

ANALYSIS OF JET ENGINE COMPONENTS HEAT RESISTANCE IMPROVEMENT BY TBC COATING

ANALÝZA ZLEPŠENIA ŽIARUVZDORNOSTI KOMPONENTOV TURBÍNOVÉHO MOTORA POMOCOU TBC POVLAKU

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26, Žilina
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

Michal Janovec
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26, Žilina
michal.janovec@fpedas.uniza.sk

Miroslava Cúttová
Department of Mechanical Engineering
Armed Forces Academy of gen. M.R. Štefánik
Demänová 393,
031 01, Liptovský Mikuláš
miroslava.cuttova@aos.sk

Abstract

The operation of jet engines in aviation is a very challenging task also in view of the high demands on the safety of such an operation. One of the most dangerous phenomena that affects the safe operation of these engines is the unstable work of the compressor. The object of the research in this article is to find appropriate and simple way to improve heat resistance of the MPM-20 experimental engine components, suffered by high thermal load, which resulted in the destruction of its gas turbine. A metallographic and microscopic analysis was carried out on the experimental specimens improved by TBC coating for decreasing of thermal conductivity. The results of experiments with TBC coatings shows decrease of the sample temperature for samples covered with TBC coating comparing to samples without it. This fact can contribute to the development of new surface treatment of jet engine components with higher heat resistance and better reliability.

Keywords

Turbine damage, heat resistance, safe operation, TBC coating

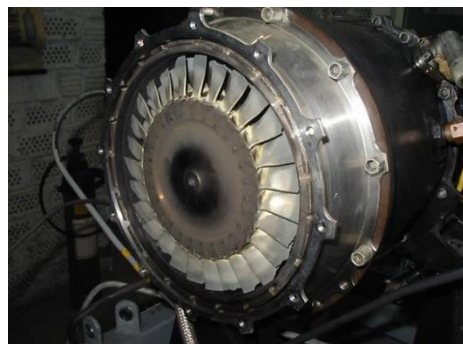
1. Úvod

Plynové turbíny sú progresívnymi zdrojmi mechanickej energie súčasnosti aj budúcnosti. Snaha zvyšovať ich účinnosť je nevyhnutne spojená so zvyšovaním pracovnej teploty plynov generovaných v spaľovacej komore. Je zrejme, že tento aspekt dáva vysoké požiadavky na tepelnú odolnosť materiálu lopatiek statora a rotora turbíny, ktoré sú horúcimi plynmi obtekané. Preto sa v prevádzke nevyhnutne stretávame s haváriami týchto zariadení, ktoré majú rôzne príčiny. K všeobecným príčinám patria podľa niektorých prameňov (Carter, 2005), (Galieriková, 2018): tečenie, tepelná únava (nizkokycklová únava), Termomechanická únava (vysokocycklová únava), korózia, Erózia, Oxidácia, Poškodenia cudzím telesom. Poškodenia lopatiek nie sú len problémom turbínových leteckých motorov, ale tiež aj parných lopatkových turbín využívaných v energetike. Pre ne sú typické únavové porušenia sprevádzané ulomením lopatky, ktorá následne väčšinou zničí ostatné lopatky turbíny (Davies, 2000), (Pecho, 2018). Takéto porušenia sa vyskytujú v určitých prípadoch aj u leteckých turbokompresorových motorov, aj napriek tomu, že je snaha sa únavovým lomom vyhnúť (Bugaj, 2012), (Catlos, 2018).

Najmä motor MPM-20 je zvlášť citlivý na zmeny termodynamických parametrov, ktoré vyústili do zničenia motora. S objasnením hlavných príčin havárií tohto motora jednoznačne súvisí aj potreba objasnenia zmien v štruktúre materiálu pracovných častí rotorových lopatiek, vystaveného extrémnym teplotám a agresívnemu prostrediu (Hocko, 2003).

U tohto motora, ktorý nebol pôvodne skonštruovaný na dlhodobú prevádzku, pri zvýšených teplotách nastalo rapídne zmenšenie medzery medzi koncom lopatky a plášťom turbíny. Dochádzalo k treniu a tým aj k deformáciám koncových častí. Toto

prispelo k ďalšiemu zvýšeniu celkového namáhania zoslabenej lopatky a k vzniku zárodkov trhlin, ktoré vedú až k deštrukcii turbín, ako na obr. 1.



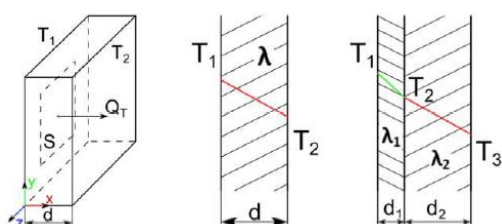
Obrázok 1: Zničená plynová turbína motora MPM-20. Zdroj: Autori.

Snaha o zvyšovanie efektívnej účinnosti plynových turbín súvisí so zvyšovaním teploty horúcich plynov, ktoré cez turbínu pretekajú. Aj keď dnes používané palivá umožňujú zvýšiť teplotu plynov takmer na hranicu 3000 °C, je zrejme, že limitujúcim faktorom tohto úsilia sú materiály, z ktorých sú spaľovacie komory a turbínové lopatky vyrobené. Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny niklu a kobaltu majú maximálne prevádzkovú teplotu bez chladenia stanovenú na 1200 °C (Davies, 2000). Pri tejto teplote je zaručená ešte dostatočná pevnosť a oxidačná odolnosť spomenutých zliatin. Preto je snaha vytvoriť kompozitný materiálový systém, kde by základný materiál žiaruvzdornej zliatiny bol chránený vrstvou materiálu s vyššou tepelnou odolnosťou. Takými materiálmi sú vrstvy tepelných bariér (TBC vrstvy), ktoré pozostávajú z dvoch a viac vrstiev (Clarke, 2012). Prvá vrstva je založená na *NiAl*, *NiCr*,

NiCrAlY alebo CoCrAlY. Jej úlohou je chrániť základný materiál pred oxidáciou a zlepšiť adhéziu následnej keramickej vrstvy. Tá pozostáva často z kombinácie materiálov $ZrO_2+Y_2O_3$, ktorá vysokým teplotám a má nízky koeficient tepelnej vodivosti. Predpokladá sa, že takéto vrstvy dokážu zvýšiť prevádzkovú teplotu žiaruvzdorných zliatin až o 300 °C (Clarke, 2012).

2. Teória prenosu tepla vedením tuhou stenou

Podľa všeobecne známej teórie (Lienhard,2008) je pri vedení tepla stenou ovplyvnený tepelný tok Q_T daný Fourierovým zákonom. Ustálený tepelný tok na obr. 2 skrz definovanú časť rovnobežnej steny s hrúbkou d a koeficientom tepelnej vodivosti λ sa tvorí v prípade, že počiatočná plocha steny ($x=0$) má konštantnú teplotu T_1 a náprotivná plocha ($x=d$) má konštantnú teplotu T_2 , kde $T_1 > T_2$. Teplota vo vnútri steny teda klesá z počiatočnej teploty na úroveň konečnej teploty proporcionálne k vzdialenosti x .



Obrázok 2: Proces šírenia tepla v tuhej stene Zdroj: (Lienhard, 2008).

Ak poznáme funkčnú závislosť $T(x)$, vieme určiť tepelný tok skrz plochu S nasledovne:

$$Q_T = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_1 - T_2) \cdot S \quad (1)$$

Ak uvažujeme so stenou zloženou z dvoch vrstiev, ktorej hrúbka je $d = d_1 + d_2$ a celkový koeficient tepelnej vodivosti je daný súčtom koeficientov jednotlivých častí $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, potom je tepelný tok daný rozdielom teplôt na hraniciach častí steny, teda T_1, T_2, T_3 pri rovnakej ploche S :

$$Q_T = \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot (T_1 - T_2) \cdot S + \frac{\lambda_2}{d_2} \cdot (T_2 - T_3) \cdot S \quad (2)$$

3. Simulačná analýza šírenia tepla

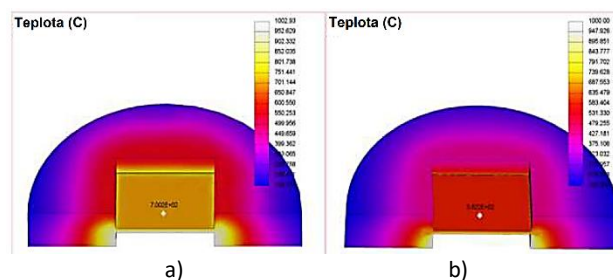
Simulačný model šírenia tepla cez vzorky materiálu s povlakom TBC bol spracovaný v 3D kresliacom softvéri CREO 3.0 v geometrii fyzicky pripravených vzoriek. Ich materiálové vlastnosti pre účely simulácie boli stanovené na základe tabuľkových hodnôt uvedených v tab. 1.

Tabuľka 2: Fyzikálne vlastnosti materiálov použitých v experimente. Zdroj: (Fozo, 2017).

Fyzikálne vlastnosti	Hustota (g/cm ³)	E (GPa)	α (m/m.K)x10 ⁻⁶	μ	C_p (J/kg.K)	λ (W/m.K)
EI 435	8,49	195	12,2	0,3	405	14,6
TBC vrstva	6,05	149	9,91	0,25	420	2,1
Epoxidová živica	1,30	2,99	5,99	0,37	1047,6	0,188

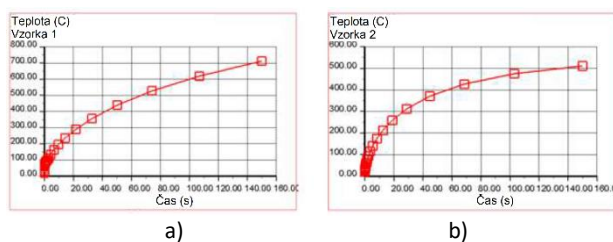
Pre lepšiu viditeľnosť boli modely rozrezané stredovou rovinou. Takto pripravené modely boli v tepelnej simulácii vystavené pôsobeniu tepelného zaťaženia o intenzite 27 000 mW, čo zodpovedalo pôsobiacej teplote na povrchu horúcej strany

vzorky približne 1000 °C. Opačná, chladná strana vzorky bola stanovená na počiatočnú teplotu 20°C koeficient tepelného vyžarovania na hodnotu 0,01 W/(m².K). Výsledky simulácie na obr. 3 ukazujú rozloženie teploty vo vzorkách v čase 150 s od začiatku pôsobenia tepla.



Obrázok 3: Simulácia šírenia tepla vo vzorkách povlakovaného a nepovlakovaného materiálu. Zdroj: (Fozo, 2017).

Výsledky ukázali, že model s vrstvou TBC, pri rovnakých podmienkach tepelného zaťaženia, vykazoval teplotu chladnej strany vzorky 582,2 °C, kým model bez povlaku TBC vykazoval teplotu tej istej strany 700,2 °C. Grafické znázornenie závislosti teploty a času zo simulačného modelu je na obr. 4. Tu je zrejmy postupný logaritmický nárast teploty v čase, no kým u vzorky bez povlaku rastie teplota s časom strmšie, u vzorky s povlakom TBC sa po strmom náraste postupne nárast zmierňuje a nasvedčuje v blízkej dobe dosiahnutie svojho maxima.

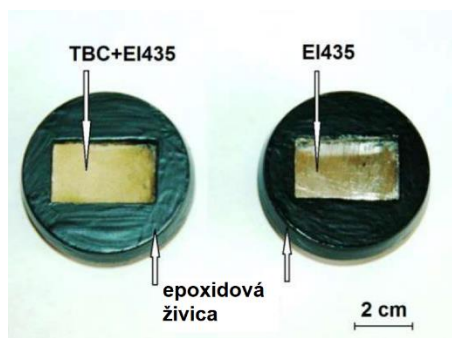


Obrázok 7: Rast teploty vzoriek počas simulácie: a) vzoriek bez TBC povlaku, b) vzoriek s TBC povlakom. Zdroj: (Fozo, 2017).

Následne museli byť tieto výsledky konfrontované s praktickým meraním na skutočných vzorkách pomocou termovíznej kamery FLIR A40M, schopnej merať a zaznamenávať teplotu v reálnom čase.

4. Popis experimentu

V rámci tejto štúdie bola vykonaná aj praktická analýza zlepšenia tepelnej odolnosti žiaruvzdornej zliatiny, označenej podľa ruskej normy GOST ako EI 435 (Maslenkov, 1983). Táto zliatina sa využíva na konštrukciu niektorých častí turbínových motorov a v rámci experimentu bola v niektorých verziách pokrytá vrstvou TBC. Takéto vzorky s rozmermi 4x3 cm boli zaliate do epoxidovej živice do podoby na obr. 5. Následne boli skúšané v laboratórnej zostave na obr. 6, ktorá pozostáva z držiaka vzorky s prístupovými otvormi z oboch strán, kde bolo možné pôsobiť plameňovým horákom, ktorý simuloval proces v spaľovacej komore motora.



Obrázok 5: Vzorky pre experiment. Zdroj: Autori.

Náprotivná strana vzorky bola sledovaná pomocou infračervenej kamery, schopnej merať povrchovú teplotu vzorky. Vzďalenosť horáka a vzorky bolo možné počas experimentu meniť. Merania tak prebehli pri pozícii horáka 10 (teplota 1070 °C na horúcej strane vzorky), 15cm (600°C) a 20 cm od držiaka vzorky (300°C na horúcej strane vzorky).



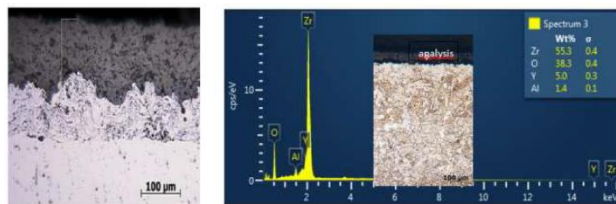
Obrázok 6: Zostava experimentu (Zdroj: autor)

Predpísané chemické zloženie zliatiny EI 435 je dané normou a uvedené v nasledujúcej tabuľke 2.

Tabuľka 2: Chemické zloženie zliatiny EI 435 podľa normy. Zdroj: (Fozo, 2017).

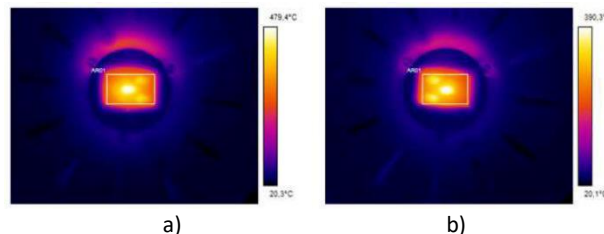
Prvok	Ni wt%	Cr wt%	Si wt%	Mn wt%	Ti wt%	Fe wt%	C wt%
EI 435	70-77	22	<0,8	<0,7	0,35	<6	<0,12

Po nanosení bola vrstva TBC analyzovaná pomocou elektrónového mikroskopu pre presné určenie hrúbky a tiež chemického zloženia využitím metódy EDX (energy dispersive X-ray). Ako je zrejme z obr. 7, vrstva TBC s hrúbkou približne 250 μm pozostáva z prvkov Zr, Y a atomárneho kyslíka, čo zodpovedá keramickému povlaku na báze ZrO₂ stabilizovaného 7% prídavkom Y₂O₃ (7YSZ keramika)(Clarke, 2005. Spodná vrstva pozostáva z 50 μm hrubej vrstvy zliatiny NiAl.



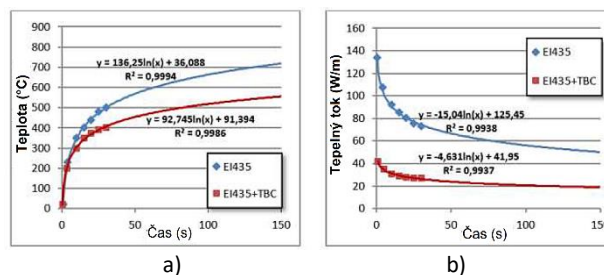
Obrázok 7: Analýza a vzhľad povlaku TBC na základnom materiáli vzoriek (Zdroj: Fozo, 2017)

Následné merania pomocou termovíznej kamery ukázali vysokú mieru podobnosti s výsledkami simulačného modelu. Experimenty na vzorkách s povlakom a bez neho, pomocou horáka umiestneného vo vzdialenosti 10 cm od držiaka vzorky (približne 1000 °C na povrchu horúcej časti vzorky) boli zaznamenané termovíznou kamerou v podobe, aká je zobrazená na obr. 8 s označením miesta merania teploty.



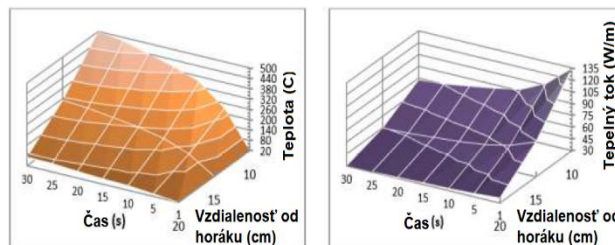
Obrázok 8: Infračervený záznam počas experimentu: a) vzorky bez TBC povlaku, b) vzorky s TBC povlakom. Zdroj: (Fozo, 2017).

Zo zaznamenaných nameraných hodnôt teploty v mieste merania teploty bolo následne možné vytvoriť grafické závislosti nárastu teploty v čase, ako aj dosadzovaním do vzťahu (2) vytvorenie grafickej závislosti tepelného toku skrz materiál vzoriek. Príklad takýchto závislostí je na obr. 9. Trendové čiary predstavujú predpoveď ďalšieho nárastu teploty, ktorý už nebolo možné merať kamerou vzhľadom na jej technické obmedzenia (max merateľná teplota 500 °C).



Obrázok 9: Trendové čiary: a) nárastu teploty vzoriek, b) tepelného toku cez vzorky povlakovaného a nepovlakovaného materiálu. Zdroj: (Fozo, 2017).

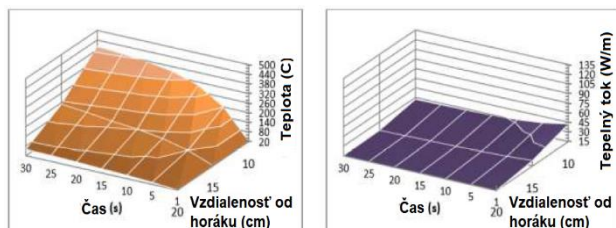
Spojením grafických závislostí rastu teploty s časom a poklesu tepelného toku s časom pri všetkých pozíciách horáka voči držiaku vzorky bolo možné vytvoriť trojrozmerné grafické závislosti na obr. 10 pre vzorky bez TBC povlaku. Tu je možno vidieť exponenciálny pokles úrovne dosiahnutej maximálnej teploty v danom čase, ktorý súvisí s nárastom vzdialenosti horáka. Rovnako je to aj v prípade tepelného toku.



Obrázok 10: Rast teploty a pokles tepelného toku v čase v závislosti od vzdialenosti nepovlakovanej vzorky od horáku. Zdroj: (Fozo, 2017).

Podobný efekt je viditeľný aj v prípade vzoriek s TBC povlakom, ktorých trojrozmerné grafy teploty a tepelného toku sú na obr. 11. V porovnaní so vzorkami bez TBC povlaku je v tomto prípade

nižšia maximálna dosiahnutá teplota pre všetky pozície horáka a tomu zodpovedajúci oveľa nižší tepelný tok materiálom vzoriek.



Obrázok 11: Rast teploty a pokles tepelného toku v čase v závislosti od vzdialenosti povlakovanej vzorky od horáku. Zdroj: (Fozo, 2017).

5. Záver

Na základe uvedených zistení z experimentov a simulácií je možné konštatovať nasledujúce závery:

- Počítačová simulácia použitím zodpovedajúceho softvéru ukázala pozitívny efekt povlaku TBC na zníženie úrovne prehrievania základného materiálu EI 435.
- Vzorky s povlakom tepelnej bariéry vykazovali pri každej polohe horáka menšie prehrievanie ako vzorky bez TBC, pričom rozdiely teplôt dosiahli 20 – 120 °C.
- Na základe nameraných hodnôt bolo možné vytvoriť trend s vysokou hodnotou presnosti, ktorý sa po logaritmickej krivke približoval k svojmu maximu.
- Kým zohrievanie vzoriek počas simulácie aj experimentu vykazovalo logaritmický nárast, tepelný tok naopak klesal zodpovedajúco exponenciálne.

Na základe toho, môžeme jednoznačne hovoriť o pozitívnom vplyve TBC vrstiev na ochranu materiálu voči vysokým teplotám a s tým súvisiacou oxidáciou v plynnom prostredí za vysokých teplôt.

Referencie

- Bugaj, M. 2012. Failure analysis-basic step of applying reliability centered maintenance in general aviation. *Transport Problems* 7(1), p. 77-86.
- Carter, T., 2005. Common failures in gas turbine blades, *Engineering Failure Analysis* 12 (2005) p. 237–247
- Catlos, M., Kurdel, P., Novák-Sedláčková, A., Labun, J. & Ceskovic, M. 2018. Continual Monitoring of Precision of Aerial Transport Objects. *NTAD 2018 - 13th International Scientific Conference - New Trends in Aviation Development, Proceedings* 8551683, p. 76-81
- Davies, J.R., 2000. Nickel, Cobalt and their alloys, *ASM Specialty Handbook*, ASM International, 2000, p. 421. ISBN: 0-87170-685-7
- Davies, J.R., 2012. Thermal barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*, Vol. 37, 2012, Material Research Society, p. 891-898. doi:10.1557/mrs.2012.232

Fozo, L. et al, 2017. Effect of TBC on heat transfer into nickel based refractory alloy, *SAMI 2017, IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, January 26-28, 2017, Herľany, Slovakia, p. 435-438

Galieriková, A., Materna, M. & Sosedová, J. 2018. Analysis of risks in aviation. *Transport Means - Proceedings of the International Conference 2018-October*, p. 1427-1431.

Hocko, M., 2003. Malý prúdový motor MPM – 20. *J. Vojenská letecká akadémia gen. M. R. Štefánika, Katedra leteckého inžinierstva*, 1. Vydanie, 2003, p. 135

Lienhard, J. H., 2008. *A heat transfer textbook*, third edition, Phlogiston Press, Cambridge, USA, 2008, p. 762

Malsenkov, S.B., 1983. *Zaroprocnye stali i splavi –Spravocnik*, Metalurgija, Moskva 1983, p. 96.

Pecho, P., Wylie, M. & Bugaj, M. 2018. Vibration fault detection of fuel pump using Recurrence Quantification Analysis. *Transportation Research Procedia* 35, p. 287-294.