

VÝPOČET ŽIVOTNOSTI NĚKTERÝCH TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ČÁSTÍ SPALOVACÍCH TURBÍN

Stanislav Veselý

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

Abstrakt:

I při stacionárních podmínkách provozu spalovací turbíny vznikají v plamenci spalovací komory nerovnoměrná teplotní pole, která jsou příčinou vzniku teplotních napětí a deformací. To může v některých případech ohrozit provoz spalovací komory a to převážně tam, kde v důsledku cyklického namáhání dojde ke kumulaci poškození a vzniku trhlin. V tomto článku budeme analyzovat stacionární teplotní pole pro plamenec spalovací komory, která pracuje na zemní plyn a jejíž geometrická konfigurace je známá. Bude předveden způsob výpočtu teploty stěny plamence zatížené radičním tepelným tokem od plamene a chlazeným závojem chladicího vzduchu. Jedná se o kombinovanou úlohu výměny tepla na stěně. Budou představeny jednotlivé tepelné toky a rovnice tepelné rovnováhy, ze kterých budou vypočteny teploty stěn. Dále bude představen výpočet teplotního a napěťového pole plamence a provedena analýza silových a deformačních napětí. Životnost plamence bude posuzována s ohledem na nízkocyklovou únavu a creep.

Even with the stationary conditions of the operation of the gas turbine, uneven temperature fields arise in the flue tube of the combustion chambers, which are the cause of temperature stresses and deformations. This may in some cases compromise the operation of the combustion chamber, especially where the accumulation of damage and the cracking occur due to cyclic loading. In this article we will analyze the stationary temperature field for the flue tube of the combustion chamber which operates on natural gas and whose geometrical configuration is known. There will be shown a method of calculating the temperature of the flue tube wall loaded by the radiation heat flux from the flame and the cooled by cooling air veil. It is a combined task of heat exchange on the wall. Individual thermal flows and equilibrium thermal equations from which wall temperatures will be calculated will be presented. In addition, the calculation of the temperature and stress field of the flue tube will be presented and an analysis of force and flow stress will be performed. The life of the flue tube will be judged with respect to low cycle fatigue and creep.

Charakteristika řešené úlohy

Mimo start a odstavení pracuje spalovací komora převážně ve stacionárním režimu, kdy termodynamické a aerodynamické parametry v lokálních místech jsou nezávislé na čase. To platí jak pro průmyslové aplikace, tak v letectví. Přitom ve stacionárním provozu pracuje spalovací komora po většinu doby své životnosti. Teplotní napětí vznikají v tomto případě v důsledku axiálních nebo obvodových nerovnoměrností teplot plamence, hořáků, pláště, zapalovačů, držáků, čela nebo jiných částí. Přitom tato nerovnoměrnost je generována především nerovnoměrností radičních a konvektivních tepelných toků z plamene do uvedených funkčních částí a celků. Radiální nerovnoměrnost je způsobena nerovnoměrným radiálním rozdělením paliva nebo vzduchu na vstupu do spalovací komory. To souvisí u kapalných paliv s radiální charakteristikou trysek, nebo nerovnoměrným rozdělením plynného paliva po obvodě, které je dáno hlavně nepřesností výroby přívodu a rozvodu plynu.

U průmyslových aplikací nezávisí příliš na axiální délce plynové turbíny a lze tedy vstupní část komory navrhnout tak, aby rozložení rychlostí ve vstupních průřezích pro přívod primárního, směšovacího a chladicího vzduchu bylo rovnoměrné.

Termodynamické parametry oběhu a geometrie plamence a kovaného kroužku

Spalovací turbína o spojkovém výkonu $P = 10000$ kW spaluje zemní plyn. Teplota paliva je

$t_B = 25$ °C, výhřevnost paliva $H_u = 49172$ kJkg⁻¹. Teplota spalin před turbinou je $t_3 = 1031$ °C, stlačení kompresoru je $\varepsilon = 18$. Parametry oběhu plynové turbíny jsou na obrázku 1. Spalovací turbína je osazena 11ti spalovacími komorami typu CAN v souproutém provedení. Každá spalovací komora je osazena čtyřmi kruhovými hořáky a základní geometrie jedné spalovací komory je na obrázku 2. Plamenec spalovací komory sestává z kovových kroužků (segmentů), které jsou chlazeny závojem chladicího vzduchu. Primární oblast spalovací komory je opatřena čtyřmi kruhovými hořáky 9 se šířkou stabilizátorů $B = 16$ mm a s charakteristickým součinitelem ucpání průřezu (viz obr. 2)

$$\frac{B}{H} = 0,6 \quad [1]$$

kde B je šířka stabilizátoru a H je vzdálenost os stabilizátorů.

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.

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

Systém 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 sazemi a tříatomovými plyny.

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

Integrální pohltivost vrstvy plynu je

$$\alpha_1 = 1 - \exp[-(K_{SA} + K_V)S_{\text{ekv}}] \quad [2]$$

Při stavu termodynamické rovnováhy a pro šedý povrch je integrální pohltivost plamene rovna integrální emisivitě plamene. Vnitřní stěna plamence je chlazená závojem chladicího vzduchu, který se přivádí do každého segmentu soustavou otvorů. Otvory mají průměr d . Ostatní geometrické parametry kovaného kroužku jsou na obrázku 3.

Další podrobnosti lze najít v [1].

Výpočet teplotního a napět'ového pole segmentu č. 5 pro závoje chlazení

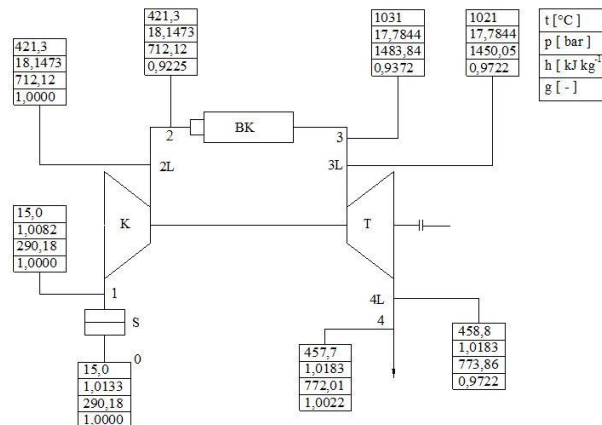
Na obr. 4, 5 je znázorněno napět'ové pole segmentu č. 5. Výpočet teplotního pole představuje složenou úlohu přestupu tepla, kde je uvažováno se sálavým tokem z plamene na plamenec, konvektivní přestup tepla na vnitřní straně plamence, vedení tepla stěnou, sálavým tokem z vnitřní strany plamence na vnitřní stranu pláště a konvekcí na vnější straně plamence. Výpočet napět'ového pole byl proveden programem RELAX, který je popsán ve [3]. Materiál plamence je podle staré normy ČSN 41 7246 označen 17 246.4, podle nového označení X10CrNiTi18-10. Výsledky výpočtu jsou na obr. 4, 5. Další podrobnosti lze najít ve [2].

Hodnocení teplotních napětí, závěr

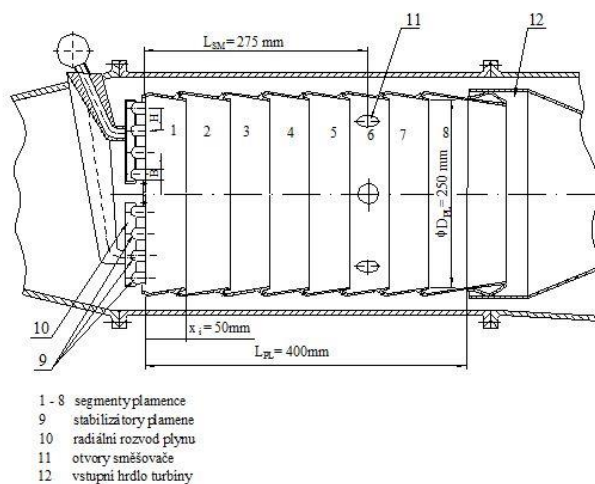
Teplotní napětí jsou zvláštním případem napětí deformačního původu. Při jednorázovém působení teplotních napětí v tažném materiálu k destrukci nemůže dojít. Při opakovaném působení teplotních napětí však dochází k tzv. nízkocyklové (tepelné) únavě materiálu. Pro

představu o působení nízkocyklové únavy jsou na obrázku 6 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.

Na obr. 5. 6 jsou znázorněna napěťová pole, která vznikají při axiální nerovnoměrnosti teplot segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Je zřejmé, že maximální hodnota napětí v obvodovém směru dosahuje hodnoty kolem 1000 MPa. Z křivky nízkocyklové únavy pro čisté teplotní namáhání (viz obr. 6) je zřejmé, 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.



obr. 1: Schéma oběhu plynové turbíny spalující zemní plyn se vstupní teplotou spalin do turbíny $t_3 = 1031$ °C a stlačením $\varepsilon = 18$



obr. 2: Základní geometrie spalovací komory typu CAN pro spalovací turbínu s teplotou spalin před turbínou $t_3 = 1031$ °C a stlačením $\varepsilon = 18$. Palivo zemní plyn. Základní parametry:

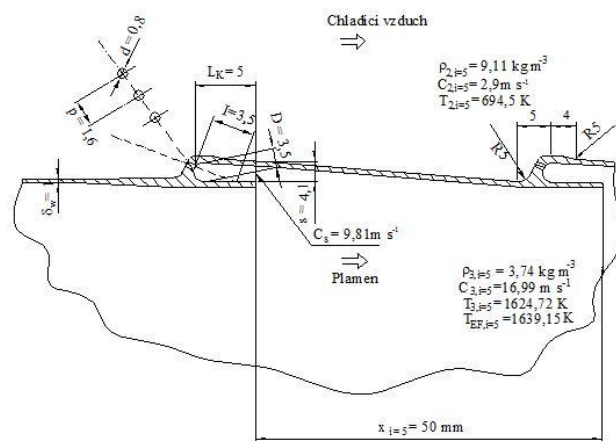
$$p_2 = 1,814 \text{ MPa}$$

$$t_2 = 421,3 \text{ °C}$$

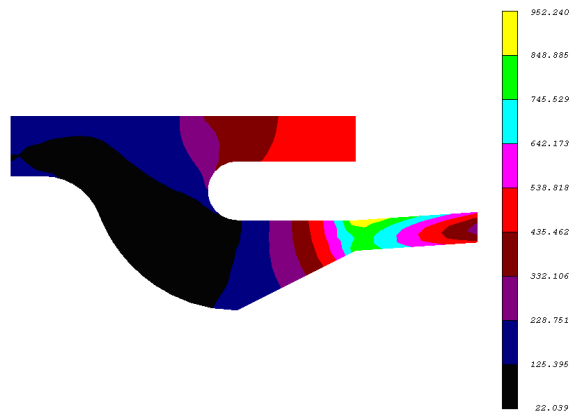
$$t_B = 25 \text{ °C}$$

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

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



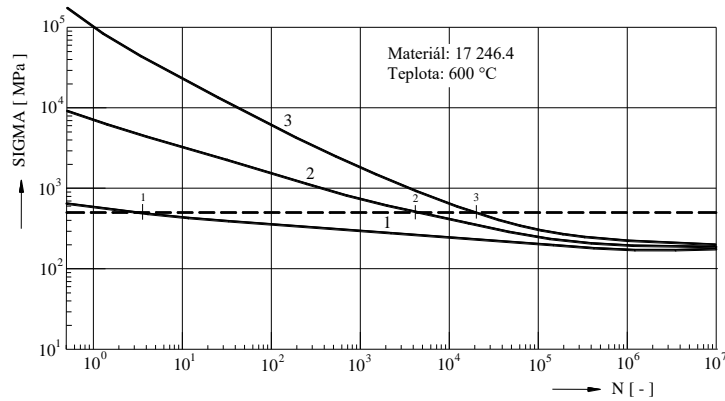
obr. 3: Geometrie kovaného kroužku chlazeného závojem chladicího vzduchu. Geometrický parametr $M = 0,467$. Všechny délkové rozměry jsou v mm.



obr. 4: Detail pole ekvivalentního napětí podle Hencky-Misese- Hubera (HMH) v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu. Výseč segmentu dle obr. 3 Napětí jsou uvedena v MPa.



obr. 5: Detail pole obvodových napětí v segmentu plamence spalovací komory chlazeného závojem chladicího vzduchu Napětí jsou uvedena v MPa.



obr. 6: 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

Literatura:

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

