

TBC VRSTVY A ICH VPLYV NA ZVYŠOVANIE TEPELNEJ ODOLNOSTI MATERIÁLOV

TBC LAYERS AND THEIR INFLUENCE ON INCREASING THE THERMAL RESISTANCE OF MATERIALS

Mário Novakov

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia
mario.novakov@icloud.com

Jozef Čerňan

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

Abstract – Paper is dedicated to TBC protective elements, which are used to increase heat resistance of materials used in aircraft turbine engines. In individual sections are described in detail methods of protection and increase in heat resistance using TBC materials further described in the paper. Protective elements are applied to combustion chamber and the assembly behind it – turbine and exhaust nozzle of the jet engine. Paper is dedicated to general theory of turbine engine parts, TBC layers and final experiment. Significance of these TBC layers and comparison of the same material with and without TBC layer will be aim of the experiment with thermal camera and gas burner which will simulate environment of combustion chamber.

Key words – TBC, layers, combustion chamber, blades, turbine, temperature

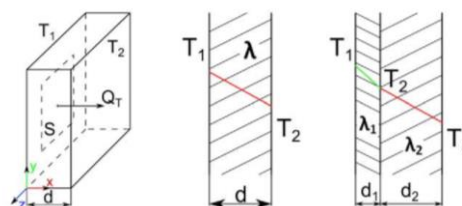
I. ÚVOD

Snaha o najvyššiu termodynamickú účinnosť v plynovej turbíne súvisí s dosiahnutím najvyššej možnej teploty plynov vyžarovaných zo spaľovacej komory. Hoci v súčasnosti používané palivo by umožnilo zvýšiť teplotu plynu takmer na 3 000 °C, je zrejme, že obmedzujúcim faktorom sú materiály spaľovacích komôr a plynových turbín. V každej leteckej spoločnosti je palivo jeden z nákladov, ktorý sa snažia o maximálne efektívne využitie. Žiaruvzdorné zliatiny niklu a kobaltu odolné voči tečeniu, ktoré sú používané na konštrukciu týchto častí majú maximálnu prevádzkovú teplotu 1200 °C. Ich výhodou je práve vysoká pevnosť a odolnosť proti tečeniu a oxidácii pri takých vysokých teplotách. Existuje preto snaha do budúcnosti vytvoriť systém kompozitného materiálu, ktorý by zaistil ochranu žiaruvzdorného materiálu odolného voči tečeniu pred teplom a umožnil by jeho použitie pri teplotách vyšších ako je jeho prevádzková teplota. Takéto ochranné prvky sú dnes tepelno-izolačné vrstvy (TBC), pozostávajúce z dvoch alebo

viacerých vrstiev. Prvá kovová vrstva môže byť na báze NiAl, NiCr, NiCrAlY alebo CoCrAlY, ktorá zlepšuje odolnosť základného materiálu - niklovej zliatiny proti korózii a tiež zlepšuje príľnavosť druhej vrstvy. Druhá vrstva obsahuje keramický materiál na báze $ZrO_2 + Y_2O_3$, ktorý odoláva vysokým teplotám bez nežiaducej oxidácie a má nízku tepelnú vodivosť. Predpokladá sa, že vrstva TBC na žiaruvzdorných zliatinách umožňuje prevádzku pri teplotách až o 300 °C vyšších ako je pôvodná prevádzková teplota.

Prenos tepla cez pevnú stenu

Podľa vedenia tepla je tepelný tok Q_T určený Fourierovým zákonom. Je potrebné poznať distribúciu a priebeh teploty v pozorovanom objeme, v závislosti od smeru a času: $T = T(x, y, z, t)$.



Obrázok 1: Vysvetlenie prenosu tepla cez pevnú stenu

Stály tepelný tok na obrázku 1 cez definovanú časť rovinnej steny s hrúbkou d a koeficientom tepelnej vodivosti λ sa vytvára, ak prvý povrch ($x = 0$) má konštantnú teplotu T_1 a opačnú plochu ($x = d$) má konštantnú teplotu T_2 , kde $T_1 > T_2$. Teplota vo vnútri steny preto spadá do úvahy od T_1 do T_2 v pomere k vzdialenosti x .

Ak poznáme funkčný vzťah $T(x)$, môžeme určiť tok tepla cez S , ako:

$$Q_T = \lambda / d \cdot (T_1 - T_2) \cdot S$$

Ak vezmeme do úvahy kompozitnú stenu s hrúbkou $d = d_1 + d_2$, pričom jej zložky majú koeficient tepelnej vodivosti $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$. Tepelný tok Q_T je v tomto prípade určený rozdielom

teploty na hraničných stenách dvoch komponentov, t. j. T_1 , T_2 , T_3 udržiavajúcich rovnakú plochu S .

$$Q_T = \lambda_1/d_1 \cdot (T_1 - T_2) \cdot S + \lambda_2/d_2 \cdot (T_2 - T_3) \cdot S$$

II. POPIS EXPERIMENTU

Pre tento experiment bola použitá žiaruvzdorná zliatina, označená podľa ruskej normy GOST ako EI 435, s plazmovým TBC nástrekom v ochrannej atmosfére Argónu. Vzorka materiálu potiahnutého TBC a vzorka bez TBC, obidve s rozmermi 4 x 3 cm, boli zaliate do vysokoteplotnej epoxidovej živice, ako je znázornené na obrázku 2 a 3 testované v laboratórnej zostave (obrázok 4). Samotný materiál vzoriek s TBC a bez vrstvy TBC sú znázornené na obrázkoch 4 a 5.



Obrázok 2: vzhľad vzoriek v epoxidovej živici s TBC



Obrázok 3: vzhľad vzoriek bez TBC

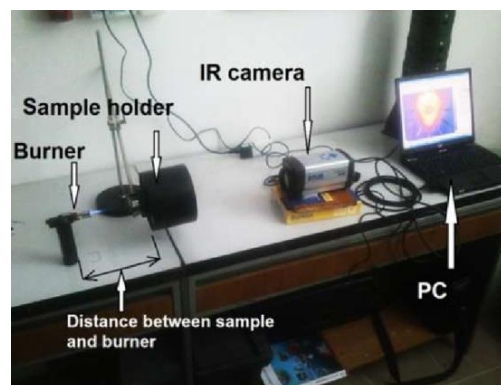


Obrázok 4: vzhľad testovaného materiálu bez TBC



Obrázok 5: vzhľad testovaného materiálu s TBC

Pokus sa uskutočnil v polohe horáka vo vzdialenosti 10 cm (teplota 1070 °C na horúcej strane vzorky), 15 cm (600 °C) a 20 cm (300 °C) od držiaka vzorky.



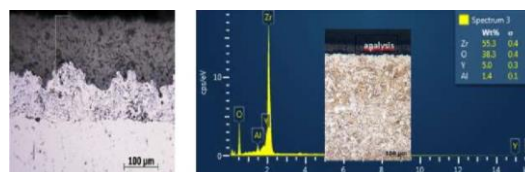
Obrázok 6 - laboratórne vybavenie pre meranie

Predpísané chemické zloženie zliatiny niklu EI435 podľa noriem GOST je uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Chemické zloženie zliatiny podľa EI 435

Materiál	Ni (wt%)	Cr (wt%)	Si (wt%)
EI 435	70 - 77	22	< 0.8
Mn (wt%)	Ti (wt%)	Fe (wt%)	C (wt%)
< 0.7	0.35	< 6	< 0.12

Vrstva TBC bola analyzovaná v snímacom elektrónovom mikroskope s použitím energetickej disperznej röntgenovej (EDX) chemickej elementárnej analýzy po príprave. Ako je znázornené na obrázku 7, prítomnosť prvkov ako sú Zr, Y a O naznačuje, že vrstva TBC s hrúbkou približne 250 µm tvorila keramický povlak ZrO_2 + stabilizačnej zložky Y_2O_3 typicky vyrobený z približne 7% hmotnosti Y_2O_3 (Keramika 7YSZ).

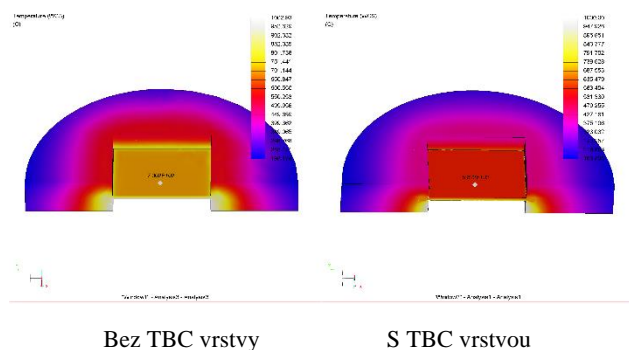


Obrázok 7: vzhľad a analýza plazmatických TBC

III. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Simulačný model tepelného prúdu bol vytvorený v softvérovom nástroji CREO 3.0 a príslušnom počítačovom vybavení. Vlastnosti týchto dvoch použitých materiálov sú v tabuľke 2 spolu s materiálom epoxidovej živice, ktorý slúžil ako rám vzoriek. Pre lepšiu viditeľnosť prenosu tepla materiálom sa použil polovičný rez vzorky.

Pripravený model bol v režime tepelnej simulácie vystavený tepelnému zaťaženiu 27000 mW, čo zodpovedá teplote plameňa horáka asi 1000 °C. Opačná studená strana vzorky bola stanovená počiatčnou teplotou 20 °C a koeficientom konvekčného chladenia 0,01 W / (m².K). Výsledky simulácie na obrázku 6 ukazujú distribúciu teploty vo vzorkách.



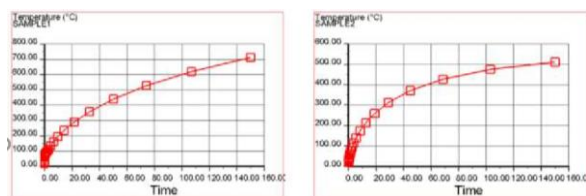
Obrázok 8: simulačné výsledky distribúcie tepla vo vzorkách

Tabuľka 2: Fyzikálne vlastnosti materiálov v simulácii prenosu tepla

Materiálové vlastnosti	EI434	TBC vrstva	epoxid
Hustota (g/cm ³)	8.49	6.05	1.30
Youngov modul pružnosti (MPa)	195	149	2.99
Koeficient tepelnej rozťažnosti (m/m.K).10 ⁻⁶	12.2	9.91	5.99
Poissonova konštanta	0.3	0.25	0.37
Špecifická tepelná kapacita	405	420	1047.6
Tepelná vodivosť	14.6	2.1	0.188

Výsledky ukazujú, že model s vrstvou TBC v simulácii za rovnakých podmienok tepelného zaťaženia vykazuje na studenej strane teploty vzorky 582,2 °C, zatiaľ čo materiál bez TBC vykazuje teplotu 700,2 °C. Grafické znázornenie závislosti teploty od času tejto simulácie je na obrázku 9. Existuje tiež pozitívny vplyv vrstvy TBC pri poskytovaní odolnosti proti

teplnému toku cez plochu povrchu vzorky. Výsledky výpočtovej simulácie boli potom konfrontované s výsledkami experimentov uskutočnených v laboratóriu s použitím plynového horáka a infračervenej kamery a sú v priamej zhode s nameranými údajmi z experimentov s horákom umiestneným vo vzdialenosti 10 cm od vzorky. (Teplota na horúcej strane vzorky dosiahla približne 1 000 °C).

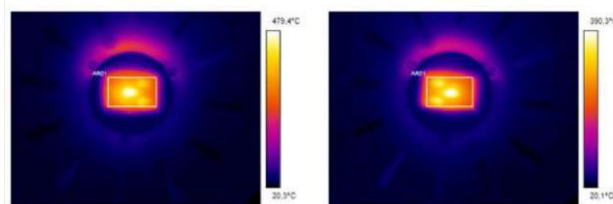


Bez TBC

S TBC

Obrázok 9: Simulácia teploty

Termokamera typu FLIR A40M používaná na skenovanie je pripojená k počítaču prostredníctvom rozhrania FireWire IEEE-1394. Obrázok 10 zobrazuje tepelné obrazy pre vzorku bez vrstvy TBC a vzorky potiahnuté TBC vo vzdialenosti 10 cm medzi horákom a držiakom vzorky. Výsledky experimentov vykonaných v laboratóriu budú konfrontované s výsledkami simulácie v softvérovom nástroji CREO 3.0.

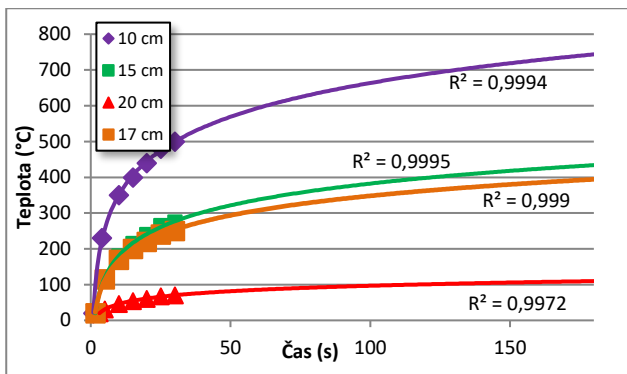


Bez TBC

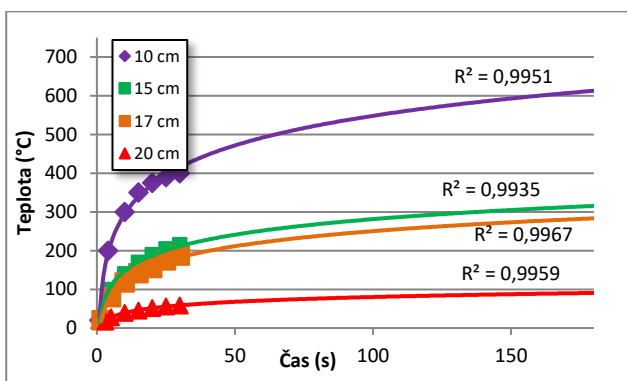
S TBC

Obrázok 10: Infračervená kamera - fotografie vzoriek studenej strany - vzdialenosť horáka: 10 cm

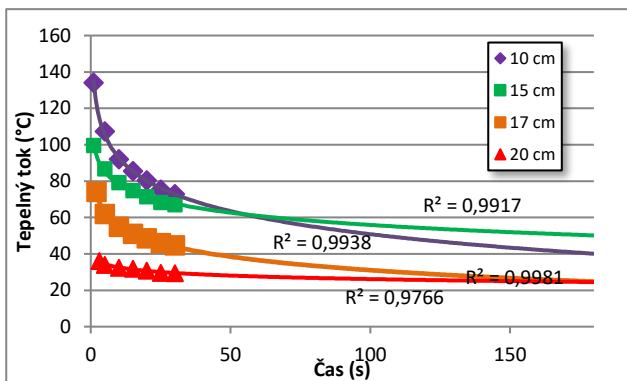
Graf závislosti teploty na čase so stanovenými tendenčnými čiarami pre vzdialenosti 10, 15, 17 a 20 cm medzi horákom a držiakom vzorky je na obrázku 11 pre vzorky bez povlaku a na obrázku 12 pre vzorky s TBC povlakom. Ako je znázornené, trend zvyšovania teploty pri konštantnom prítoku tepla z horáka má logaritmický priebeh zvyšovania pre obe vzorky rovnakým spôsobom, ako bolo vidieť na obrázku 7, získanom výpočtovou simuláciou. Na určenie tepelného toku cez oblasť vzorky môžeme použiť vzorec. Podobne sú teda pomocou výpočtu spracované aj tendenčné čiary pre tepelný tok na obrázku 10a) pre vzorky bez povlaku a na obrázku 10b) pre vzorky s TBC povlakom.



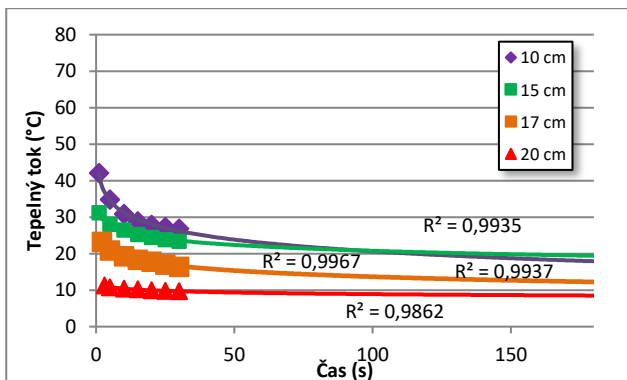
Obrázok 11: Tendencia zvyšovania teplôt vzoriek bez povlaku



Obrázok 12: Tendencia zvyšovania teplôt vzoriek s povlakom

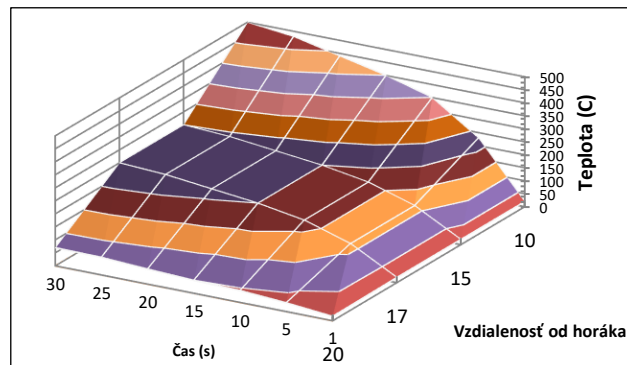


Obrázok 13: Tendencia tepelného toku cez vzorky bez povlaku

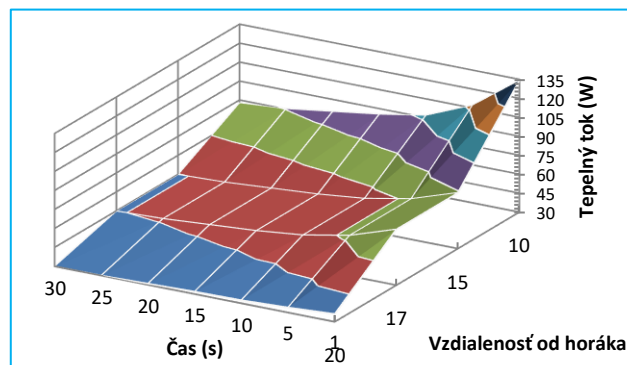


Obrázok 14: Tendencia tepelného toku cez vzorky s povlakom

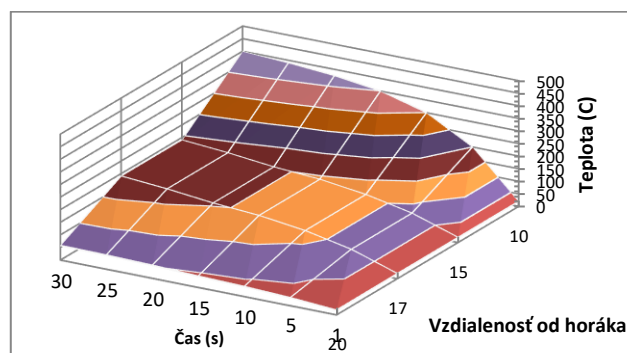
Ak použijeme všetky experimentálne výsledky merania pre každú vzdialenosť medzi horákom a vzorkou bez TBC na vytvorenie grafu povrchovej grafickej závislosti, získame 3D graf znázornený na obrázku 13 pre teplotné správanie a na obrázku 14 pre správanie sa tepelného toku v závislosti od času. Tu je jasne vidieť, že zväčšenie vzdialenosti medzi horákom a vzorkou vedie k zníženiu maximálnej teploty získanej počas časového obdobia experimentu. Tiež tepelný tok cez vzorku rýchlo klesá so zväčšenou vzdialenosťou od horáka.



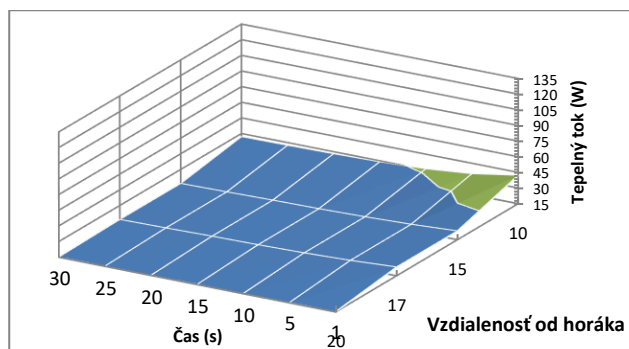
Obrázok 15: Správanie teploty vzorky bez TBC



Obrázok 16: Správanie tepelného toku cez vzorku bez TBC



Obrázok 17: Správanie teploty vzorky s TBC (vľavo)



Obrázok 18: Správanie tepelného toku cez vzorku s TBC

Rovnaké skutočnosti sú zrejme pre 3D graf vzorky s vrstvou TBC na obrázku 17 a 18.

Ale v porovnaní so vzorkou bez vrstvy TBC tu vidíme nižšiu maximálnu získanú teplotu počas doby experimentu a oveľa nižší tepelný tok cez vzorku - takmer 3 krát nižší ako tepelný tok vo vzorke bez TBC.

IV. ZÁVER

Na základe vyššie uvedených experimentov a simulácií je možné zhrnúť tieto závery: Výpočtová simulácia pomocou počítačovej technológie a softvéru, ktorý je k dispozícii, ukazuje pozitívny vplyv povlaku TBC na zníženie prehriatia základného materiálu (EI435). Presnosť výsledkov simulácií bola potom potvrdená experimentálnymi nameranými hodnotami.

Vzorky povlakované tepelnými bariérami v každej polohe horáka boli prehriate menej ako vzorky bez TBC. Rozdiel teploty dosiahol medzi 20 - 120 °C, v závislosti od vzdialenosti horáka a trvania pôsobenia.

Na základe pôvodne nameraných hodnôt sa vytvorila tendencia dlhodobého vystavenia vysokým teplotám, ktorý poskytuje dôkaz o priebehu zvýšenia teploty. Zvýšenie teploty v priebehu času pri konštantnej tepelnej energii vykazuje logaritmický rast. Vypočítaný tepelný tok materiálom má naopak klesajúcu tendenciu, opačnú ako logaritmické zvyšovanie teploty.

Na tomto základe môžeme hovoriť o pozitívnom vplyve vrstvy TBC na ochranu materiálu pred vysokými teplotami a súvisiacou chemickou oxidáciou pri vysokých teplotách plynu.

POĎAKOVANIE

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **KEGA 048ŽU-4/2020** s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

REFERENCIE

[1] NOVÁK, A., KANDERA, B.: Všeobecné znalosti o lietadle : prístrojové vybavenie - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2004, - ISBN 80-8070-212-8

- [2] BUGAJ, M., NOVÁK, A.: Všeobecné znalosti o lietadle : drak a systémy, elektrický systém,. - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2004, - ISBN 80-8070-210-1
- [3] KRÍŽ, J., BLAŠKO, P., NOVÁK, A.: Monitorovanie leteckých motorov, In: Zvyšovanie bezpečnosti a kvality v civilnom a vojenskom letectve, Žilina, 18.19.4.2013. - Žilina: Žilinská univerzita, 2013. - ISBN 978-80-554-0665-7. - S. 63-67.
- [4] KRÍŽ, J.: Pohonná jednotka : JAA ATPL výcvik - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2008. - 285 s., AH 24,52, VH 25,06 : obr., tab. - ISBN 978-80-8070-872-6
- [5] BUGAJ, M. KRÍŽ, J., NOVÁK, A.: Bezpečnosť leteckej dopravy a kvalita výchovy, In: Zvyšovanie bezpečnosti a kvality v civilnom a vojenskom letectve, [zborník z medzinárodnej konferencie], Žilina, 23.-24.4.2009. - V Žiline: Žilinská univerzita, 2009. - ISBN 978-80-554-0007-5. - S. 10-14.
- [6] PALIČKA, L. – NOVÁK, A. – KANDERA, B. 2004. Úvod do elektrotechniky a rádiokomunikačnej prevádzky pre poslucháčov fakulty PEDas. Žilina: EDIS, 2004. 95 s.
- [7] CAE, Gas Turbine engine: Aircraft Technical Book Company, 2016, ISBN 9780989754767
- [8] BERNSTEIN, H.L., "High Temperature Coatings for Industrial Gas Turbine Users," Proceedings of the 28th Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, p. 179, 1999.
- [9] BERNSTEIN H.L., "Materials Issues for Users of Gas Turbines," Proceedings of the 27th Texas A&M Turbomachinery Symposium, (1998).
- [10] LAVOIE, R., AND MCMORDIE, B.G., "Measuring Surface Finish of Compressor Airfoils Protected by Environmentally Resistant Coatings," 30th Annual Aerospace/Airline Plating and Metal Finishing Forum, April 1994.
- [11] MCMORDIE, B.G., "Impact of Smooth Coatings on the Efficiency of Modern Turbomachinery," 2000 Aerospace/Airline Plating & Metal Finishing Forum Cincinnati, Ohio, March 2000.
- [12] SCHILKE, P.W., "Advanced Gas Turbine Materials and Coatings," 39th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar, NY, August 1996.
- [13] WARNES B.M., AND HAMPSON L.M., "Extending the Service Life of Gas Turbine Hardware," ASME 2000-GT-559 2000.
- [14] WOOD, M.I., "Developments in Blade Coatings: Extending the Life of Blades? Reducing Lifetime Costs?," CCGT Generation, March 1999, IIR Ltd.
- [15] FOZO, L., ČERNAN, J., CÚTTOVÁ, M., RATKOVSKÁ, K. & ADAMČÍK, F. 2017. Effect of TBC on heat transfer into nickel based refractory alloy. SAMI 2017 - IEEE 15th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings 7880348, pages 435-438

Bc. Mário Novakov – narodený v Trnave absolvoval v roku 2015 absolvoval SoŠ Obchodu a Služieb v Trnave, následne po tom nastúpil na Žilinskú univerzitu v roku 2015 v odbore profesionálny pilot.