

PROJEKT VAV ČEZ, A.S. „TURBÍNY – VÝVOJ METODIKY KONTROLY LOPATEK S VYUŽITÍM INFORMACÍ Z EPRI“ – HODNOCENÍ KOROZNÍCH DŮLKŮ OBĚŽNÝCH LOPATEK NT DÍLŮ PARNÍCH TURBÍN

PROJECT OF R&D OF ČEZ A.S. “TURBINES – THE DEVELOPMENT OF A STEAM TURBINE BLADES CHECKING USING EPRI INFORMATION” – EVALUATION OF CORROSION PITS OF ROTATING BLADES OF LP PARTS OF STEAM TURBINES

Josef Kasl, Jaroslav Václavík, Matyáš Novák, Jakub Mrštík a Miroslava Matějová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Príspevek se zabývá motivací a cíli projektu VaV ČEZ, a.s. „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“ zaměřeného na vývoj metodiky hodnocení kritické velikosti korozních důlků u oběžných lopatek NT dílů parních turbín z hlediska rozvoje únavového porušení. Projekt byl motivován opakovanými haváriemi těchto lopatek. Shrnuje výsledky dosažené v etapách zabývajících se měřením potřebných materiálových vlastností, výpočtem napětíových stavů a konstrukcí Kitagawova-Takahashiho diagramů. Pozornost je dále zaměřena na kritické oblasti jejího uplatnění.

Abstract

The aim of this contribution is to introduce a motivation and goals of the R&D project of ČEZ, a.s. “Turbines – The Development of a Steam Turbine Blades Checking using EPRI information”, which is focused on the development of a predictive methodology of the assessment of critical size of corrosion pits on the moving steam turbine blades of low-pressure parts from the view point of the development of fatigue failure. This project was motivated by repeated failures of these blades. The paper summarizes the results obtained in the work packages, which deal with measurement of needed material parameters, computation of local blade stresses, and generation of Kitagawa-Takahashi Diagrams. The attention is focused on critical fields of its application.

Úvod

Poměrně velký podíl vynucených prostojů bloků tepelných i jaderných elektráren mající negativní dopad na hospodárnost jejich provozu je spojen se závadami v jejich turbínách. V souvislosti s tím všechny evropské a americké firmy realizovaly rozsáhlé výzkumy příčin poškození zjištěných především v nízkotlaké (NT) části parních turbín. Jedním z nejvýznamnějších problémů je korozní napadení. Příčinou až 50 % všech poškození a havárií lopatek, disků rotorů a menších součástí průtočné části nízkotlakých (NT) dílů je hlavně korozní praskání a korozní únava. Tato poškození, rozvíjející se nejčastěji z počátečních korozních důlků, souvisí obvykle s přítomností většího množství korozně agresivních nečistot v páře, které se kumulují v povrchovém filmu na povrchu součástí během provozu nebo během odstávek v nevysušených částech turbín.

V posledních několika letech byly korozně únavové lomy iniciované z korozních důlků kořenovou příčinou havárií v několika případech 200 MW provozovaných na elektrárnách ČEZ a.s. Na základě nového členství ČEZ a.s. v programu P65 v EPRI (od roku 2014) byl získán metodický postup umožňující vyhodnocování rozvoje únavové trhliny u oběžných lopatek NT dílů parních turbín iniciovaných z korozních důlků na povrchu lopatek. Praktické využití postupu EPRI přineslo celou řadu nových aspektů, které nebyly známy a standardně zavedeny ve Skupině ČEZ a pro aplikaci postupu je bylo nutné vyřešit. Na základě těchto skutečností byl v le-

tech 2015–17 řešen projekt „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“. Jedním z jeho tří hlavních cílů je zavedení diagnostického postupu, který umožní monitorovat a vyhodnocovat vliv důlkové koroze na povrchu oběžných lopatek NT dílů parních turbín tepelných i jaderných elektráren s ohledem na potenciální rozvoj únavového poškození těchto lopatek.

Tento příspěvek se zabývá aktuálním stavem vyvíjené metodiky hodnocení korozních důlků na lopatkách parních turbín.

Metodika EPRI hodnocení korozních důlků z hlediska vzniku únavových trhlin

Více než padesát let je známo, že mnoho havárií turbinových lopatek bylo vyvoláno mechanismem iniciace a šíření korozně-únavových trhlin z korozních důlků nacházejících se v přechodové oblasti (za Wilsonovou linií). Přes mnoho prací zaměřených do oblasti korozního pittingu a únavového porušení dosud chyběla metodika hodnocení zbytkové životnosti lopatek podrobených korozně-únavovému porušení. Tuto mezeru se snaží vyplnit postup EPRI vytvořením jasného vztahu mezi korozním důlkem a (statickým a cyklickým) napětím svázaným s iniciací únavové trhliny v korozním důlku. Mnohaletá snaha EPRI o vypracování takovéto metodiky byla soustředěna do „Programu on Technology Innovation: Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades“. Výsledky prací v oblasti korozní chemie, únavového zkoušení, lomové mechaniky a dynamiky turbinových lopatek jsou soustředěny v technických zprávách EPRI [1].

Ústřední myšlenkou pro vypracování metodiky je předpoklad, že korozní důlky vytvořené na povrchu lopatky tvoří vruby a metodami lineární lomové mechaniky je možné nalézt takové hodnoty únavových parametrů příslušného materiálu lopatky, při kterých nedochází k šíření trhliny. Předpokládá se, že stav „nešíření“ trhliny stačí charakterizovat pouze dvěma parametry, a to mezí únavy hladkých (tj. vruby neobsahujících) vzorků σ_{ac} případně její dvojnásobnou hodnotou $\Delta\sigma_0$ a prahovou hodnotou rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK_{th} stanovených na vzduchu při teplotě 80 °C. Celý projekt EPRI byl soustředěn na nalezení kritických hodnot navzájem svázaných dvojic: rozměr korozního důlku a cyklické napětí v místě výskytu důlku, při kterých nedojde k iniciaci resp. šíření únavové trhliny. Základem pro posouzení kritické velikosti korozního důlku je Kitagawův-Takahashiho diagram modifikovaný El Haddadem (KTHD). Diagram v souřadnicích velikost vrubu a (hloubka korozního důlku) a cyklické napětí resp. jeho rozkmit $\Delta\sigma$ (případně reciproční parametr součinitel intenzity napětí) obsahuje dvě tzv. Kitagawovy polopřímky [2] protínající se pro hodnotu tzv. intristické velikosti a_0

$$a_0 \equiv (1/\pi) \cdot (\Delta K_{th}/Y \cdot \Delta\sigma_0)^2, \quad (1)$$

kde Y je geometrický faktor. Jedna z nich je konstanta $\Delta\sigma_0$

$$\Delta\sigma(a) = \Delta\sigma_0, \quad (2)$$

druhá je tvořena empiricky stanovenou lineární závislostí prahové hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí na velikosti vrubu (hloubky důlku):

$$\Delta\sigma(a) = (\Delta K_{th})/(Y(\pi \cdot a)^{1/2}). \quad (3)$$

Do tohoto grafu byla doplněna El Haddadem, Topperem a Smithem [3] další tzv. El Haddadova křivka, ke které Kitagawovy linie vytvářejí asymptoty.

$$\Delta\sigma(a) = (\Delta K_{th})/(Y(\pi \cdot (a+a_0))^{1/2}). \quad (4)$$

Křivky jsou materiálovými charakteristikami pro parametr napěťový poměr nesymetrie cyklu R :

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = (\sigma_m - \sigma_a)/(\sigma_m + \sigma_a), \quad (5a, 5b)$$

když se uvažuje, že zatěžování probíhá mezi dvěma konstantními úrovněmi napětí – fmaximálním σ_{\max} a minimálním σ_{\min} , které určují amplitudu napětí σ_a střední napětí σ_m .

KTHD lze rozdělit na tři oblasti oddělené těmito křivkami. Z experimentálních výsledků vyplývá, že pokud {hloubka dříku, rozkmit cyklického napětí v místě jeho napětí} leží v KTHD pod křivkou (4), mohou trhliny v dřících iniciovat, ale neporostou; pokud obraz korozního dříku leží nad liniemi (2) a (3), trhliny iniciované v dříku budou růst; pokud obraz korozního dříku leží mezi těmito třemi křivkami, je možné, že se trhliny s vysokou pravděpodobností budou rozvíjet.

Z těchto výsledků vyplývá možnost stanovení napětí pro dané R, při kterém začne trhlina iniciovaná na dříku o hloubce a růst, případně naopak možnost určit kritickou velikost dříku (hloubku a), ze kterého začne trhlina růst pro dané cyklické napětí přítomné v místě výskytu dříku na povrchu lopatky.

Konstrukce KTHD diagramů pro modely lopatek a jejich materiály v projektu VaV

Pro zpracování a použití metodiky EPRI je třeba provést následující kroky:

a) Stanovit dva potřebné materiálové parametry zkoušené lopatky pro konstrukci KTHD. Experimentálně byly změřeny rozkmity meze únavy hladkých vzorků $\Delta\sigma_0$ pro $R = -1; 0,1; 0,5$ a $0,8$ a rozkmity prahového hodnoty součinitele intenzity napětí ΔK_{th} pro $R = 0,1; 0,5$ a $0,85$. Pro výpočet meze únavy pro libovolné R byla použita aproximace pomocí Gerberovy paraboly

$$(\sigma_{ac}/R_m) = (\sigma_e/R_m) \cdot (1 - (\sigma_m/R_m)^2), \quad (6)$$

kde R_m je mez pevnosti a σ_e je mez únavy pro $R = -1$. Ze vztahů (6) a (5) se stanoví hodnota σ_{ac} resp. její dvojnásobek pro požadované R. Hodnota prahového součinitele rozkmitu intenzity napětí ΔK_{th} pro požadované R byla určena proložení polynomem 3. stupně.

b) Výpočtem metodou konečných prvků byla určena statické i dynamické napětí v požadovaném místě (výskytu korozního dříku) na povrchu lopatky. Pokud známe působící statické napětí σ_m a amplitudu cyklického napětí σ_a , je možné určit příslušný parametr R a konstruovat KTHD.

c) Na olopatkovaných rotorech byly pomocí laserového skenování nebo metodou otisků změřeny geometrické parametry korozních dříků hloubka a (a pološířka c) a souřadnice jejich polohy na povrchu lopatky. Tato část je podrobně popsána v jiném příspěvku.

Pozorovaná velikost korozních dříků a lokální působící napětí pak může být zakresleno do diagramu a zjištěna poloha bodů vůči El Haddadově křivce. Nebezpečný dřík musí mít velikost nad kritickou velikostí a_{cr} určenou polohou na El Haddadově křivce.

KTHD byly zkonstruovány pro čtyři materiály, a to ocele AK 1.9 (X12Cr13); AK1TD; 1.4938 (X12CrNiMoV12-3/Böhler T552 /1.4939/X12CrNiMo12) a Böhler T671, pro lopatky řad L-0 a L-1 pro 11 modelů lopatek turbín o výkonech 200, 250, 270 a 660 MW.

Nejistoty v hodnocení korozních dříků v metodice EPRI

V celém postupu hodnocení dispozice korozních dříků k rozvoji únavových trhlin existuje řada nejistot, které mohou ovlivnit spolehlivost a vypovídací schopnost metody.

Prvním problémem je skenování geometrických parametrů korozních dříků. Odhlédneme-li od potíží s dostupností jednotlivých lokalit na povrchu lopatek umístěných v disku rotoru, je třeba si uvědomit, že korozní dříky jsou většinou nepravidelného a komplikovaného tvaru a jsou často vyplněny produkty oxidace a zaneseným materiálem. U řady dříků tak může dojít k nepřesnému určení jeho rozměrů, zejména hloubky.

Únavové vlastnosti dané lopatkové ocele jsou určovány pro omezený počet hodnot parametru asymetrie cyklu R – v našem případě pro tři až čtyři hodnoty. Je ovšem potřeba znát tyto

parametry pro libovolné R, což vyvolává potřebu dopočítávat tyto hodnoty z regresních rovnic. Jejich přesnost bude v zásadě tím lepší, čím více experimentálních dat bude k dispozici a čím přesnější model pro závislost dané veličiny na R bude vybrán. Toto riziko lze tedy snížit zvětšením počtu provedených testů, což samozřejmě naráží na potíže časové a finanční.

Zdaleka největším problémem je pak stanovení statického a zejména dynamického napětí na lopatce v místě nalezeného korozního důlku matematickým modelováním. Bohužel nejsou známy reálné výchylky lopatek v různých stavech provozu turbíny. V případě lopatek z bloků 200 MW je uvažována koncová výchylka 1 mm, avšak bez jakékoli experimentální podpory.

Dalším problematickým bodem je stanovení geometrického faktoru Y. Všechny podrobně zdokumentované havárie lopatek NT dílů parních turbín se odehrály na blocích o výkonu 200 MW na jednom stupni na lopatkách z jednoho materiálu. Pro ně tedy jsou známy potřebná data o korozních důlcích nadkritické velikosti. Z měření korozních důlků laserovým skenováním provedených v poslední době známe i rozměry důlků podkritických velikostí. Pomocí těchto důlků lze tedy metodiku verifikovat. Fitováním byla stanovena hodnota geometrického parametru Y na 0,50 při současně lineární korekci hloubky korozního důlku na přítomnost oxidické výplně ve tvaru:

$$a_d = 0,19 \cdot a_{dzm} + 195 \text{ [}\mu\text{m]}, \quad (7)$$

kde a_d je odhadnutá „skutečná“ hloubka korozního důlku a a_{dzm} je změřená hodnota hloubky korozního důlku. Bohužel u ostatních typů lopatek a materiálů jsou k dispozici údaje o korozních důlcích jen podkritické velikosti.

Závěry

V příspěvku je prezentován současný stav rozvoje metodiky, která poskytuje nástroj na nalezení korozních důlků, ze kterých by s velkou pravděpodobností iniciovaly únavové trhliny. Výměnou příslušných lopatek je možné zabránit výrazným škodám. V metodice je několik kritických vstupních parametrů, které mohou výrazně ovlivnit spolehlivost postupu z hlediska nalezení, resp. neurčení kritických důlků, a naopak jejich přecenění vedoucí ke zbytečným výměnám lopatek. Jedná se zejména o nejistoty výpočtů napětí, především jeho dynamické složky, a o volbu geometrického faktoru Y a korekci velikosti korozního důlku na obsah oxidů.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory projektu VaV ČEZ, a.s. „Turbíny – vývoj metodiky kontroly lopatek s využitím informací z EPRI“. Autoři děkují pracovníkům Doosan Škoda Power za poskytnutí potřebných údajů o lopatkách a jejich modelů.

Literatura

- [1] Program on Technology Innovation (2015): *Development of a Corrosion-Fatigue Prediction Methodology for Steam Turbine Blades: AISI 403/410 (12 %Cr) and 17-4PH Blade Steels*. Palo Alto, CA: EPRI, 3002005107.
- [2] Kitagawa, H., Takahashi, S. (1976): *Applicability of Fracture Mechanics to very Small Cracks or the Cracks in the Early Stages*. Proc. of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials. Metals Park, OH: American Society for Metals, pp. 627-631.
- [3] El Haddad, M., Topper, T.H., Smith, N. (1981): *Fatigue life Prediction of Smooth and Notched specimens*. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 103, pp. 91-96.