

VLIV EROZNÍHO POŠKOZENÍ NA ŽIVOTNOST NÍZKOTLAKÝCH LOPATEK S POUŽITÍM RŮZNÝCH EROZNÍCH OCHRAN

INFLUENCE OF EROSION DAMAGE ON THE LIFE-TIME OF LOW PRESSURE BLADES USING VARIOUS EROSION PROTECTION

Jakub Vlasák ^{a)*} a Zdeněk Ruml ^{b)*}

a) Doosan Škoda Power s.r.o.

b) Doosan Škoda Power s.r.o. (retired)

** The views and opinions expressed in the article are those of the individual presenter and should not be attributed to Doosan Škoda Power s.r.o. Doosan Škoda Power gives no warranty and accepts no responsibility or liability for the accuracy or the completeness of the information and materials contained in this article.*

Abstrakt

V současné době čelíme změně produkce typu parních turbín, kdy v minulosti byly produkovány zejména bloky vysokých výkonů 200 – 500 MW (uhelné) případně 600 – 1200 MW (jaderné). Období posledních 5 let ukázalo směr produkce bloků spíše nižších výkonů 20 – 100 MW. V drtivé většině případů se jedná o spalovny odpadů nebo biomasy, kdy hlavním parametrem je nižší teplota admisní páry než v případě uhelných/jaderných jednotek a požadavek na proměnlivý způsob provozování, zejména při nízkém provozním zatížení. To spolu s vysokou vlhkostí v posledním stupni výrazně zvyšuje intenzitu erozního působení na oběžné lopatky a tím snížení jejich životnosti.

Abstract

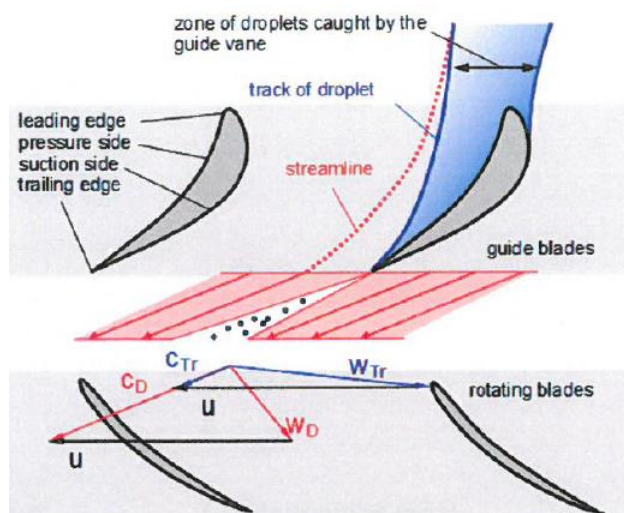
We are presently facing a change in the production of the turbine type, when in the past the products were mainly high power units 200 – 500 MW (coal) or 600 – 1200 MW (nuclear). The period of the last 5 years showed the direction of production of units of rather lower outputs 20 – 100 MW. In the majority of cases, these are Waste to Energy or Biomass, where the main parameter is a lower temperature of admission steam than in the case of coal / nuclear units and the requirement for a variable mode of operation, especially at low operating loads. This, together with the high humidity in the last stage, increases the intensity of blade erosion and thus reduces their service life.

Eroze vodními kapkami

Představuje významný problém z pohledu životnosti pro koncové oběžné nízkotlakého stupně pracující v prostředí mokré páry, kdy při velmi frekventovaném dopadu vodních kapek dochází erozi náběžné hrany tedy úbytku materiálu lopatky špičkového profilu případně vazebních členů. Úbytek materiálu vztažený k délce tělivity daného profilu může představovat až desítky % pro velmi erozně náročné provozní parametry parní turbíny.

Obecně rozlišujeme dva typy kapek d_k – průměr obr. 1:

- Jemné ($d_k < 5 \mu\text{m}$) kapky vznikají kondenzací v oblasti Wilsonovy linie. Dopad těchto kapek na oběžné lopatky nezpůsobuje erozní poškození. Množství těchto kapek ulpívá na rozváděcích lopatkách, kde se poté slévají a vytvářejí tzv. vodní filmy, které jsou následně strhávány proudem páry.
- Hrubé ($d_k = 5 - 500 \mu\text{m}$) kapky vznikají rozdrobením vodních filmů na odtokové hraně rozváděcí lopatky. Takto rozdrobené kapky jsou poté urychlovány a unášeny proudem páry k oběžným lopatkám, kde dochází k jejich dopadu na OL, tedy k erozi vodními kapkami. Čím větší je průměr kapky, tím méně je taková kapka urychlena. Tento stav se projevuje v dopadové rychlosti, která je mnohem větší než u kapek menších průměrů.



Obr. 1: Schématické znázornění formování a pohybu vodních kapek C_D , C_{Tr} = absolutní rychlost páry / kapek W_D , W_{Tr} = relativní rychlost páry / kapek, u = obvodová rychlost oběžných lopatek [1]

Intenzita erozního poškození závisí na mnoha faktorech, kde nejvýznamnější jsou:

- dopadová rychlost kapek,
- velikost kapek,
- vlhkost => množství kapek.

Erozní působení mokré páry je možné popsat na základě představy rychlostních trojúhelníků páry a kapiček vody – viz obr. 1. Směr relativní rychlosti kapek hrubé fáze W_{Tr} je jiný než směr relativní rychlosti páry W_D . Kapky hrubé fáze vlivem menšího urychlení na rychlost C_{Tr} dopadají na oběžnou lopatku pod jiným úhlem s větší dopadovou rychlostí W_{Tr} a způsobují erozní poškození.

Dopady kapek způsobují krátkodobé (řádu μs [7]) vysoké kontaktní tlaky často převyšující meze únavy materiálu lopatek [5]. To má za následek vznik a šíření trhlin, jejich spojování s následným úbytkem materiálu. Největší úbytky jsou v oblasti náběžné hrany – viz obr. 2, které způsobují úbytky velikosti tětivy a tím čerpání konstrukční životnosti lopatky. Při velkém úbytku tětivy (až 20 % délky) může dojít k předčasnému vyčerpání životnosti či následné destrukci lopatky, proto je potřeba použití erozních ochran, které mohou výrazně zpomalit erozní poškození, a tak zajistit splnění návrhové životnosti lopatky.



Obr. 2: Příklad erodovaných oběžných lopatek vlivem extrémního zatížení na konci životnosti – servis Doosan Škoda Power s.r.o. (DSPW)

Erozní ochrany (EO)

EO dělíme na dvě skupiny:

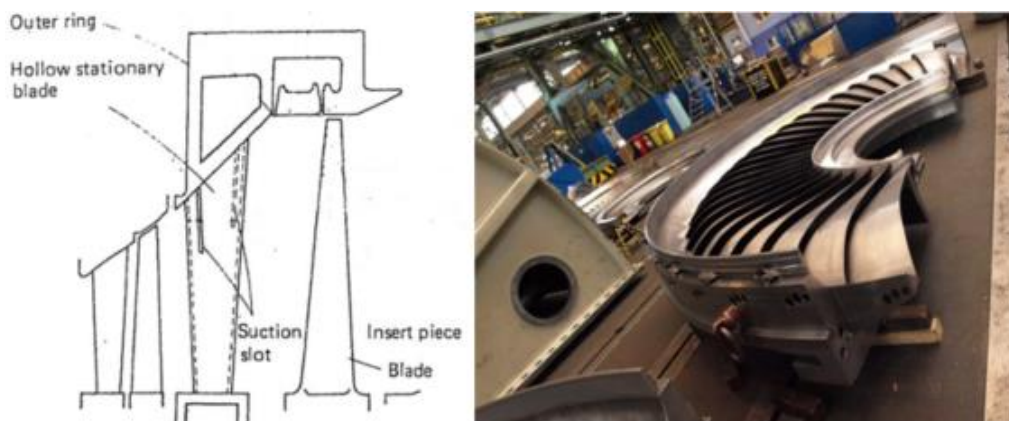
- Aktivní ochrana předchází eroznímu působení tím, že ovlivňuje tvorbu vodních filmů a parametrů hrubé fáze anebo dochází k separaci kapalně fáze před jejím vstupem do oběžných lopatek.
- Pasivní ochrana zmírňuje erozní působení tím, že v místě eroze použijeme jiného nebo upraveného materiálu. Zejména se jedná o povrchové úpravy materiálu.

Hlavním cílem EO je snížení případně zabránění vzniku erozního poškození na oběžných lopatkách (OL) a tím zvýšení jejich životnosti. Z dlouholetého výzkumu a zkušeností se jeví nejlepší kombinace aktivních a pasivních erozních ochran.

Aktivní ochrany a jejich vliv na erozi

V DSPW jsou zavedeny zejména následující čtyři typy aktivních ochran.

1. Odvodňovací kanály a separátory, které odvádějí vlhkost. Výsledkem je nižší vlhkost v posledním stupni a tím i nižší celkové množství kapalně fáze, které může dopadat na OL.
2. Konstrukční úprava axiální vzdálenost mezi rozváděcí a oběžnou lopatkou – čím větší je vzdálenost, tím je menší dopadová rychlost kapek, protože mají více času na urychlení [4]. Z důvodu minimálního zásahu do konstrukčního řešení turbíny je dostatečné naklonění rozváděcích lopatek.
3. Duté odsávané lopatky se řadí mezi velmi úspěšné a často používané aktivní erozní ochrany. Vodní film vzniklý na rozváděcí lopatce je odsáván otvory, které jsou vyfrézovány na přetlakové a podtlakové straně rozváděcí lopatky – obr. 3. Při správném návrhu a spojení v kombinaci s odvodňovacím kanálem je možné snížit erozní působení až o 80 % [2]. Tato ochrana je velmi účinná a využívaná. Nevýhodou je vyšší cena finální lopatky. Další velmi významnou nevýhodou je nízká nebo žádná účinnost této ochrany v případě provozování v oblasti ventilace.



Obr. 3: Příklad rozváděcích lopatek opatřených drážkami pro odsávání vodních filmů [2]

4. Hydrofobní povlak, jenž je novinkou v oblasti erozního výzkumu DSPW využívá myšlenky ovlivnění formování vodního filmu na rozváděcí lopatce. Vysoký kontaktní úhel (mezi kapkou a povlakem) hydrofobního povlaku zajistí, že kapky jsou neprodleně unášeny proudem páry na odtokovou hranu, kde jsou rozdrobeny na menší kapky než v případě bez povlaku. Tyto závěry jsou potvrzeny měřeními distribuce vodních kapek rozpadem vodních filmů na experimentálním tunelu na ČVUT [8]. Měření prokázalo výrazné snížení množství velkých kapek. Použitím této ochrany je možné dosáhnout významného snížení eroze. Tato ochrana je v DSPW používána zejména pro turbíny spalující odpad tedy typy velmi erozně náročné, v kombinaci s dalšími erozními ochranami – viz obr. 4.



Obr. 4: Rozváděcí lopatky opatřeny hydrofobním povlakem – DSPW

Pasivní ochrany a jejich vliv na erozi

V DSPW jsou zavedeny zejména následující tři typy pasivních ochran.

1. Celosvětově velmi známé a užívané je kalení náběžné hrany lopatky. Tvrdá martenzitická struktura vykazuje vyšší erozní odolnost. Historicky kalení prošlo kus cesty od kalení pomocí plamene přes indukci až k laseru. Tento postupný vývoj přinášel řešení zejména pro snížení vzniku deformací listu lopatky a lepší kontrolu procesu kalení a v druhé řadě neméně důležité zvýšení produkce. V případě volných lopatek problém deformací nebyl významný, ale s příchodem lopatek vázaných tzv. bandáží na špičce lopatky již bylo zapotřebí deformace omezit kvůli dodržení návrhových vlastností vazby. Hlavní nevýhoda kalení je její omezení z pohledu materiálu, který musí být kalitelný. Zde narážíme na omezení pro materiály T671 (vysokopevnostní vysoce legovaná martenzitická precipitačně vytvrditelná ocel) a Ti Grade 5 (Ti6Al4V).
2. PVD tenké vrstvy (obr. 5) řeší ochranu nekalitelných materiálů. Jedná se o fyzikální depozici velmi tenkých a tvrdých vrstev na povrch lopatky. Tloušťka vrstvy se pohybuje řádech mikrometrů. Výhodou této ochrany je, taktéž ochrana odtokové hrany oběžné lopatky, kde dochází k eroznímu poškození vlivem ventilačních provozů. Za posledním stupněm vznikne vír, který vrací velké množství velkých kapek zpět a dochází tak k erozi odtokové hrany. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, které oproti kalení může být až 10x. Při volbě této ochrany je potřeba zvážit technologické a ekonomické záležitosti. Výsledek vývoje PVD vrstvami nabízí vysoce účinnou erozní ochranu.



Obr. 5: Ukázka oběžných lopatek s PVD ochranou pro spalovnu odpadu – DSPW

3. V současnosti nejvíce progresivní a efektivní metodou pasivní ochrany je v DSPW stellitový (slitina kobaltu) návar viz obr 6. Laserovým paprskem je vystaven pás návaru

stellitu na náběžné hraně ve formě jednotlivých housenek. Vysoká erozní odolnost je dána tvrdými karbidy chromu rozmístěné v měkké kobaltové matrici. Historicky tato ochrana byla již použita ve formě naletovaných plátků, u které je však nebezpečí odtržení plátků. Z pohledu eroze je stellite výrazně odolnější než základní materiál. Odolnost může být až 8x vyšší. Samotné navaření je velmi náročný proces jak z pohledu vzniklých deformací, které je potřeba udržet v požadované toleranci vůči listu, tak z pohledu vzniku neprůvaru či necelistvosti, které mohou iniciovat trhlinu. Velkou částí vývoje byly a jsou zkoušky únavy, které ukázaly snížení meze únavy návaru vůči základního materiálu s tím, že na základě těchto zkoušek byla nastavena technologie a proces navařování tak, aby únavové vlastnosti návaru minimalizovaly dopad do návrhových požadavků na lopatku.



Obr. 6: Příklad pracoviště navařování oběžných lopatek – kooperace DSPW

Proces návrhu a volby erozní ochrany

Volba typu erozní ochrany je čistě individuální. Každý projekt je hodnocen zvlášť. Pro stanovení vhodné erozní ochrany, která zajistí splnění návrhové životnosti nebo splnění extra garancí požadovaných zákazníkem, je zapotřebí několik důležitých informací [4]:

- způsob provozování,
- časové zastoupení jednotlivých provozů,
- požadované garance,
- požadovaná životnost lopatky.

V případě znalosti výše zmíněných bodů se může přejít k samotnému hodnocení. DSPW disponuje erozním modelem ŠKODAR, který byl vytvořen a implementován na základě výsledků unikátního erozního stendu [3], který dokáže simulovat zrychleně erozní poškození. Existence erozního modelu umožňuje hodnocení jednotlivých projektů a na základě výsledků je možné navrhnout vhodnou erozní ochranu. DSPW úspěšně implementovala erozní model do tzv. erozních map, které výrazně zjednodušily a urychlily erozní hodnocení. Zadáním provozních dat (c2ax – axiální rychlost páry, p2 - protitlak, x2 - suchost) je možné určit erozní úbytek pro danou lopatku pro daný čas. Tento způsob hodnocení se využívá pro návrh erozní ochrany u nových projektu nebo zpětné hodnocení eroze, kde pomocí provozních dat je možné vyhodnotit, jaké provozní podmínky způsobily výrazné erozní úbytky. Dále velmi slibným přístupem použití erozního modelu je online monitoring tzv. RMS (remote monitoring system) daných lopatek. Provozní data turbíny jsou analyzována v reálném čase pomocí nově vyvinuté aplikace, a kdy

je monitorováno aktuální erozní poškození lopatek Erozní úbytky bude možné sledovat v reálném čase. Hlavním cílem Nového přístupu je online monitorovat erozní poškození a přispět tak k zefektivnění a plánování údržby turbíny.

Závěr

Změna trhu a větší rozsah výroby zejména turbín nižších výkonů v rámci provozů spalujících odpad spolu se zvyšujícím se nárůstem požadavků zákazníka na způsob provozování turbíny, má významný dopad do životnosti oběžných lopatek z pohledu erozního úbytku tělivity než je tomu v případě větších turbín uhelných nebo jaderných bloků provozovaných v nominálním výkonovém režimu. Potřeba zachování či zvýšení životnosti takto exponovaných lopatek vedla k vývoji nových typů erozních ochran, které vylepšují, doplňují nebo zcela nahrazují ty původní. Zde stojí za zmínku např. elektrojiskrové navařování, které bylo zcela nahrazeno kalením. V současné době DSPW je schopna nabídnout komplexní řešení erozní ochrany, které zajistí požadovanou životnost LSB i pro velmi erozně náročné způsoby provozování. V řešení může být využita zejména aplikace kalení, stelitového návaru nebo PVD povlaku na oběžné lopatky v kombinaci s dutou rozváděcí lopatkou opatřenou hydrofobním povlakem.

Literatura

- [1] Schuerhoff, J., Ghicov, A., Sattler, K. (2015): *Advanced Water Droplet Erosion Protection for Modern Low Pressure Steam Turbine Steel Blades*. Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines, American Society of Mechanical Engineers, [online]. ISBN 978-0-7918-5679-6, available at: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2015/56796/Montreal,%20Quebec,%20Canada/238305>
- [2] Tanuma, T., Sakamoto, T. (1991): The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots. *IMEchE Conference on Turbomachinery: Latest Developments in a Changing Scene*, London (UK), pp. 179-189.
- [3] Ruml, Z., Straka, F. (1995): *A new model for steam turbine blade materials erosion*. *Wear*, Vol. 186-187, pp. 421-424. ISSN 0043-1648
- [4] Krzyzanowski, J. (1991): *Steam Turbine Blade Erosion*. Wydawnictwo PAN, Wrocław (Poland).
- [5] Kirillov, I.I., Faddějev, I.P., Cigler, Ch.Ch. (1968): *Energomašinstrojenije*, No. 6.
- [6] Gardner, G.C. (1963): *Events leading to erosion in the steam turbine*. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 178, pp. 593-601.
- [7] Bowden, F.P., Brunton, J.H. (1961): *The Deformation of Solids by Liquid IMPact at Supersonic Speed*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 263, The Royal Society Publishing, London (UK), pp. 433-450.
- [8] Bartoš, O., Měšťanová, L. (2019): *Povlakovaná lopatka v experimentálním tunelu*. České vysoké učení technické v Praze, Praha.