

ANALÝZA TEPLOTNÍCH NAPĚTÍ PLAMENCE SPALOVACÍ KOMORY A PREDIKCE ŽIVOTNOSTI

ANALYSIS OF THERMAL STRESSES OF THE FLAME TUBE OF THE COMBUSTION CHAMBER AND LIFETIME PREDICTION

Stanislav Veselý

EKOL, spol. s r. o., Křenová 65, 602 00 Brno, CZ, e-mail: vesely@ekolbrno.cz

Abstrakt

Nejvíce tepelně namáhanými částmi spalovacích turbín jsou funkční části spalovacích komor. To je dáno tím, že zde jsou z jedné strany tepelné toky sáláním z plamene na stěnu a z druhé strany jsou u vnitřní i vnější strany plamence velké konvektivní tepelné toky. Tím vzniká nerovnoměrné teplotní pole plamence, které je příčinou vzniku teplotních napětí a deformací. Všude tam, kde jsou vysoké gradienty teplot, a to jak v prostoru, tak v čase, vznikají teplotní napětí, které mohou v některých případech ohrozit provoz spalovací komory, a to především tam, kde v důsledku cyklického namáhání dojde ke kumulaci poškození a ke vzniku trhlin. Pro výpočet teploty stěny plamence bude použita zónová metoda, kde v každé zóně je řešena rovnice tepelné rovnováhy při výměně tepla mezi plamenem a stěnou, přičemž tepelný tok je dále analyzován na dalších prvcích spalovací komory. Vypočtené teploty stěny budou použity jako okrajová podmínka 1. druhu pro řešení teplotního a napětového pole plamence spalovací komory. Životnost bude určena z křivek nízkocyklové únavy pro daný materiál.

Abstract

The most thermally stressed parts of combustion turbines are functional parts of combustion chambers. That is due to thermal radiation of the flame to the wall and substantial convection from inner and outer side of the flame tube. This creates non-uniform temperature field of the flame tube, which causes thermal stresses and deformation. Wherever there are high temperature gradients, both in space and time, temperature stresses arise. Temperature stresses may in some cases threaten the operation of combustion chamber, especially at the places where cyclic stresses cause accumulation of damage and creation of crack. A zone method will be used to calculate the flame tube wall temperature. The thermal equation equilibrium is solved in each zone while the heat is exchanged between the flame and the wall. The heat flow will be further analyzed on the other elements of combustion chamber. Calculated wall temperatures will be used as the first boundary condition for solving temperature field and stress field of the combustion chamber flame tube. The service life will be determined by the low-cycle fatigue curves based on specific material.

Stručný popis spalovací komory a základní termodynamické parametry

Na obr. 1 je podélný řez spalovací komorou typu CAN v souproutém provedení. Turbína má celkem 11 těchto komor. Palivem je zemní plyn Tranzit s dolní výhřevností $H_{u_i}=49\,172\text{kJkg}^{-1}$, s hmotovým poměrem vodík-kyslík $\sigma_H/\sigma_c = 0,3339$, se stechiometrickým palivovým poměrem $f_{\text{stech}} = 0,058768$. Primární oblast je opatřena čtyřmi kruhovými hořáky 9 se šířkou stabilizátorů $B = 16\text{ mm}$, osy stabilizátorů jsou ve vzdálenosti $H = 26,7\text{ mm}$. Palivo je přivedeno otvory umístěnými v ose stabilizátorů. Plamenec je sestaven z kovových kroužků, které jsou vzájemně svařeny. Kroužky jsou chlazeny závojem chladícího vzduchu. Geometrie kovového kroužku je znázorněna na obr. 2, přičemž geometrie je definována parametrem (označení viz obr. 2)

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

Rozdělení průtočných ploch v plamenci

Rozdělení průtočných ploch ve spalovací komoře má významný vliv na její funkci a na hlavní její charakteristiky jako je tlaková ztráta, účinnost spalování, emise NO_x, CO, dýmu, teplotní pole na výstupu. Pro tento případ bylo zvoleno rozdělení průtočných ploch podle tabulky 1, kde jsou průtočné plochy charakterizovány nepřímo lokálním součinitelem přebytku vzduchu α v každé zóně.

Tabulka 1

Číslo zóny	1	2	3	4	5	6	7	8
Přebytek vzduch α [-]	2,22	2,23	2,25	2,27	2,27	3,8	3,8	3,8

Postup výpočtu

Výpočet napěťového pole nejvíce namáhaného segmentu č. 5 (viz obr. 1) je rozdělen na dvě části. V prvním kroku se vypočte efektivní teplota plamene, emisivita plamene o účinnost spalování podél celého plamence zonální metodou podle algoritmu autora. Podrobnosti jsou uvedeny v [1]. Jsou přijaty tyto předpoklady řešení:

Spalovací komora je adiabatická. Sálavou energii z plamene na stěnu emituje izotermická vrstva plynu s efektivní teplotou T_{EFi} , která se počítá lokálně v každé zóně.

System plamen – stěna je ve stavu termodynamické rovnováhy a plamen a stěny lze považovat z hlediska přenosu tepla za povrchy šedé.

System je stacionární a nedochází ke změnám teploty stěn plamence v čase.

Plamen se vyznačuje pohlcovací schopností, kterou vyjadřuje integrální součinitel zeslabení záření $K = K_{SA} + K_V$, který globálně charakterizuje celkové vlastnosti zeslabení vrstvy plynu sazemí a tříatomovými plyny.

Je přijata koncepce ekvivalentní tloušťky sálající vrstvy plynu S_{ekv} .

Efektivní teplota plamene je funkcí vzdálenosti x , účinnosti spalování η_S , adiabatické teploty T_3 , objemových dílů H₂O, CO₂, sazí, parametrů vzduchu na vstupu T_2, p_2 a průměru plamence D_{pl} podle rovnice

$$T_{EF} = f \left[x, \eta_S, T_3, T_3^{\alpha=1,0}, \omega_{H_2O}, \omega_{CO_2}, \omega_{SA}, \frac{\sigma_C}{\sigma_H}, T_2, p_2, D_{pl} \right]. \quad (2)$$

Dále je řešen prostup tepla celou spalovací komorou. Jedná se o složenou úlohu obsahující sálání z plamene na stěnu plamence, konvektivní chlazení vnitřní stěny závojem chladícího vzduchu, vedení tepla materiálem plamence, konvektivní chlazení vnější stěny plamence, sáláním vnější stěny na povrch pláště a konečně prostup tepla pláštěm a izolací. Výsledkem jsou teploty vnitřní a vnější stěny plamence přičemž tyto teploty jsou spolu s ostatními parametry uvedeny na obr. 3. Teplotní a napěťové pole segmentu č. 5 plamence je řešeno programem RELAX, který je popsán ve [3]. Přitom je použita okrajová podmínka 1. druhu. Napěťové pole segmentu je znázorněno na obr. 4, detailní napěťové pole podle HMH je na obr. 5. Materiál plamence je podle nového označení X10CrNiTi18-10 (dříve 17 246.4). Průběh teploty a ekvivalentního napětí podle HMH je na obr. 6.

Závěr

Z rozboru teplotních napětí, která vznikají při axiální nerovnoměrnosti teplot segmentu spalovací komory chlazeného závojem chladícího vzduchu je zřejmé, že maximální hodnota napětí dosahuje kolem 1000 MPa. Z křivky nízkocyklové únavy pro čisté teplotní namáhání vyplývá, že pro dané napětí lze dosáhnout životnosti 5000 cyklů, což je vyhovující hodnota, protože jeden cyklus lze považovat za zapálení a odstavení spalovací komory. V případě, že se zvýší tep-

lotní namáhání stěny od záření a klesne zároveň teplota chladicího media, může narůst axiální teplotní gradient a může se snížit životnost s ohledem na nízkocyklovou únavu.

Literatura:

- [1] Veselý, S. (2007): *Spalovací komory spalovacích turbin*. ISBN 80-239-6659-X
 [2] Pospíšil, B. (1971): *Základy neizotermické pevnosti, Technická publikace*. Brno: KTU-IBZKG.
 [3] Kolár, V., Němec, I., Kanický, V. (1977): *Principy a praxe MKP*. Computer Press.

Obr. 1: Základní geometrie spalovací komory typu CAN pro spalovací turbínu s teplotou spalin před turbinou $t_3 = 1031 \text{ °C}$ a stlačením $\varepsilon = 18$. Palivo zemní plyn.

Základní parametry:

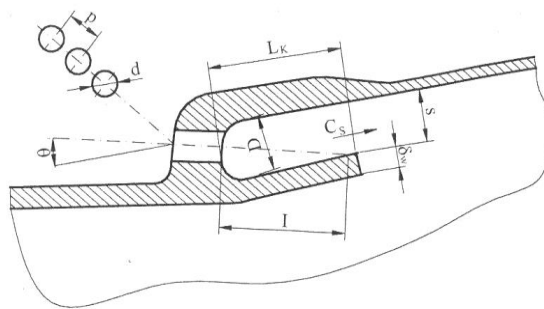
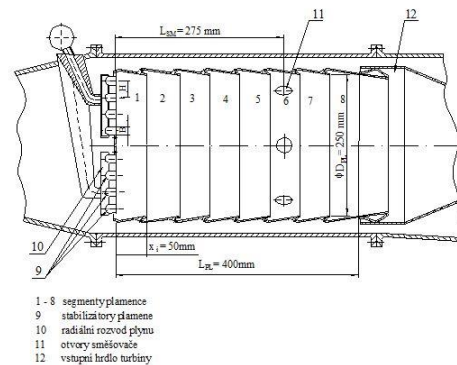
$$p_2 = 1,814 \text{ MPa};$$

$$t_2 = 421,3 \text{ °C};$$

$$t_B = 25 \text{ °C};$$

$$f_{\text{stech}} = 0,058768;$$

$$\sigma_H / \sigma_C = 0,3339; H_u = 49172 \text{ kJkg}^{-1}$$



Obr. 2: Geometrie přívodu chladicího vzduchu do kroužku při závojevém chlazení

Obr. 3: Závojevé chlazení kovaného kroužku. Výpočet charakteristických veličin po délce 5. kroužku.

t_m – teplota na hranici chladicí mezní vrstvy $[\text{°C}]$

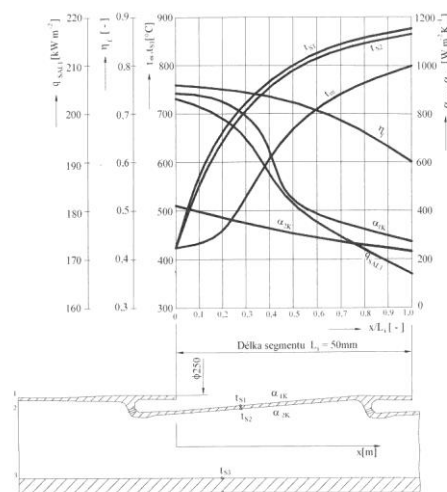
t_{S1} – teplota vnitřního povrchu stěny kroužku $[\text{°C}]$

η_f – účinnost chladicího filmu $[-]$

α_{1K} – součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně kroužku $[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$

α_{2K} – součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně kroužku $[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$

q_{SALI} – měrný tepelný tok zářením z plamene na stěnu kroužku $[\text{kWm}^{-2}]$



obr.4 : Ekvivalentní napětí podle Hencky-Misese-Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu.

Základní technické parametry:

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

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

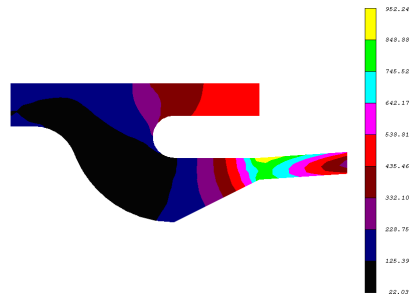
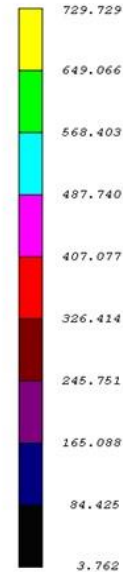
poměrný hmotnostní průtok

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

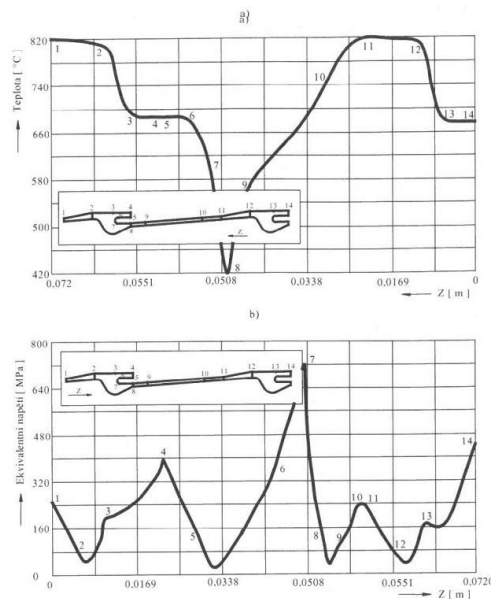
délka segmentu : $x_i = 50 \text{ mm}$

materiál segmentu : ČSN 17 246.4

Napětí jsou uvedena v MPa.



Obr. 5: Detail pole ekvivalentního napětí podle Hencky-Misese-Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Výseč segmentu dle obr. 4. Napětí jsou uvedena v MPa.



Obr. 6: Průběh teploty (část a) a ekvivalentní napětí (část b) na vnitřní stěně plamence spalovací komory. Plamenec je chlazen závojem chladicího vzduchu.