

ENERGETICKÉ CENTRUM KOMPETENCE: VYBRANÉ VÝSLEDKY DRUHÉ FÁZE ŘEŠENÍ PROJEKTU II

ENERGY PRODUCTION COMPETENCE CENTRE: SELECTED RESULTS OF THE SECOND STAGE OF THE PROJECT SOLVING II

Pavel Polach^{a)}, Josef Černý^{b)} a Šárka Houdková^{a)}

^{a)} Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

^{b)} ENERGOSERVIS, spol. s r.o. Chomutov

Abstrakt

V příspěvku jsou stručně představeny dva vybrané výsledky řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ dosažené v roce 2017: vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace.

Abstract

The paper presents in brief two selected results of the Competence Centre Project of Technology Agency of the Czech Republic “Centre of research and experimental development of reliable energy production” achieved in 2017: developed equipment and methods for contactless magnetic inspection of turbine blades and summary of mechanical and corrosive properties of optimized thermally-sprayed coatings determined for high-temperature applications.

Úvod

Řešení projektu „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ [1], [2] (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, podle které je řešen projekt od roku 2016, byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách ve stejném roce [2]. Vybrané výsledky řešení projektu dosažené v roce 2016 byly prezentovány na 12. ročníku této konference v roce následujícím [3].

V roce 2017 mělo být (a bylo) dosaženo při řešení projektu celkem 9 odborných výsledků:

1. laboratorní odzkoušení kontrolního systému trubek tepelných výměníků,
2. metodika a programové moduly pro analýzu proudění a přenosu tepla, simulace tepelného zatížení částí vysokotlakého dílu parní turbíny,
3. certifikovaná metodika pro stanovení J-R křivek konstrukčních materiálů z výsledků penetračního testu,
4. výpočetní model interakce lopatky s proudící tekutinou s dynamickou odezvou,
5. vyhodnocení nejvhodnějšího referenčního povlaku pro termovizní měření za zvýšených teplot,
6. shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace,

7. metodika optimalizace spolehlivosti a životnosti turbín a dalších klíčových zařízení v energetice,
8. prototyp referenčního termografického povlaku pro přesné bezkontaktní měření povrchové teploty objektů pomocí termovizních kamer,
9. komplexní výpočetní model (založený na metodě konečných prvků) pro stanovení dynamických vlastností rotorových soustav parních turbín.

V tomto příspěvku jsou stručně představeny dva výsledky řešení projektu: vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace.

Vývoj zařízení a metodiky pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek

V rámci řešení projektu byl v roce 2017 dokončen vývoj a realizace stacionárního zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů (viz obr. 1). Vyvinuté zařízení je vhodné ke zkoušení krátkých oběžných lopatek parních turbín a po úpravě pracovního stolu i ke kontrole tyčí tažených lopatkových profilů s obvyklou délkou 4 metry. Pro kontrolu výrobků bezkontaktní kombinovanou magnetizací, s jejímž využitím lze v průběhu jednoho magnetizačního kroku detekovat výrobní trhliny bez ohledu na jejich orientaci.

Při zahájení vývoje zařízení byly definovány potřebné vstupní parametry, tj. velikost kontrolovaných lopatek, jejich konstrukční detaily atd. Byla stanovena podmínka, že navrhované zařízení musí být schopné kontrolovat lopatky vyráběné z tažených profilů a frézované lopatky (tzn. s úchytem lopatky do drážky disku nebo bubnu rotoru), a to i s integrovanou bandáží. Tvary těchto lopatek jsou geometricky složité a pro zajištění detekovatelnosti trhlín různé orientace je nutné vytvořit točivé magnetické pole dostatečné intenzity.

Zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů konstrukčně sestává z:

1. vlastního magnetizačního zdroje s příslušnou elektrovýstrojí,
2. kontrolního a regulačního systému,
3. dopravníku,
4. zařízení pro nanášení a zpětné jímání detekční kapaliny,
5. kontrolního pracoviště vybaveného zdrojem UV světla a příčnými etalony,
6. pomocných zařízení, která jsou nezbytná pro správné provedení kontroly.

Řešení pracoviště je provedeno tak, aby v závislosti na technických požadavcích a ekonomických možnostech provozovatele umožňovalo variabilitu svého uspořádání a aby jeho obsluhu byl schopen zajistit jeden člověk.

Na rychlost kontroly má vliv nejen uspořádání celého pracoviště, ale i použitý způsob magnetické kontroly. Z několika možností byla zvolena magnetická prášková polévací fluorescenční metoda. Tato metoda je považována za nejcitlivější a nejsnadněji aplikovatelnou metodu u stacionárních zařízení obdobné konstrukce.

Značná pozornost byla věnována výběru magnetizační jednotky. Pohyb dopravníku je nepřerušovaný (druhou možností byl pohyb přerušovaný). Demagnetizace lopatek je prováděna v demagnetizačním tunelu. Jako magnetizační zdroj bylo zvoleno zařízení firmy Tiede s dosažitelným proudem 1 000 A a napětím 42 V. Zdroj s těmito vlastnostmi zajišťuje intenzitu magnetického pole 25 A/cm, nezbytnou pro použití této kontrolní metody.



Obr. 1: Celkový pohled na zařízení pro kontrolu výrobků z feromagnetických materiálů

Shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace

V rámci řešení projektu bylo v roce 2017 provedeno hodnocení a vzájemné porovnání vlastností žárově stříkaných povlaků deponovaných pomocí technologie HP/HVOF. Materiály povlaků byly zvolené (na základě předchozích zkušeností) s ohledem na jejich potenciál odolávat mechanickému namáhání v prostředí vysoké teploty a v korozně agresivním prostředí.

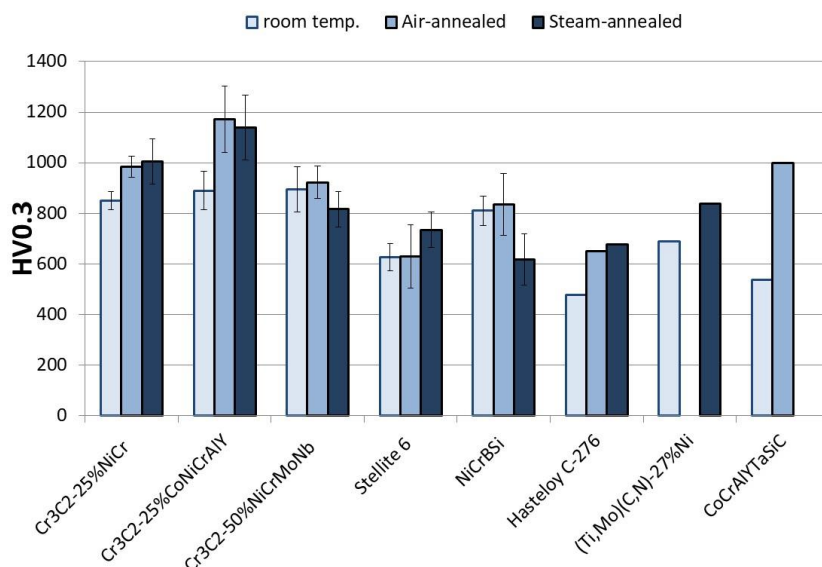
Porovnávací studie [4] obsahuje materiály povlaků na bázi karbidu chromu s různými typy matrice: Cr_3C_2 -25%NiCr, Cr_3C_2 -25%CoNiCrAlY, Cr_3C_2 -50%NiCrMoNb, povlaky na bázi superslitin Co a Ni: Stellite 6, Hastelloy C-276, NiCrBSi, CoCrAlYTaCSi a experimentální materiál na bázi karbonitridu titanu: (Ti,Mo)(C,N)-27%Ni.

Nástřikové parametry pro jednotlivé materiály byly v předchozích etapách řešení projektu optimalizovány na základě hodnocení mikrostruktury, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Pro přípravu vzorků hodnocení mechanických vlastností a korozní odolnosti při pokojové teplotě a při teplotě odpovídající pracovním podmínkám (600 °C) byly použity parametry vedoucí k nástřiku s nejlepšími sledovanými vlastnostmi.

Porovnání odolnosti proti mechanickému zatěžování bylo provedeno na základě testů tvrdosti a mikrotvrdosti, odolnosti proti kluznému opotřebení dle ASTM G-99 (pin-on-disc test) při pokojové a při zvýšené (600 °C) teplotě, odolnosti proti cyklickému kluznému opotřebení dle ASTM G-133 (ball-on-flat test) při pokojové a při zvýšené (600 °C) teplotě, odolnosti proti abrazivnímu opotřebení dle ASTM G-65 (dry sand/rubber wheel test) při pokojové teplotě a odolnosti proti eroznímu opotřebení při pokojové teplotě. Odolnost proti oxidaci byla testována v prostředí horké tlakové páry (609 °C/24 MPa/132 h) ve spolupráci s Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze. Odolnost proti korozi byla testována v agresivním prostředí roztavených solí 40 % Na_2SO_4 60 % V_2O_5 (750 °C/50 cyklů).

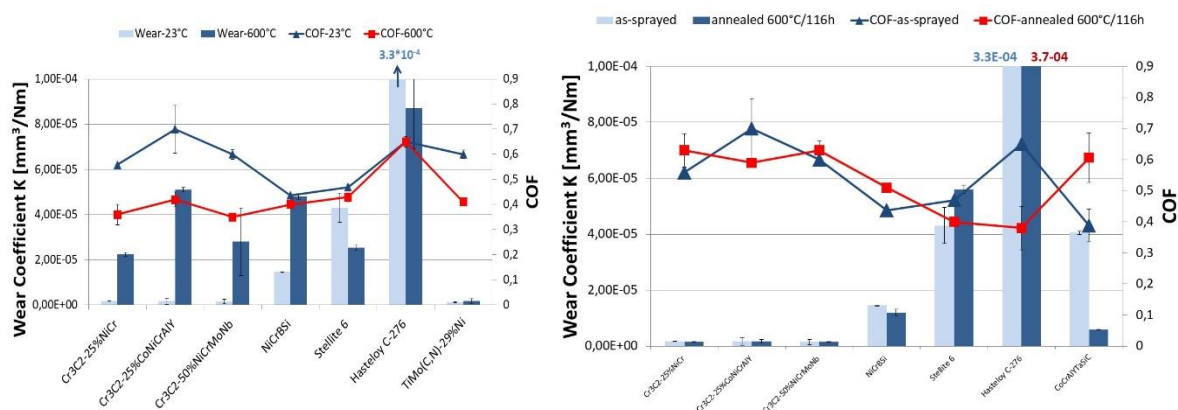
Hodnocení výsledků testů bylo doplněno analýzami mikrostruktury s využitím elektronového mikroskopu ve spolupráci s pracovišti Regionální technologický institut a Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni a XRD analýzami fázového složení ve spolupráci s Ústavem fyziky plazmatu Akademie věd České republiky.

Vybrané výsledky jsou uvedeny v grafech na obr. 2 až obr. 4.



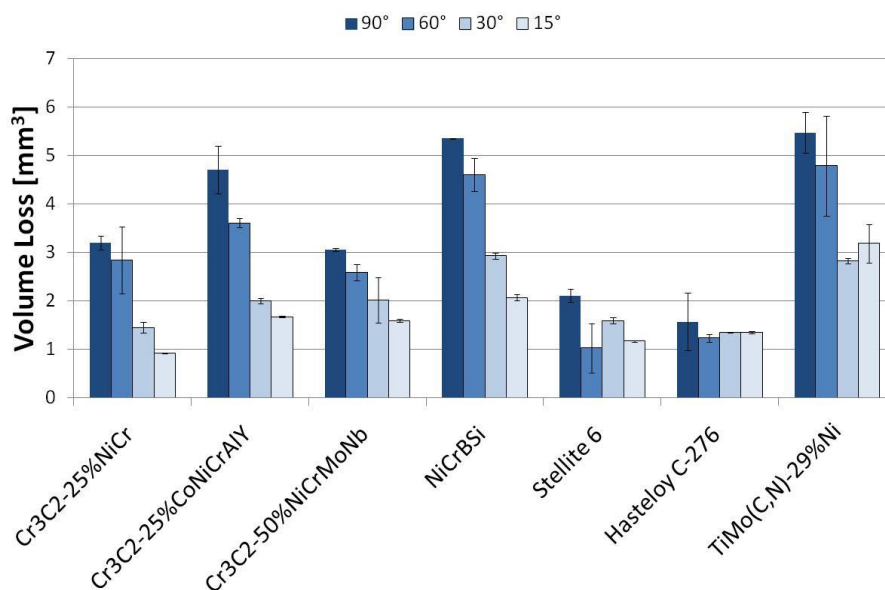
Obr. 2: Porovnání hodnot mikrotvrdosti HV0.3, měřené ve stavu po nástřiku (room temp.), po expozici 600 °C/116 h v horkém vzduchu (Air-annealed) a po expozici v prostředí horké tlakové páry 609 °C/24 MPa/132 h (Steam-annealed)

Mikrotvrdost povlaků na bázi karbidu chromu v kovové matici je dle očekávání vyšší než u povlaků na bázi slitin. Vliv tepelného ovlivnění na jednotlivé typy materiálů je různý, v závislosti na typu tepelně indukovaných změn mikrostruktury. Nárůst mikrotvrdosti u povlaku na bázi CrC souvisí s precipitací sekundárních karbidů z matrice. U slitinových povlaků se jedná o změnu stavu vnitřního pnutí a eventuální precipitaci tvrdých částic (karbidů nebo nitridů).



Obr. 3: Porovnání odolnosti proti kluznému opotřebení, hodnoceného pomocí ASTM G-133 za pokojové teploty ve stavu po nástřiku, při 600 °C a za pokojové teploty ve stavu po expozici 600 °C/116 h na horkém vzduchu

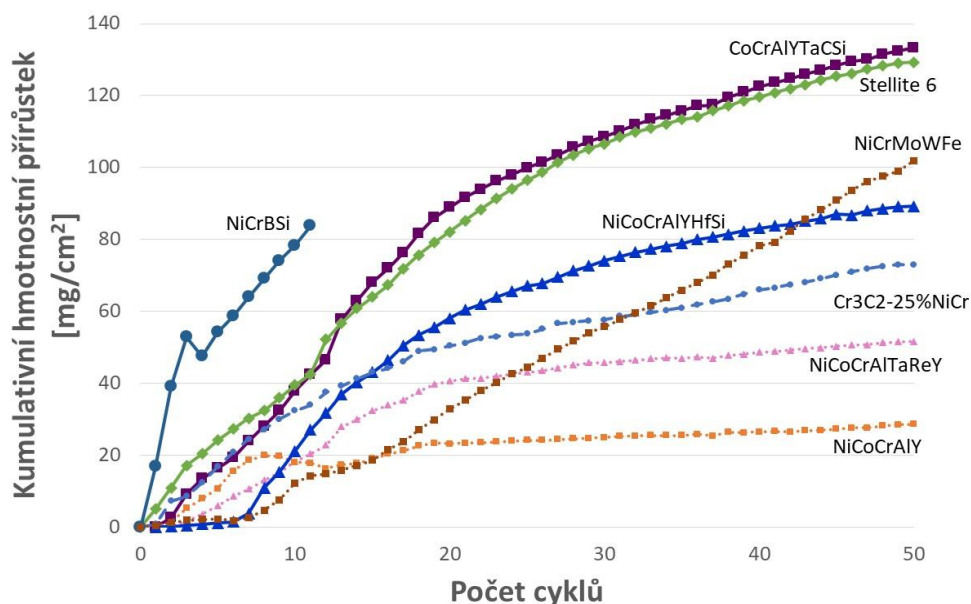
Při pokojové teplotě je, v souladu s očekáváním, odolnost povlaků na bázi karbidů výrazně nižší než u slitinových povlaků. Zatěžování při vysoké teplotě vede ke zvýšení opotřebení u všech hodnocených materiálů vlivem vyšší plastické schopnosti matrice či slitiny. Výjimkou je Stellite 6, u kterého mohla hrát roli zpevnění vlivem deformačně indukované transformace fcc mřížky Co na hcp strukturu s vyšší pevností a povlak Hasteloy C-276, u kterého je patrný pozitivní vliv oxidické vrstvy. Hodnoty opotřebení při vysoké teplotě, naměřené pro povlaky na bázi CrC a slitinové povlaky, jsou srovnatelné. Samotná tepelná expozice má nejednoznačný vliv na hodnocené povlaky, většinou však ne příliš výrazný. Výjimkou je povlak CoCrAlYTaSiC, u kterého tepelné zpracování vedlo k výrazně lepší odolnosti proti opotřebení.



Obr. 4: Porovnání erozní odolnosti povlaků při dopadu erodentu pod různými úhly

Na rozdíl od abrazivního a kluzného opotřebení, kde je výhodou vyšší tvrdost povlaků spojená především s povlaky na bázi cermetů, je v případě odolnosti proti eroznímu opotřebení rozhodující kohezni pevnost a houževnatost povlaků. To je patrné zejména v nízkém erozním úbytku materiálů Stellite 6 a Hasteloy C-276.

Odolnost proti korozi v korozně agresivním prostředí horkých roztavených solí [5] lze posoudit na základě grafu mapujícího přírůstek váhy korozních zplodin na obr. 5. Pro porovnání graf obsahuje i další slitinové povlaky, vhodné k aplikaci v tomto prostředí.



Obr. 5: Graf závislosti kumulovaných hmotnostních přírůstků na čísle cyklu testovaných povlaků během expozice v korozním prostředí 40 % Na₂SO₄ 60 % V₂O₅

Z grafu na obr. 5 je patrné, že nejméně odolným se ukázal povlak NiCrBSi. Naopak, ostatní typy slitin na bázi Ni prokázaly vysokou odolnost v daném korozním prostředí, a to včetně povlaku Hasteloy C-276 (NiCrMoWFe). Matrice NiCr poskytuje odolnost i cermetovému povlaku na bázi karbidu chromu. Obě kobaltové slitiny (Stellite 6 a CoCrAlTaSiC) mají téměř totožnou odolnost v daném prostředí.

V prostředí horké tlakové páry se jako nejvíce odolný ukázal slitinový povlak Hasteloy C-276 a Stellite 6, naopak, jako nevhodný povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-CoNiCrAlY}$ a NiCrBSi .

Na základě provedených experimentů lze zobecnit následující doporučení:

1. Pro aplikace vyžadující vysokou odolnost proti opotřebení za současného působení vysoké teploty je nejvhodnější aplikovat povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-50\%NiCrMoNb}$. Kromě vysoké odolnosti proti oxidaci nabízí srovnatelnou odolnost proti opotřebení a zároveň má vyšší depoziční účinnost.
2. Pro aplikace vyžadující zejména odolnost proti korozi a oxidaci lze doporučit povlak Hastelloy C-276. Jeho další výhodou je vysoká odolnost proti erozi. Při vysokých teplotách jsou jeho vlastnosti, vlivem vzniku oxidické vrstvy, lepší než při pokojové teplotě. Nicméně, je nutné počítat s možným zhoršením houževnatosti vlivem precipitace karbidu.
3. Pro aplikace vyžadující zejména odolnost proti korozi a oxidaci a zároveň i odolnost proti kluznému opotřebení je vhodné aplikovat povlak na bázi Co: Stellite 6 nebo CoCrAlYTaN . Oba povlaky navíc poskytují možnost deformačního zpevnění při zatěžování. Tento efekt je na základě provedených experimentů zřejmý, avšak nebyl zatím detailně zmapován. Roli zde hraje nejen stav povlaku, tedy poměr fcc a hcp uspořádání, ale i míra plastické deformace.
4. Pro aplikace vyžadující dobré kluzné vlastnosti při mírně zvýšených teplotách lze doporučit experimentální povlak $(\text{Ti},\text{Mo})(\text{C},\text{N})\text{-Ni}$.
5. Pro agresivní prostředí horké páry není vhodný povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25\%CoNiCrAlY}$ (od daného výrobce) a povlak NiCrBSi , u kterých se projevila výrazná oxidace.

4. 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 2017 a dva jsou stručně představeny (vyvinuté zařízení a metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek a shrnutí mechanických a korozních vlastností optimalizovaných žárově stříkaných povlaků určených pro vysokoteplotní aplikace).

Na rok 2018 je plánováno dosažení 11 odborných výsledků řešení projektu.

Literatura

- [1] Polach, P. (2012): *Energetické centrum kompetence, sborník 7. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] Polach, P. (2016): *Energetické centrum kompetence: nová fáze řešení projektu, sborník 11. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [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*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] Houdková, Š., Česánek, Z. (2017): *Tepelně-mechanické vlastnosti vybraných žárově stříkaných povlaků, výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/042*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
- [5] Česánek, Z., Kopelentová, K., Houdková, Š. (2017): *Vysokoteplotní koroze žárově stříkaných povlaků aplikovaných technologií HP/HVOF v korozním prostředí Na_2SO_4 – $60\%\text{V}_2\text{O}_5$, výzkumná zpráva, VYZ-VZ-33/17/058*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.