

VYBRANÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PROJEKTU CESEN

SELECTED RESULTS OF THE CESEN PROJECT SOLVING

Pavel Polach ^{a)}, Šárka Houdková ^{a)} a Michal Hajžman ^{b)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

^{b)} Západočeská univerzita v Plzni, NTIS, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Abstrakt

V příspěvku jsou stručně představeny dva vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (akronym CESEN) dosažené v roce 2018: porovnání vlastností žárových nástříků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrační lopatek parních turbín.

Abstract

The paper presents in brief two selected results of the Competence Centre Project of the Technology Agency of the Czech Republic “Centre of research and experimental development of reliable energy production” (CESEN acronym) achieved in 2018: comparison of properties of thermally-sprayed coatings with other types of surface treatment of power producing equipment parts and advanced numerical solution of steam turbines blade vibration.

Úvod

Řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1] (akronym CESEN; projekt v rámci programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky) bylo zahájeno v roce 2012 a bude dokončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu je přispět prostřednictvím aplikací výsledků výzkumu a vývoje nových technologií a materiálů ke dlouhodobému zajištění bezpečných, spolehlivých a ekonomicky dostupných klasických tepelných a jaderných zdrojů elektrické energie.

Řešitelskými pracovišti jsou Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (příjemce projektu), ČEZ, a. s., Doosan Škoda Power s.r.o., Západočeská univerzita v Plzni, České vysoké učení technické v Praze, MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., TES s.r.o. a ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov. Aktualizovaná odborná náplň řešení projektu byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v roce 2016 [2]. Vybrané výsledky řešení projektu dosažené v letech 2016 a 2017 byly prezentovány v následujících ročnících této konference [3], [4].

V roce 2018 bylo dosaženo při řešení projektu celkem 11 odborných výsledků:

software pro řešení vibrační perturbovaných olopatkovaných disků a turbogenerátorů s Lafoonovými zářezy,

software pro tvorbu celkového matematického modelu turbosoustrojí včetně perturbovaných olopatkovaných disků, rotorových čepů, ucpávek, ložisek, lože a turbogenerátorů s vinutím, certifikovaná metodika pro určování základních mechanických vlastností vybraných materiálů z výsledků penetračních testů při použití neuronových sítí,

metodika pro analýzu proudění a přenosu tepla v úzkých kanálech turbínových komponent a v ucpávkách,

metodika termografického měření meze únavy materiálu,

matematické modely vybraných točivých strojů pro systém včasného varování (EWS/CBM) v elektrárnách,

metodika pro optimální rozhodování o opravách a výměnách komponent energetických zařízení,

optimalizace provozu centrálního úložiště technologických dat ČEZ, a. s.,

porovnání výsledků hodnocení žárovevnosti stejných materiálů klasickou metodou, metodou zrychlených creepů (ACT) a metodou malých vzorků (SPCT),
porovnání vlastností žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení,
shrnutí poznatků o termografických metodách a o možnostech jejich využití pro diagnostiku energetických zařízení.

V tomto příspěvku jsou stručně představeny dva výsledky řešení projektu: porovnání vlastností vybraných žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrací lopatek parních turbín.

Porovnání vlastností vybraných žárových nástřiků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení

V rámci řešení projektu bylo provedeno vzájemné porovnání vlastností vybraných žárově stříkaných povlaků deponovaných pomocí technologie HP/HVOF s konkurenčními technologiemi povrchových ochran. Materiály povlaků byly zvoleny (na základě předchozích zkušeností) s ohledem na jejich potenciál odolávat mechanickému namáhání za vysokých teplot a v korozně agresivním prostředí.

V porovnávací studii [5] jsou hodnoceny materiály povlaků na bázi karbidu chromu s různými typy matrice: Cr_3C_2 -25%NiCr, Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY, Cr_3C_2 -50%NiCrMoNb, povlaky na bázi superslitin Co a Ni: Stellite 6, Hastelloy C-276, NiCrBSi, CoCrAlYTCSi a experimentální materiál na bázi karbonitridu titanu: (Ti,Mo)(C,N)-27%Ni. Nástřikové parametry pro jednotlivé materiály byly optimalizovány na základě hodnocení mikrostruktury, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v předchozích etapách řešení projektu. Pro přípravu vzorků hodnocení mechanických vlastností a korozní odolnosti byly použity parametry vedoucí k nástřiku s nejlepšími sledovanými vlastnostmi.

Jako alternativní povrchová úprava byly zvoleny laserový návar Stellite 6, dva typy nitrídaných povrchů oceli X22 (s TiH a bez TiH) a PVD vrstvy TiAlN, ZrBCSi a HFBSiC.

Mikrotvrdot žárovo stříkaných povlaků byla hodnocena na příčném řezu povlakem při zatížení 300 gramů, přibližně ve středu povlaku paralelně s rozhraním. Na každém řezu byly provedeny minimálně 7 vtisků; byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Mikrotvrdot laserového návaru Stellite 6 byla měřena na příčném řezu povlakem. Byl hodnocen hloubkový profil tvrdosti ve dvou různých místech. Jako výsledná hodnota tvrdosti byl použit aritmetický průměr hodnot HV 0.3, měřených v materiálu povlaku bez ovlivnění substrátem. HV 0.3 bylo stanoveno z celkem 14 měření. Hodnocení abrazivní odolnosti bylo provedeno pomocí testu ASTM G-65. Pro každý povlak byly provedeny dva testy. Rychlost opotřebení [mm^3/m] byla stanovena pomocí změřeného hmotnostního úbytku a naměřených hodnot měrné hustoty. Mechanismus opotřebení byl hodnocen pomocí elektronové mikroskopie. Podmínky testu jsou podrobně popsány ve výzkumné zprávě [6]. Kluzné vlastnosti byly hodnoceny na základě výsledků testu dle ASTM G-133 (oscilační vratný pohyb ocelové kuličky proti obroušenému povrchu povlaku). Při testu byl snímán koeficient tření. Na závěr byla, na základě stanovení profilu stopy po opotřebení a určení objemového úbytku, hodnocena odolnost povlaku proti opotřebení [$\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$].

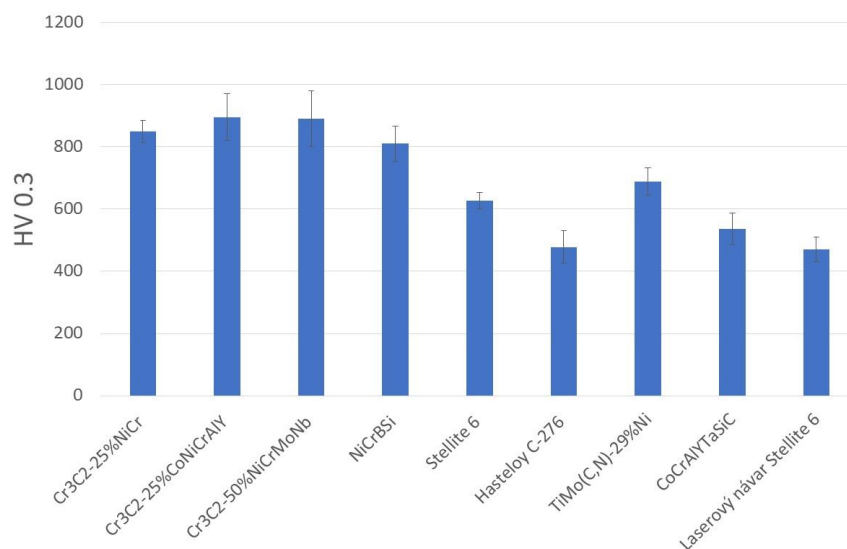
Odolnost proti vysokoteplotní korozi a proti spalinám byla hodnocena na vybraných HVOF stříkaných povlacích a na laserovém návaru Stellite 6. Jako korozní médium byla použita sůl o chemickém složení 18% Na_2SO_4 82% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Metodika testování je podrobně popsána ve výzkumné zprávě [7].

Erozní odolnost povlaků a alternativních povrchových úprav (nitridace, PVD povlak) byla hodnocena pomocí testu erozní odolnosti pevnými částicemi. Detaily testu jsou uvedeny ve

výzkumné zprávě [8]. Pro vybrané typy povlaků byl realizován test odolnosti proti opotřebení vodními kapkami.

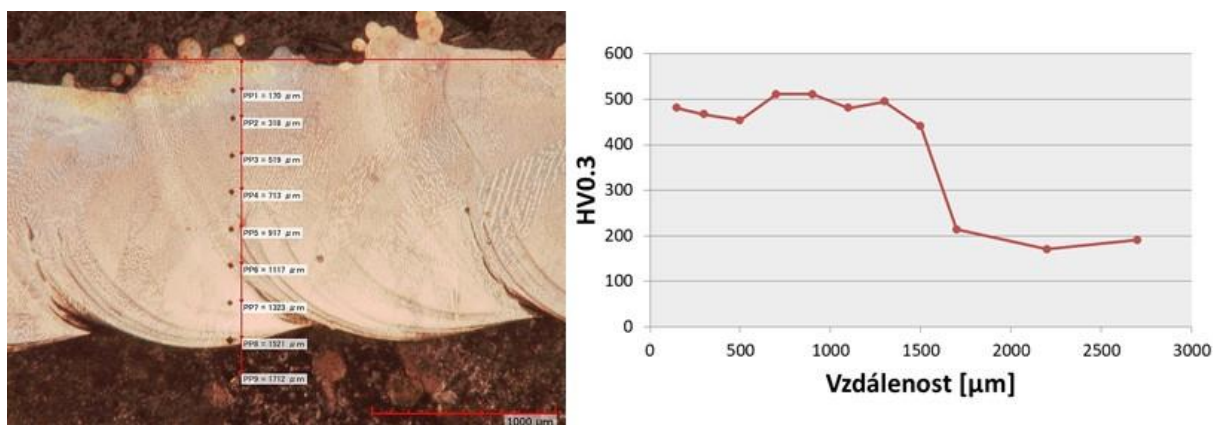
Vybrané výsledky jsou uvedeny v grafech na obr. 1 až obr. 6.

Porovnání průměrných hodnot tvrdosti HV 0.3 hodnocených žárově stříkaných povlaků a laserového návaru je uvedeno v grafu na obr. 1. Tvrdost povlaku Stellite 6, navařeného laserem, je v porovnání s povlakem stříkaným HVOF nižší, srovnatelná s nejměkčím HVOF nástřikem Hastelloy C-276.



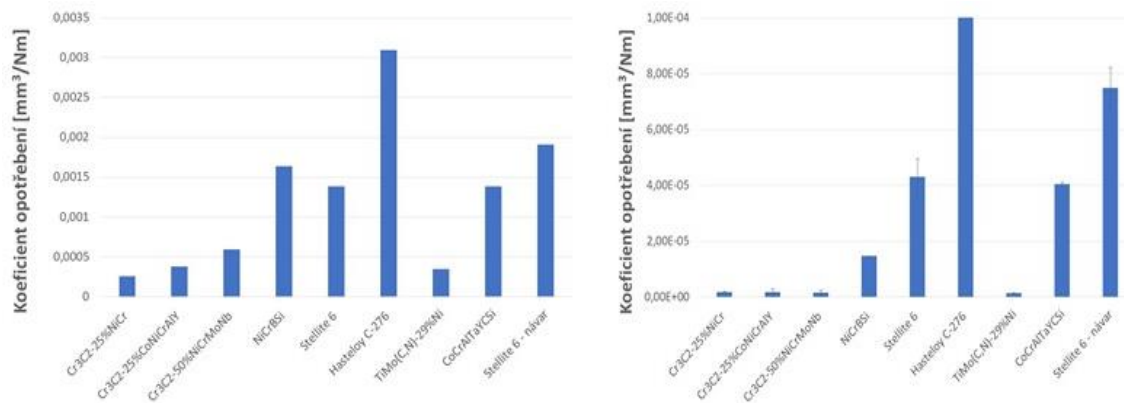
Obr. 1: Porovnání hodnot mikrotvrdosti HV 0.3, měřené na příčném řezu povlaky

Na obr. 2 je znázorněn hloubkový profil tvrdosti HV 0.3 laserového návaru Stellite 6. Tvrdost je mírným způsobem ovlivněná překryvem – v oblasti překryvu je hodnota HV 0.3 nižší, což odpovídá více hrubozrnné struktuře po přetavení.



Obr. 2: Hloubkový profil tvrdosti laserového návaru Stellite 6

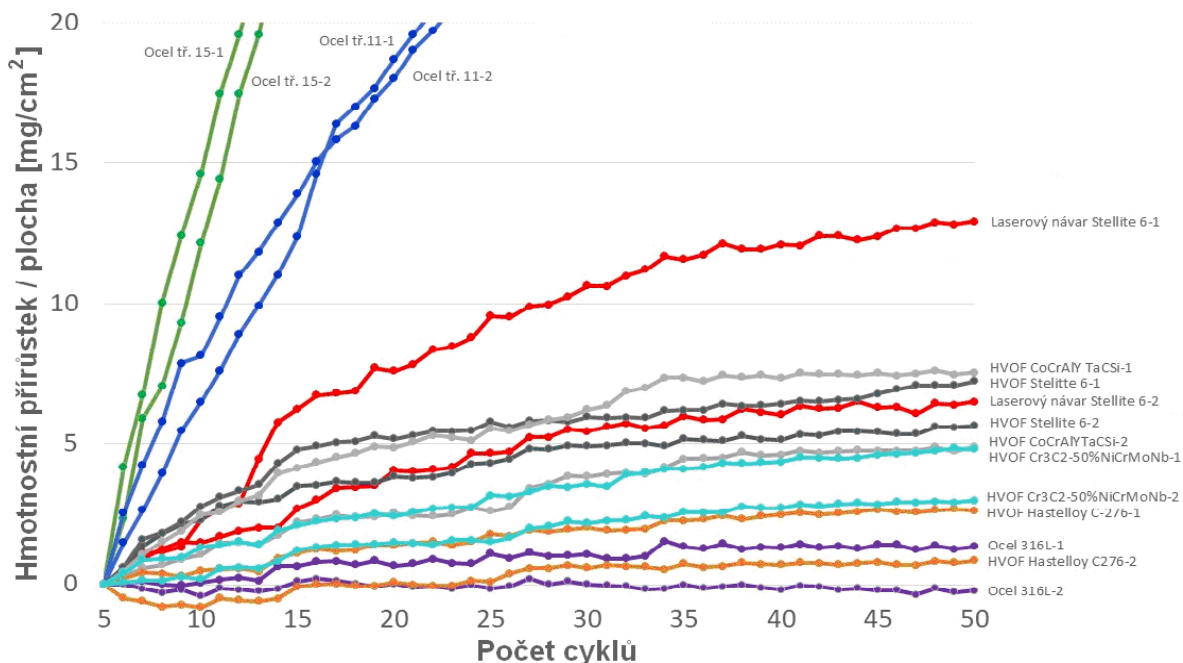
Odolnost proti abrazivnímu i kluznému a kluznému opotřebení laserového návaru Stellite 6 v porovnání s HVOF nástřiky je uvedena na obr. 3. Odolnost návaru je nižší než HVOF nástřiku Stellite 6 či CoCrAlTaSiC slitiny a výrazně nižší než odolnost HVOF cermetových nástřiků, nicméně je vyšší než odolnost HVOF povlaku Hastelloy C-276, a to i přes srovnatelnou mikrotvrdost obou povlaků (obr. 1).



Obr. 3: Koeficient opotřebení HVOF povlaků a laserového návaru Stellite 6 při zkoušce dle ASTM G-65 (vlevo) a ASTM G-133 (vpravo)

Výsledky hodnocení odolnosti HVOF stříkaných povlaků proti vysokoteplotní korozi v prostředí 18% Na₂SO₄ 82% Fe₂(SO₄)₃, odpovídajícímu prostředí ve fluidních spalovacích kotlích na pevná paliva (uhlí), jsou uvedeny v grafu na obr. 4.

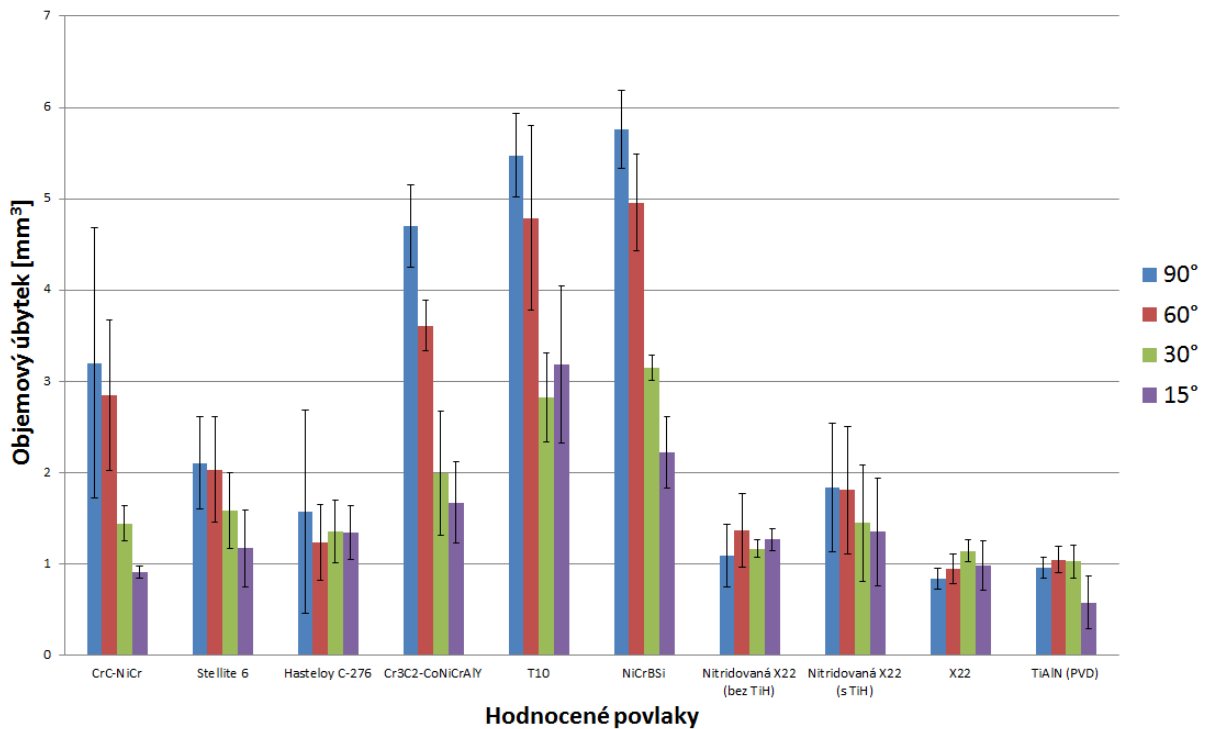
Z těchto výsledků je zjevné, že nejvíce v daném prostředí korodoval samotný substrát z oceli třídy 11 a z oceli třídy 15. Naopak, substrát z chromové oceli 316L byl v daném prostředí téměř inertní. Korozní odolnost povlaků na bázi Stellite (HVOF Stellite 6, HVOF CoCrAlYTaSiC a laserový návar Stellite 6) měla obdobný charakter. V rámci chyby obou dvou měření pro jeden materiál lze považovat jejich korozní odolnost za identickou (tzn. lze konstatovat, že není rozdíl mezi laserovým návarem a HVOF nástřikem). Vyšší korozní odolnost byla pozorována u povlaků na bázi Ni (slitina Hastelloy C-276) a také nástřik Cr₃C₂-50%NiCrMoNb, který kromě odolnosti proti korozi má i vynikající mechanické vlastnosti.



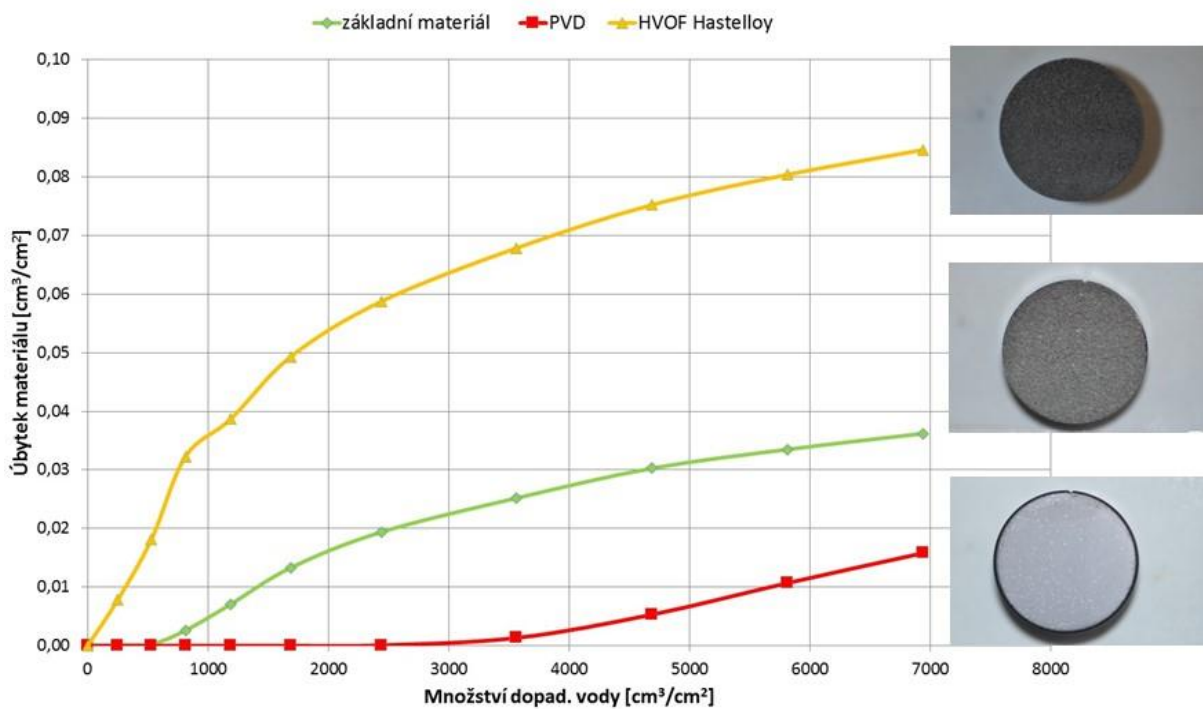
Obr. 4: Kumulativní hmotnostní přírůstek v závislosti na počtu cyklů

Výsledky hodnocení odolnosti proti eroznímu opotřebení pevnými částicemi jsou uvedeny v grafu na obr. 5. Z výsledků je patrné, že erozní odolnost HVOF stříkaných povlaků není příliš vysoká, a to ani ve srovnání se samotným základním materiálem. Nejlepších výsledků dosáhl

povlaky na bázi Stellite 6 a Hastelloy C-276, ale ani ty nelze doporučit jako účinné ke zvýšení odolnosti proti eroznímu opotřebení. Na rozdíl od abrazivního a kluzného opotřebení, kde je výhodou vyšší tvrdost povlaků na bázi cermetů, je v případě odolnosti proti eroznímu opotřebení rozhodující kohezní pevnost a houževnatost povlaků.



Obr. 5: Porovnání erozní odolnosti povlaků při dopadu erodentu pod různými úhly



Obr. 6: Objemový úbytek při testu erozní odolnosti vodními kapkami

Další test byl zaměřen na porovnání odolnosti proti působení vodních kapek na materiál povlaku HVOF nástřiku Hastelloy C-276, který prokázal ve zkouškách erozní odolnosti nejlepší vlastnosti (obr. 6). Jeho odolnost proti působení vodních kapek byla porovnána s odolností referenční PVD vrstvy a samotného základního materiálu. I v tomto případě se HVOF nástřik ukázal jako nevhodný k ochraně součástí namáhaných dopadem vodních kapek.

Pokročilá numerická analýza vibrací lopatek parních turbín

Jedním z problémů řešených dlouhodobě v rámci projektu je analýza kmitání svazků lopatek a olopatkovaných disků související s životností a spolehlivostí lopatek za provozu. Cílem výzkumu jsou zejména hlubší pochopení dějů při interakci lopatek a návrh optimální konstrukce z pohledu co nejvyšší životnosti, která je úzce spjata s minimalizací amplitud kmitání při nájezdech, dojezdech i při ustáleném provozu turbín.

S využitím vhodného výpočtového modelu olopatkovaného disku lze navrhovat spolehlivé komponenty parních i plynových turbín, přičemž v praxi se pro návrh olopatkovaných disků využívají zejména modely pro analýzu vibrací ve frekvenční oblasti [9], [10]. V této kapitole je stručně představena metodika modelování olopatkovaných disků s interagujícími lopatkami vhodná pro analýzu kmitání v časové oblasti, což přináší jiné informace o řešení problému.

Metodika modelování olopatkovaných disků v časové oblasti je založena na modální analýze rotující a netlumené lopatky, jejíž matematický model lze vyjádřit ve tvaru

$$\mathbf{M}_s \cdot \frac{d^2 \mathbf{q}_s}{dt^2} + (\mathbf{K}_s + \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_{os}) \cdot \mathbf{q}_s = \mathbf{0}, \quad s = 1, 2, \dots, n_B, \quad (1)$$

kde \mathbf{M}_s je matice hmotnosti lopatky, \mathbf{K}_s je matice tuhosti, ω_0 je úhlová rychlost rotoru turbíny, \mathbf{K}_{os} je příspěvek zpevnění za rotace, \mathbf{q}_s je vektor zobecněných souřadnic a n_B je počet lopatek olopatkovaného disku. Výsledkem modální analýzy modelu (3) jsou vlastní frekvence a příslušné vlastní tvary kmitání, které jsou využity pro sestavení spektrální matice Λ , matice modálního tlumení \mathbf{D} a celkové modální matice \mathbf{V} . Výpočtový model samotné lopatky nebo celé výseče včetně části disku je ve většině případů vytvářen ve vybraném komerčním programovém systému na bázi metody konečných prvků, zatímco pro celkový redukovaný model je využíváno vlastní programové vybavení.

Za účelem redukce modelu lze původní konfigurační prostor zobecněných souřadnic olopatkovaného disku transformovat pomocí vztahu

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{q}_{n_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{0} \\ & \mathbf{O} & & \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda & \mathbf{V}_{n_B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{x}_{n_B} \end{bmatrix} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{x}, \quad (2)$$

kde \mathbf{x} je nový konfigurační prostor redukovaného systému.

S využitím této transformace a po další úpravě lze původní plný model přepsat do redukované podoby

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{x} + (\mathbf{D} + \mathbf{V}^T \cdot \omega_0 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}) \cdot \dot{\mathbf{x}} + [\Lambda + \mathbf{V}^T \cdot (\omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_\omega - \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_d) \cdot \mathbf{V}] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{V}^T \cdot (\omega_0^2 \cdot \mathbf{f}_\omega - \mathbf{f}(t)) \quad (3)$$

kde \mathbf{E} je matice s jedničkami na diagonále, \mathbf{G} , \mathbf{K}_ω , \mathbf{K}_d a \mathbf{f}_ω reprezentují vlivy rotace a $\mathbf{f}(t)$ je vektor zobecněných vnějších sil. Výhodou tohoto přístupu je, že spektrální matici, modální matici a ostatní matice a vektor reprezentující vlivy rotace je nutné exportovat z původního softwaru pro jednu konkrétní lopatku pouze na začátku vytváření celkového modelu. Dále už

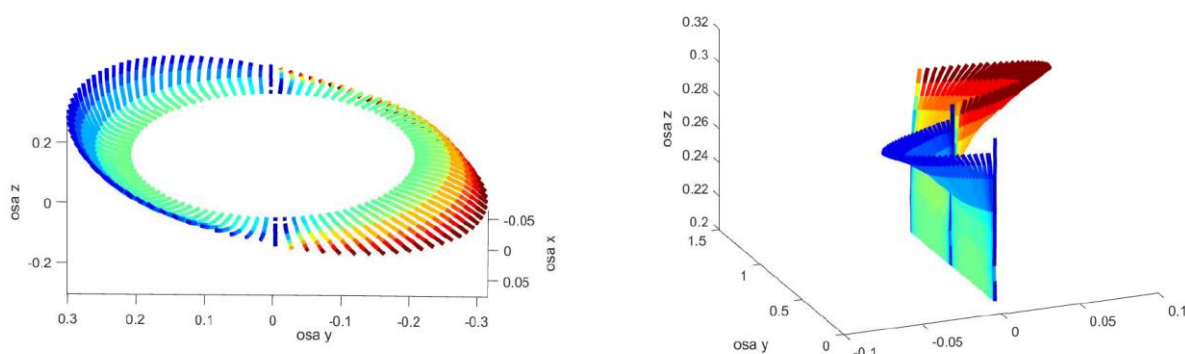
se pracuje pouze s redukovanými maticemi, které jsou buď konstantní nebo lineárně závislé na úhlové rychlosti disku.

Po zavedení nelineárních vazeb mezi jednotlivými lopatkami má celkový model tvar

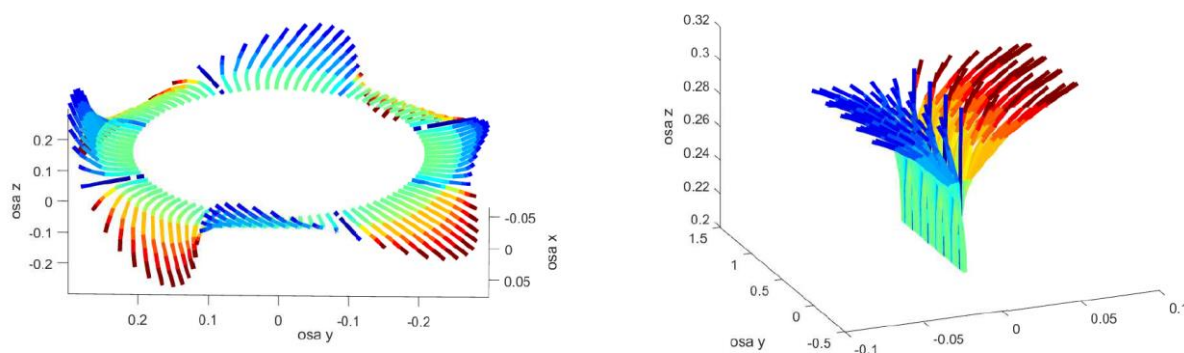
$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{x} + \left(\mathbf{D} + \mathbf{V}^T \cdot \omega_0 \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{V} + \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{B}_c \cdot \mathbf{V} \right) \cdot \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \left[\mathbf{A} + \mathbf{V}^T \cdot \left(\omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_\omega - \omega_0^2 \cdot \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_c \right) \cdot \mathbf{V} \right] \cdot \mathbf{x} = \mathbf{V}^T \cdot \left(\omega_0^2 \cdot \mathbf{f}_\omega - \mathbf{f}(t) \right) \quad (4)$$

kde $\mathbf{B}_c = \sum_{i=1}^{n_B} \mathbf{B}_i$ a $\mathbf{K}_c = \sum_{i=1}^{n_B} \mathbf{K}_i$ jsou celkové vazební matice a \mathbf{B}_i , \mathbf{K}_i popisují vazbu mezi konkrétní lopatkou i a lopatkou $i + 1$ (jestliže $i = n_B$ potom $i + 1 = 1$). Nelineární vazební síly jsou vyjádřeny vektorem $\mathbf{f}(t)$.

Uvedená metodika modelování byla implementována do vlastního programového vybavení v prostředí systému MATLAB (viz např. [11] nebo [12]). Součástí programu jsou i skripty a procedury se zpracovanými postupy pro export potřebných dat jedné lopatky ze softwaru ANSYS (komerční program pro modelování samotné lopatky či výseče). Testování vyvinutých postupů a programového vybavení je podrobně popsáno v dizertační práci [11], ve které je představena aplikace metodiky na reálný olopatkovaný disk. Ukázka vizualizace vlastních tvarů reálného disku je na obr. 7 a obr. 8.



Obr. 7: Vizualizace třetího vlastního tvaru olopatkovaného disku



Obr. 8: Vizualizace osmého vlastního tvaru olopatkovaného disku

Závěr

V příspěvku je uveden výčet výsledků řešení projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci byl vytvořen i tento příspěvek) dosažených v roce 2018 a dva z nich jsou stručně představeny (porovnání vlastností žárových nástříků s jinými typy povrchových ochran komponent energetických zařízení a pokročilé numerické řešení vibrací lopatek parních turbín).

Na rok 2019 je plánováno dosažení 29 odborných výsledků řešení projektu.

Literatura

- [1] Polach, P. (2012): Energetické centrum kompetence. *Sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 107-116. ISBN 978-80-261-0153-6
- [2] Polach, P. (2016): Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu. *Sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 145-150. ISBN 978-80-261-0644-9
- [3] Polach, P., Černý, V., Václavík, J. (2017): Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu. *Sborník 12. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 91-96. ISBN 978-80-261-0741-5
- [4] Polach, P., Černý, J., Houdková, Š. (2018): Energetické centrum kompetence: vybrané výsledky druhé fáze řešení projektu II. *Sborník 13. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 137-142. ISBN 978-80-261-0794-1
- [5] Houdková, Š., Česánek, Z. (2018): *Porovnání žárových nástřiků s konkurenčními typy povrchových ochranných vrstev*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/18/028, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [6] Houdková, Š., Česánek, Z. (2017): *Tepelně-mechanické vlastnosti vybraných žárově stříkaných povlaků*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/042, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [7] Česánek, Z., Kopelentová, K., Houdková, Š. (2016): *Hodnocení odolnosti vybraných žárových nástřiků proti vysokoteplotní korozi*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/056, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [8] Česánek, Z., Houdková, Š. (2016): *Porovnání erozivní odolnosti konkurenčních povrchových úprav*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/16/005, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [9] Voldřich, J., Lazar, J., Polach, P., Morávka, Š. (2017): Finding the stiffnesses of interface contact elements for the computational model of steam turbine blading. *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2017)*, Volume 8: 29th Conference on Mechanical Vibration and Noise. ASME, Cleveland (Ohio, USA), paper No. DETC2017-67712, pp. V008T12A018. ISBN 978-0-7918-5822-6
- [10] Zeman, V., Byrtus, M., Hajžman, M. (2010): *Harmonic forced vibration of two rotating blades with friction damping*. Engineering Mechanics, Vol. 17, No. 3/4, pp. 187-200. ISSN 1802-1484
- [11] Rycheký, D. (2018): *Modelování poddajných rotujících těles s kontaktními vazbami*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- [12] Pešek, L., Hajžman, M., Půst, L., Zeman, V., Byrtus, M., Brůha, J. (2015): *Experimental and numerical investigation of friction element dissipative effects in blade shrouding*. Nonlinear Dynamics, Vol. 79, No. 3, pp. 1711-1726. ISSN 0924-090X