezní vrstvou T_m podél chlazeného povrchu.

Výsledky výpočtu součinitele přestupu tepla konvekcí α_{1K} na vnitřní straně 5. kroužku a teploty na hranici mezní vrstvy u 5. kroužku jsou na obrázku 3. Je zřejmé, že maximální hodnota součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně kroužku je v potenciálním úseku na začátku kroužku, kde je $\alpha_{1K} = 879 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kdežto na konci kroužku klesne na $\alpha_{1K} = 278 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

1.2 Konvektivní přestup tepla na vnější straně plamence

Vnější strana plamence je tvořena mezikruhovým kanálem, kterým proudí chladicí vzduch. U souprouté spalovací komory je hmotnostní průtok vzduchu postupně dávkován do jednotlivých chladicích segmentů, takže střední rychlost vzduchu v mezikruží postupně klesá. To nemusí být na závadu, poněvadž je-li součástí spalovací komory směšovač, hmotnostní průtok vzduchu do směšovače postačí pro vychlazení plamence z vnější strany.



obr.3: Závoje chlazení kovaného kroužku. Výpočet charakteristických veličin po délce 5.kroužku

- t_m - teplota na hranici chladicí mezní vrstvy $[^{\circ}\text{C}]$
 t_{s1} - teplota vnitřního povrchu stěny kroužku $[^{\circ}\text{C}]$
 η_f - účinnost chladicího filmu $[-]$
 α_{1K} - součinitel přestupu tepla konvekce na vnitřní straně kroužku $[\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}]$
 α_{2K} - součinitel přestupu tepla konvekce na vnější straně kroužku $[\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}]$
 q_{SAL1} - měrný tepelný tok zářením z plamene na stěnu kroužku $[\text{kW m}^{-2}]$

Získané výsledky jsou na obrázku 3. Je zřejmé, že rovněž na vnější straně plamence je součinitel přestupu tepla maximální na počátku kroužku, kde má hodnotu $\alpha_{2K} = 414 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ a na konci segmentu $\alpha_{2K} = 238 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Příčiny jsou v narůstání tloušťky mezní vrstvy u stěny.

1.3 Výpočet teplot stěn plamence, pláště a izolace

V zóně 5, o šířce segmentu č.5, což je 50mm, jsme vypočetli veškeré veličiny, které určují tepelné toky radiací, konvekce a kondukce.

Stěna S1:

$$\sigma_o \varepsilon_1 \varepsilon_{ef} (T_{EF}^4 - T_{S1}^4) + \alpha_{1K} (T_m - T_{S1}) = \frac{\lambda_1 (T_{S1} - T_{S2})}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

Stěna S2:

$$\frac{\sigma_o (T_{S2}^4 - T_{S3}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{r_2}{r_3} \right)} + \alpha_{2K} (T_{S2} - T_2) = \frac{\lambda_1 (T_{S1} - T_{S2})}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3)$$

Stěna S3:

$$\frac{\sigma_o (T_{S2}^4 - T_{S3}^4) \left(\frac{r_2}{r_3} \right)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \frac{r_2}{r_3}} + \alpha_{3K} (T_{S3} - T_2) = \frac{\lambda_3 (T_{S3} - T_{S4})}{r_3 \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (4)$$

Stěna S4:

$$\frac{\lambda_3 (T_{S3} - T_{S4})}{r_4 \ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{\lambda_4 (T_{S4} - T_{S5})}{r_4 \ln \frac{r_5}{r_4}} \quad (5)$$

Stěna S5:

$$\sigma_o \varepsilon_5 (T_{S5}^4 - T_o^4) + \alpha_{5K} (T_{S5} - T_o) = \frac{\lambda_4 (T_{S4} - T_{S5})}{r_5 \ln \frac{r_5}{r_4}} \quad (6)$$

Bilanční rovnice představují 5 rovnic pro 5 neznámých funkcí teploty t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} , t_{S4} , t_{S5} . Řeší se zvlášť v každé zóně A, B, C, na které jsme rozdělili pomyslně tento kroužek. Axiální tepelné toky se zanedbávají.

Výsledky výpočtu jsou na obr.3 a Tabulce 1.

Tabulka 1: Výsledky výpočtu teplot stěn spalovací komory a tepelných toků sáláním, konvekcí a kondukcí

	ozn.	jednotka	A	B	C
Teplota vnitřní stěny plamence	t_{S1}	$^{\circ}\text{C}$	600,77	789,01	877,11
Teplota vnější stěny plamence	t_{S2}	$^{\circ}\text{C}$	597,47	783,35	871,25
Teplota vnitřní stěny pláště	t_{S3}	$^{\circ}\text{C}$	447,11	498,90	534,27
Teplota vnější stěny pláště	t_{S4}	$^{\circ}\text{C}$	447,01	498,79	534,15
Teplota vnější stěny izolace	t_{S5}	$^{\circ}\text{C}$	29,05	30,72	31,85
Sálání z plamene na stěnu plamence	Q_{SAL1}	W	160752	144048	132473
Sálání z plamence na plášť	Q_{SAL2}	W	7304	21300	30857
Sálání z izolace do okolí	Q_{SAL5}	W	45	50	54
Konvekce na vnitřní straně plamence	Q_{K1}	W	-95708	-32460	-16837
Konvekce na vnější straně plamence	Q_{K2}	W	57740	90288	84779
Konvekce na vnitřní straně pláště	Q_{K3}	W	6954	20908	30436
Konvekce na vnější izolaci	Q_{K5}	W	305	342	366
Vedení v plamenci	Q_{Vr1}	W	65044	111588	115636
Vedení v plášti	Q_{Vr3}	W	350	392	421
Vedení v izolaci	Q_{Vr4}	W	350	392	421

2.0 Výpočet teplotního a napětového pole segmentu č.5 pro závoje chlazení. Výpočet teplotních deformací.

Geometrie chlazeného segmentu plamence spalovací komory je na obrázku 2. Na tuto konfiguraci je aplikována okrajová podmínka 1. druhu, kde jsou zadány na okraji teploty povrchu

$$T = T(x_s, y_s, z_s). \quad (7)$$

Přitom teploty na okraji jsou vypočteny podle bodu 1.3 a výsledky výpočtu teplot t_{S1} , t_{S2} jsou uvedeny na obrázku 3.

Úloha je řešena jako rotačně symetrické stacionární teplotní pole, na které navazuje z tohoto teplotního pole odvozený výpočet teplotních napětí a teplotních deformací.

Materiál plamence je ČSN 17 246.4, ekvivalentní materiál je Ch 18 N 12 T. Materiálová data jsou podle ČSN 417246 a jsou uvedena v Tabulce 2.

Výpočet byl proveden programem RELAX 2002, který je popsán ve [3]. Programem RELAX 2002 je možné řešit rovinné a rotačně-symetrické teplotní pole stacionární a nestacionární při okrajových podmínkách 1., 2. a 3. druhu a při okrajové podmínce sálání. Vlastnosti materiálu mohou být funkcí teploty, okrajové podmínky mohou být funkcí času. Na řešení teplotních polí mohou navazovat řešení napjatosti, způsobené jak vnějšími okrajovými podmínkami (síly, deformace, posunutí), tak i teplotními poli stacionárními i nestacionárními. Program má zabudovanou databanku materiálů. Byl vytvořen v Ústavu problémů pevnosti v Kijevě.

Tabulka 2 : Vlastnosti materiálu 17 246.4 podle ČSN 417246. Část 2.

Veličina	Jednotka	Teplotní stupnice [°C]				
		400	600	650	700	750
Pevnost při tečení t_1 pro 10^5 hod.	[MPa]	435,5	88	59	39	29
Pevnost při tečení t_2 pro 10^6 hod.	[MPa]	404,5	57	37	24	18
Mez tečení D_{1,t_1} 1,0, 10^5 hod.	[MPa]	413,5	66	44	28	22
Mez tečení D_{2,t_2} 1,0, 10^6 hod	[MPa]	389,5	42	27	18	14
Nortonův exponent	[-]	38,56	5,0944	4,7150	5,2114	5,0944
Nortonův logarotmický součinitel	[-]	- 232,87	- 35,159	- 31,658	- 31,181	- 29,563

Výsledky výpočtu jsou na obrázku 4 ÷ 8. Na obrázku 4 a 6 jsou znázorněna teplotní pole segmentu, která vlastně kopírují zadané teploty na povrchu, poněvadž tloušťka stěn je malá. Teplotní pole je výrazně ovlivněno chlazeným vzduchem, přičemž minimální teploty jsou v místě přívodu chladicího vzduchu do chladicí závoje mezní vrstvy.

obr.4: Stacionární teplotní pole segmentu
plamence spalovací komory chlazeného
závojem chladicího vzduchu.

Základní technické parametry:

teplota chladicího vzduchu: $t_2 = 421,3^\circ\text{C}$

teplota plamene : $t_{EF} = 1366^\circ\text{C}$

poměrný hmotnostní průtok

chladicího vzduchu : $\delta_{CH} = \frac{m_{CH}}{m_2} = 0,213$

délka segmentu : $L = 50 \text{ mm}$

Teploty jsou uvedeny ve $^\circ\text{C}$.



obr. 5: Ekvivalentní napětí podle Hencky-Mises-Hubera (MHM) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu.
 Základní technické parametry:
 teplota chladicího vzduchu: $t_2 = 421,3^\circ\text{C}$
 teplota plamene : $t_{\text{EF}} = 1366^\circ\text{C}$
 poměrný hmotnostní průtok

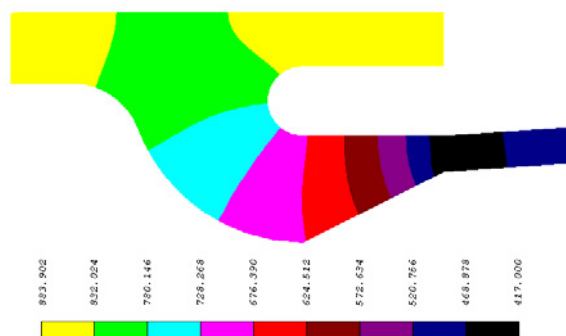
$$\text{chladicího vzduchu} : \delta_{CH} = \frac{\dot{m}_{CH}}{\dot{m}_2} = 0,213$$

délka segmentu : $L = 50 \text{ mm}$
 materiál segmentu : ČSN 17 246.4
 Napětí jsou uvedena v MPa.

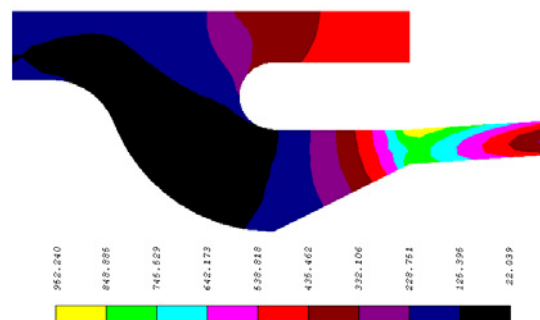


V navazujícím výpočtu teplotní napjatosti je v místě minimální teploty dosaženo nejvyššího napětí, a to tahového, které je nepříznivé z hlediska nízkocyklové únavy. Naopak v tenkých částech plamence vznikají tlaková napětí (viz obr. 8), která mohou způsobit tvarovou nestabilitu – vybočení. Ekvivalentní napětí podle HMH je na obrázku 7 a obvodová napětí na obrázku 8. Z hlediska dlouhodobého provozu plamence spalovací komory nepředstavují vypočtená napětí nebezpečí a to jak z hlediska statických napětí, tak z hlediska nízkocyklové únavy. Analýza napětí však může vést k úpravě tvaru kovaného kroužku tak, aby přechody mezi tenkým válcovým kroužkem a silnějším nakovaným výstupkem pro přívod chladicího vzduchu do závojové vrstvy byly pozvolné. Tím se odstraní koncentrace napětí v přechodech, které mohou být zdrojem trhlin. Jedno takové místo je např. na obrázku 7 v místě minimální teploty stěny segmentu, tj. v místě přívodu chladicího vzduchu do závojové mezní vrstvy.

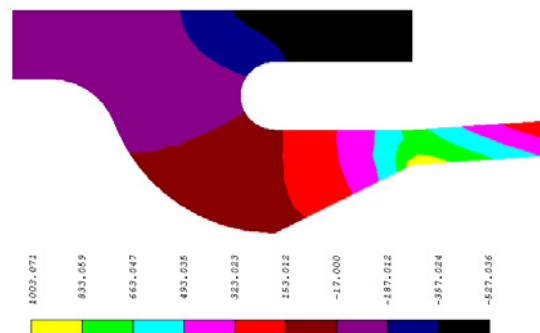
obr. 6: Detail teplotního pole segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Jedná se o výseč segmentu dle obr. 11.10
 Napětí jsou uvedena v MPa.



obr. 7: Detail pole ekvivalentního napětí podle Hencky-Mises- Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Výseč segmentu dle obr. 11.11
Napětí jsou uvedena v MPa.



obr.8: Detail pole obvodových napětí v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu
Napětí jsou uvedena v MPa.



Výpočty teplotních a napěťových polí segmentů plamence umožňují optimalizovat geometrii kovaného kroužku tak, abychom odstranili koncentrace napětí a tím i možný vznik trhlin. Tyto trhliny vznikají převážně v místech přívodu vzduchu.

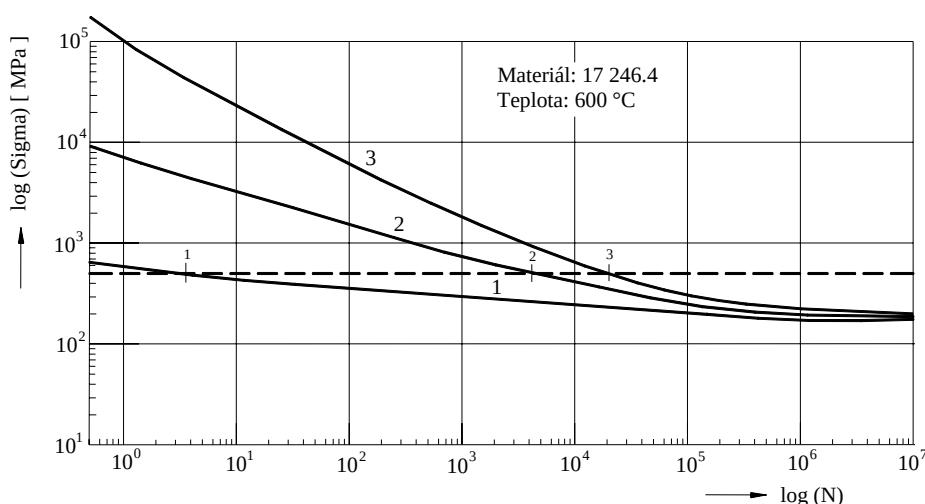
3.0 Hodnocení teplotních napětí. Napětí silového a deformačního původu

Klasická nauka o pružnosti a pevnosti byla do poloviny dvacátého století založena výhradně na principu dovolených napětí, počítaných podle Hookeova zákona. Za dovolené napětí se považovala obvykle mez pevnosti, dělená určitou bezpečností, např. $n = 3$. Výpočet napětí, vznikajících v důsledku nerovnoměrného rozložení teplot – teplotních napětí, nebyl v té době prakticky proveditelný a praxe vedla k názoru, že teplotní napětí nejsou nebezpečná.

V padesátých letech, kdy se rozvíjela výroba a provoz spalovacích turbin a leteckých proudových motorů, se podařilo teoreticky zvládnout i výpočty teplotních polí a na to navazující výpočty teplotních napětí. Dalšího pokroku se dosáhlo na jedné straně zaváděním metody konečných prvků pro výpočty jak teplotních polí, tak i pro výpočty napětí, včetně teplotních, na druhé straně byla vypracována teorie nízkocyklové a tepelné únavy materiálu. Podle těchto poznatků lze napětí ve strojních součástech rozdělit na napětí silového a deformačního původu.

Teplotní napětí jsou zvláštním případem napětí deformačního původu. Při jednorázovém působení teplotních napětí v tažném materiálu k destrukci nemůže dojít. Při opakovaném působení teplotních napětí však dochází k tzv. nízkocyklové (tepelné) únavě materiálu. Pro představu o působení nízkocyklové únavy jsou na obrázku 9 zobrazeny únavové křivky materiálu 17 246 při teplotě 600°C. Na vodorovné ose je vyneseno počet cyklů do porušení N , na svislé ose je vynášeno lineárně (podle Hookeova zákona) vypočtené napětí. Obě osy jsou znázorněny v logaritmických souřadnicích. Vodorovná přímka, označující amplitudu

napětí 500 [MPa] protíná tři únavové křivky v bodech 1, 2 a 3. Křivka 1, procházející bodem 1 platí pro nízkocyklovou únavu silově namáhané součásti. V našem případě by k porušení došlo asi po 4 cyklech zatížení. Bodem 2 prochází tzv. Neuberova čára, která platí pro zatěžování ve vrubech. Součást, která by ve vrubu dosahovala napětí 500 [MPa] by dosáhla životnost asi 4000 cyklů. Bodem 3 prochází křivka celkové deformace, která platí pro čistě teplotní napětí (teplotní napětí mimo vruby). V tomto případě by životnost při téže amplitudě napětí dosáhla asi 25000 cyklů.



obr. 9: Křivky nízkocyklové únavy materiálu 17246.4 při teplotě materiálu 600 °C

Křivka 1 : Silové namáhání

Křivka 2 : Neuberova křivka pro teplotní zatěžování ve vrubech

Křivka 3 : Čistě teplotní namáhání součásti bez vrubů

4.0 Závěr

Je zřejmé, že maximální hodnota napětí v obvodovém směru dosahuje hodnoty kolem 1000 MPa. Z křivky nízkocyklové únavy pro čistě teplotní namáhání (obr. 9, křivka 3) vyplývá, že pro dané napětí lze dosáhnout životnosti 5000 cyklů, což je hodnota naprosto vyhovující, poněvadž za jeden cyklus lze považovat zapálení a odstavení spalovací komory. Jestliže v daném konkrétním příkladu nejsou teplotní napětí nebezpečná, lze si docela dobře představit situaci, která bude z hlediska tepelného zatížení segmentu plamence méně příznivá. To nastane v případě, že se zvýší tepelné namáhání stěny od sálání a to především zvýšením lokální efektivní teploty plamene t_{EFi} a také lokální sálavosti plamene. Klesne-li zároveň teplota chladicího media, může narůst axiální teplotní gradient na ještě vyšší hodnoty, které mohou zvýšit teplotní napětí v chlazeném segmentu a může se snížit životnost s ohledem na nízkocyklovou únavu.

Literatura

- [1] Veselý, S.: „Efficiency of Combustor Wall Cooling in Gas Turbines“, 9th International Scientific Conference, High Tatrans, Juni 2005.
- [2] Veselý, S.: „Spalovací komory spalovacích turbin“, GALANT Brno, ISBN 80-239-6657-X, 620 str.
- [3] Pospíšil, B.: „Základy neizotermické pevnosti“, technická publikace KTU-IBZKG, Brno,