

VÝZNAMNÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PROJEKTU CESEN

SIGNIFICANT RESULTS OF THE CESEN PROJECT SOLVING

Pavel Polach, Michaela Prantnerová, Šárka Houdková, Jan Schubert a Petr Polcar
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

Abstrakt

V příspěvku je uveden výčet nejvýznamnějších výsledků řešení projektu Centra kompetence Technologické agentury České republiky „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (akronym CESEN) a stručně jsou představeny dva vybrané výsledky, dosažené v roce 2019: ověřená technologie vysokoteplotního žárově stříkaného povlaku používaného jako povrchová ochrana vybraných komponent energetických zařízení a způsob monitorování zbytkové životnosti lopatek turbosoustrojí.

Abstract

The paper presents list of the most significant results of the solution 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). Two selected results, achieved in 2019, are presented in brief: certified technology of thermally-sprayed coatings used as surface treatment of selected power producing equipment parts and method of monitoring of residual fatigue life of turbine blades.

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 bylo úspěšně dokončeno v roce 2019. Hlavním cílem projektu bylo 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 byly 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*.

Odborná náplň řešení projektu byla prezentována na konferenci Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách v roce 2012 [1], její aktualizace na období 2016 až 2019 byla prezentována na 11. ročníku této konference v roce 2016 [2].

Za celou dobu řešení projektu bylo dosaženo při řešení projektu celkem 75 odborných výsledků (z toho 30 v roce 2019).

V následující kapitole je uveden výčet výsledků řešení projektu CESEN s největším aplikačním potenciálem. V dalších dvou kapitolách jsou představeny dva vybrané výsledky řešení projektu: ověřená technologie vysokoteplotního žárově stříkaného povlaku používaného jako povrchová ochrana vybraných komponent energetických zařízení a způsob monitorování zbytkové životnosti lopatek turbosoustrojí.

Významné výsledky dosažené za celou dobu řešení projektu

Dosažené výsledky řešení projektu lze členit na výsledky ve formě vyvinutých a vyrobených zařízení, výsledky ve formě služeb, výsledky ve formě vyvinutých metodik a návrhů řešení konkrétních problémů technické praxe a výsledky ve formě vytvořeného software.

Vyvinutá a vyrobená zařízení:

- instalace zkušebního zařízení pro ověření skutečných statických a dynamických charakteristik radiálních kluzných segmentových ložisek,
- prototypová řada dynamických budičů s usměrněnou silou 40 kN, 60 kN a 90 kN, které slouží pro provádění dynamických zkoušek základů parních turbín,
- prototypová řada radiálních kluzných segmentových ložisek pro průmyslové turbíny MTD 25, MTD 30 a MTD 60,
- prototyp referenčního povlaku vhodného pro termovizní měření za zvýšených teplot,
- zařízení pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek,
- zařízení pro kontrolu trubek tepelných výměníků pomocí vysokootáčkové vnitřní sondy na vířivé proudy.

Poskytnuté služby:

- dynamické zkoušky základů energetických bloků v jaderné Elektrárně Dukovany, v jaderné Elektrárně Temelín a v Elektrárně Ledvice,
- inovace a optimalizace systému pro sběr, archivaci, distribuci a automatické vyhodnocování diagnostických dat z energetických zařízení ČEZ, a. s.,
- zapracování metodik predikce životnosti energetických systémů a zařízení do řídicí dokumentace ČEZ, a. s.

Vyvinuté metodiky a návrhy řešení konkrétních problémů technické praxe:

- metodika měření dynamických vlastností základů rotorových soustav parních turbín,
- metodika modelování vibrací perturbovaných olopatkovaných disků parních turbín,
- nové „nestandardní“ metodiky analýzy stupně degradace materiálů používaných v energetickém strojírenství – hodnocení změn mikrostruktury vysokolegovaných ocelí po creepu metodou replik, hodnocení degradace vlastností materiálu pomocí elektrochemických měření, hodnocení degradace materiálu rentgenovou analýzou, porovnání výsledků měření klasickými a zrychlenými creepovými zkouškami (ACT), měření žáropevnosti metodou „Small Punch Creep Tests“ (SPCT) a hodnocení lokální koroze dílů parních turbín,
- metodika pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti kovových materiálů,
- metodika pro stanovení J-R křivky kovových materiálů z výsledků penetračního testu,
- metodika pro určování základních mechanických vlastností vybraných materiálů z výsledků penetračních testů použitím neuronových sítí,
- metodika termovizního měření v systému prediktivní údržby energetických zařízení,
- metodika termografického měření meze únavy materiálu,
- metodika pravděpodobnostního hodnocení rizik a životnosti parních turbín a dalších významných energetických zařízení,
- metodika pro bezkontaktní magnetickou kontrolu turbínových lopatek,
- metodika pro kontrolu trubek tepelných výměníků pomocí vysokootáčkové vnitřní sondy na vířivé proudy,
- návrh optimalizovaného tvaru stromečkového závěsu oběžných lopatek parních turbín,
- sestavení optimalizačních matic nástřikových parametrů pro vybrané materiály žárově stříkaných povlaků,
- nalezení nových materiálů žárově stříkaných povlaků (zejména na bázi slitin Co a Ni), které jsou vhodné jako ochrana proti vysokoteplotní korozi v agresivních prostředích,
- optimalizace rozhodování o opravách nebo výměnách komponent energetických zařízení.

Vytvořený software:

- komplexní MKP model dynamických vlastností rotorových soustav parních turbín,
- software pro řešení vibrační turbosoustrojí a jeho jednotlivých komponent (pravidelné i porušené olopatkované disky, turbínové a generátorové rotory, lože, ložiska a ucpávky),
- systém „Residual Fatigue Life of Blades“ (RFLB) pro monitorování zbytkové životnosti lopatek na základě měření,
- software pro predikci životnosti energetických zařízení.

Ověřená technologie vysokoteplotního žárově stříkaného povlaku používaného jako povrchová ochrana vybraných komponent energetických zařízení

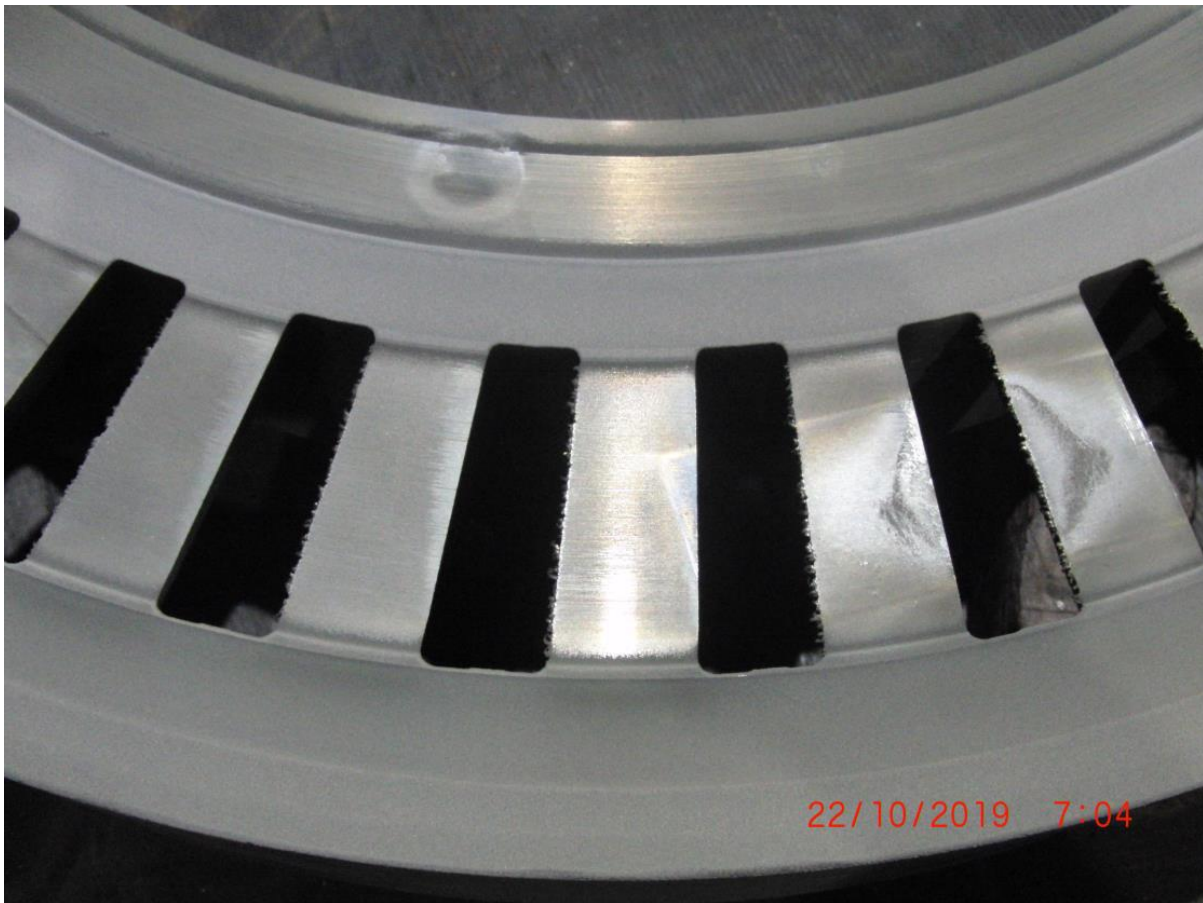
Snižování životnosti kritických komponent energetických zařízení vlivem působení vysokých teplot má značný vliv na výslednou bezpečnost a spolehlivost provozu těchto zařízení. Současně má také významný dopad na životní prostředí, zejména z pohledu efektivity využití vstupních materiálů, které má následně zároveň významný ekonomický dopad na dlouhodobý provoz kritické komponenty. Aplikace vhodného typu povrchové ochrany na komponenty vystavené působení korozně agresivního prostředí má potenciál výrazným způsobem zvýšit životnost součástí.



Obr. 1: Krytování regulační clony – plochy nepodléhající nástřiku: výpalek z plechu – půlkruh pro krytování vnitřního průměru clony [3]

Technologie žárově stříkaných povlaků umožňují nanášet ochranné vrstvy z různých typů materiálů, včetně tzv. superslitin – materiálů na bázi kobaltu či niklu, s vysokou odolností proti oxidaci a korozi v agresivním prostředí i za vysokých teplot. Zejména technologie HP/HVOF (vysokorychlostní nástřik plamenem) je k nanášení těchto typů povlaků vhodná díky relativně nižším teplotám, omezujícím nežádoucí změny materiálu povlaku i samotného dílu během de-

pozice, a zároveň vysokým rychlostem depozice, vedoucím ke vzniku povlaku s minimální pórovitostí a příznivými mechanickými vlastnostmi. Povlaky z vytipovaných materiálů byly podrobeny rozsáhlému experimentálnímu hodnocení mechanických i trilogických vlastností, vlivu působení vysoké teploty, horké páry a korozně agresivního prostředí. Na základě výsledků testů byl vybrán materiál povlaku na bázi kobaltu (Co), vhodný pro ochranu povrchu konkrétních komponent regulačního systému parní turbíny, s ohledem na způsob jejich namáhání. Pro nástřik daných součástí byl vytvořen technologický postup [3], zahrnující přípravu součástí pro nástřik, technologické parametry nástřiku získané na základě experimentální optimalizace, a postupu pro zajištění a kontrolu kvality nástřiku. Ilustrační obr. 1 a obr. 2 jsou převzaty ze [3] a jedná se o pro příklad aplikace materiálu Stellite 6 na povrch funkčních částí regulačních clon pro zajištění jejich protikorozní ochrany a odolnosti proti opotřebení.



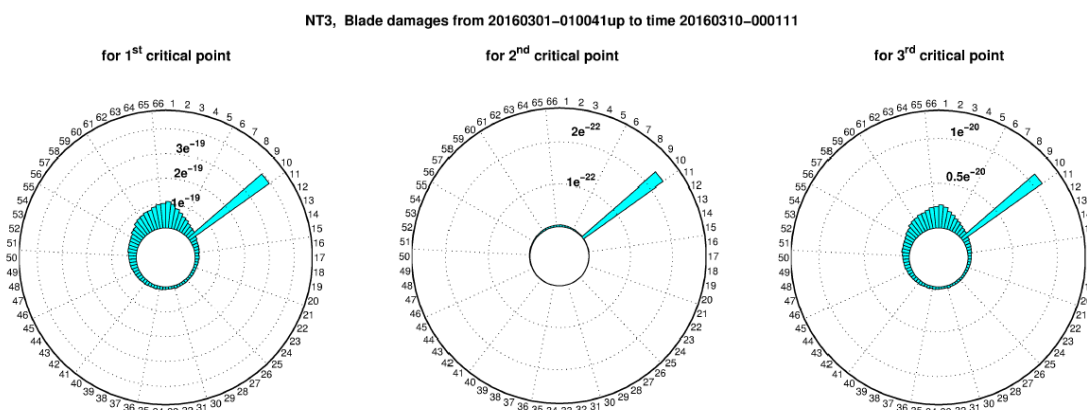
Obr. 2: Povrch povlaku po nástřiku jedné poloviny regulační clony [3]

Bezpečnost a efektivita energetických zařízení je jednou z priorit, definovaných v Národní výzkumné a inovační strategii pro inteligentní specializaci České republiky (Národní RIS3 strategie) klade důraz v oblasti výroby energie z fosilních paliv na výzkum a vývoj „umožňující provoz těchto zařízení s větší flexibilitou, včetně zvýšení regulačního rozsahu zdroje (s poznáním vlivů na životnosti materiálů a zařízení a jejich údržbu), technologií k průběžnému plnění snižujících se limitů na emise z provozovaných zdrojů (především uhelných) a zvyšování jejich účinnosti (technická řešení, pokročilé modely řízení)“. Navržená povrchová ochrana komponent regulačního systému parních turbín přispívá k možnému zvýšení pracovních teplot média – horké tlakové páry. Možnost zvýšit pracovní teplotu média bez devastujících účinků na materiály energetického zařízení přináší výrazné zvýšení efektivity stroje, související s efektivitou využití původních zdrojů (fosilních i jaderných). V dlouhodobém horizontu má zvýšení efektivity energetických systémů pozitivní dopad na životní prostředí i na ekonomickou stránku produkce energie.

Vyvinutý technologický postup byl ověřen na nástřiku několika dílů obdobné konstrukce. Kromě konkrétního dílu regulačního systému parních turbín lze vyvinutou technologii nástřiku slitiny na bázi Co využít i pro nástřik jiných součástí v energetickém průmyslu, a i v jiných oblastech průmyslu. Kromě konkrétní slitiny byly v rámci řešení projektu optimalizovány parametry nástřiku a ověřeny vlastnosti i celé řady dalších materiálů na bázi tvrdokovů a slitin. V závislosti na pracovních podmínkách mohou být tyto povlaky aplikovány na široké spektrum součástí.

Způsob monitorování zbytkové životnosti lopatek turbosoustrojí

Motivací pro monitorování zbytkové životnosti lopatek turbosoustrojí byla potřeba na straně provozovatelů energetických zařízení být informováni o aktuálním stavu životnosti jednotlivých lopatek turbín za účelem plánování odstávek, údržby, revizí a výměny lopatek s cílem maximalizovat dobu provozu bloku a zároveň předejít případné havárii lopatky. V době zahájení řešení projektu byla k dispozici dostupná diagnostika, která dodává data o aktuálním rozkmitu lopatek (tzv. Blade Tip Timing; BTT), nicméně bez dalších informací o tom, jak tento rozkmit lopatky poškozuje, ani o tom, jak je toto poškození akumulováno v jednotlivých lopatkách.



Obr. 3: Relativní poškození v kritických místech lopatky [4]

Způsob monitorování zbytkové životnosti lopatek Residual Fatigue Life of Blades (RFLB) je softwarový systém, který využívá vstupu z diagnostiky BTT a na základě znalosti vlastností lopatky (pevnostní a únavové charakteristiky materiálu, modální vlastnosti lopatky, rozložení kritických míst na lopatce) aplikuje teorii únavy pro výpočet aktuálního poškození (ilustrační obr. 3 je převzat ze [4]). Následně obsluze poskytuje tuto informaci online. Realizace RFLB vyžadovala nejen znalost teorie únavy, ale zároveň know-how z oblastí teorie signálů (rekonstrukce funkcí kmitání lopatek z dat BTT), matematicko-fyzikálního modelování (simulace chování lopatky s využitím metody konečných prvků) a programování (samotná realizace systému).

Přínosem vyvinutí diagnostiky RFLB je možnost sledovat aktuální životnost jednotlivých lopatek parních turbín. Snaha o předcházení neočekávaných poruch je důvodem preventivních odstávek turbín za účelem revize stavu zařízení. Informace o stavu lopatek, získávané během provozu, umožní optimalizovat počet nutných odstávek a tím snížit náklady na údržbu i ztráty spojené s častými odstávkami. Odstranění nebezpečí neočekávaných poruch vede ke zvýšení bezpečnosti a životnosti energetických zařízení a v konečném důsledku k eliminaci významných ekonomických ztrát.

V průběhu řešení projektu CESEN byl systém RFLB nasazen v testovacím provozu pro monitoring zbytkové životnosti lopatek v jaderné Elektrárně Temelín. V rámci navazujícího projektu TN01000007 „Národní centrum pro energetiku“ probíhá další vývoj systému s cílem modifikovat jej pro nasazení v jaderné Elektrárně Dukovany.

Hlavními překážkami masivního nasazení systému RFLB na dalších elektrárnách jsou:

1. Závislost – systém RFLB závisí na vstupních datech ze systémů BTT – lze jej nasadit pouze na takovém stroji, který je tímto systémem vybaven.
2. Složitost – systém RFLB je nutné modifikovat pro každý druh a materiál lopatky a pro každý druh BTT, datové výstupy ze systémů různých výrobců jsou obvykle odlišné. V rámci projektu CESEN byl vyvinut vstupní modul schopný zpracovat data z diagnostiky BTT výrobců Starmans a Hood Technology Corporation, v rámci již zmíněného navazujícího projektu „Národní centrum pro energetiku“ byl vyvinut vstupní modul pro BTT firmy Logic Elements.
3. Náklady pro konečného uživatele – přestože náklady související s modifikací a následným provozem diagnostiky RFLB nejsou extrémní, z důvodu nutnosti pořízení i diagnostiky BTT narůstají. Pokud je sledovaný stroj již vybaven diagnostikou BTT, představuje samotné nasazení systému RFLB minimální navýšení nákladů. To ovšem platí pouze v případě, že není nutný vývoj modifikace – je tedy využit systém BTT se známým formátem výstupu dat a jsou známy materiálové a modální vlastnosti lopatek.

Vývojové aktivity v rámci projektu CESEN umožňují nasadit RFLB pro monitoring zbytkové životnosti lopatek oběžných kol NT dílů jaderné Elektrárny Temelín bez dalších nákladů na vývoj. Podmínkou je osazení strojů diagnostikou BTT.

Závěr

V příspěvku je uveden výčet nejvýznamnějších výsledků řešení projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ (v jeho rámci byl vytvořen i tento příspěvek) dosažených za celou dobu řešení projektu a dva vybrané, dosažené v posledním roce řešení, jsou stručně představeny (ověřená technologie vysokoteplotního žárově stříkaného povlaku používaného jako povrchová ochrana vybraných komponent energetických zařízení a způsob monitorování zbytkové životnosti lopatek turbosoustrojí).

Literatura

- [1] Polach, P. (2012): Energetické centrum kompetence. 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. 11. konference *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Západočeská univerzita v Plzni, Srní, str. 145-150. ISBN 978-80-261-0644-9
- [3] Prantnerová, M., Schubert, J., Česánek, Z., Houdková, Š. (2019): *HVOF nástřik regulačních clon*. Technologický postup, TGP-ŽN/33/023, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.
- [4] Balda, M. (2019): *Vyladěný systém pro monitorování zbytkové životnosti lopatek parních turbín*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/19/022, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.