

ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI NÍZKOTLAKÝCH LOPATEK PARNÍCH TURBÍN PRACUJÍCÍCH V PROSTŘEDÍ MOKRÉ PÁRY

INCREASING LIFETIME OF STEAM TURBINE LOW-PRESSURE BLADES OPERATED IN WET STEAM REGION

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

^{a)} Doosan Škoda Power s.r.o.

^{b)} Doosan Škoda Power s.r.o. (retired)

Abstrakt

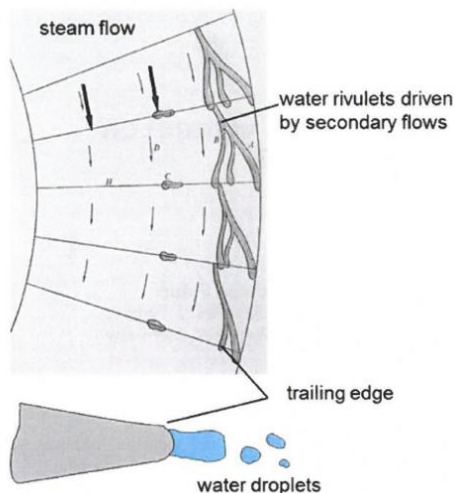
Produkce parních turbín se v posledním desetiletí významně změnila, kdy se dříve zejména vyráběly parní turbíny velkého výkonu v rozmezí 200 až 1200 MW, které odpovídaly jaderným nebo uhelným elektrárnám. V současné době se jedná o výrobu menší parních jednotek nejčastěji v rozmezí výkonu 50 až 100 MW. Drtivě většině případů se jedná o spalovny odpadů nebo biomasy, kdy hlavním parametrem je nižší teplota admissní páry než v případě uhelných jednotek. Právě nižší vstupní teplota spolu s variabilním způsobem provozování, kde uživatel provozuje stroj v širokém provozním pásmu od 10 do 100 %, mají za následek výrazné snížení životnosti LSB v podobě úbytku materiálu lopatek způsobené erozí vodních kapek. Jelikož významný podíl produkce Doosan Škoda Power tvoří zejména turbíny pro spalovny odpadu a biomasy s proměnným způsobem provozování, je otázka erozních ochranných opatření jedním z hlavních vývojových úkolů.

Abstract

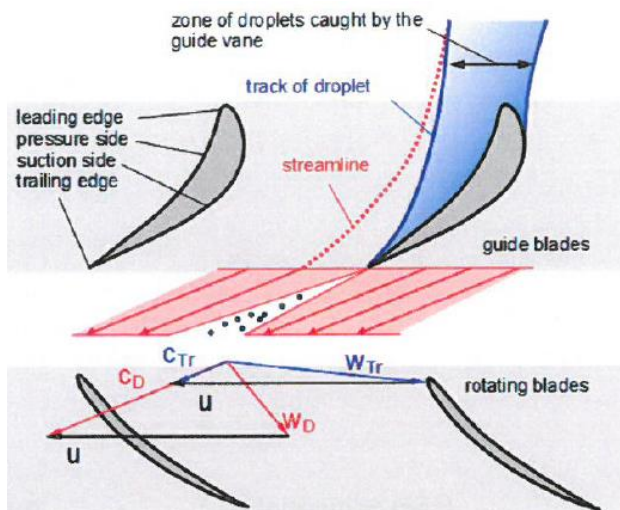
Steam turbines production has gone through large change in the last decade. Main production was aimed specially at the units of large power output in range 200 – 1200 MW usually fossil or nuclear power plants. Currently main production is aimed at small power output units in range 50 – 100 MW usually Waste to Energy (WtE) or combustion of biomass. Main feature of these units is low temperature of admission steam than in the case of fossil units. Low inlet steam temperature together with variable operation manner, where the steam turbine is operated in width range of operation from 10 to 100 %, which results at decrease of LSB lifetime of blades caused by water droplet erosion. Almost of Doosan Škoda Power's production is made by WtE power plants so that a question about erosion protection is main research task in Doosan Škoda Power.

Eroze vodními kapkami

Provozování nízkotlakých lopatek v kondenzačních turbínách jaderných nebo uhelných bloků elektráren v prostředí mokré páry má neblahý účinek na životnost NT oběžných lopatek. Zejména dvou posledních stupňů, kde nastává tzv. eroze vodními kapkami. Dopadající vodní kapky při dopadových rychlostech nad 150 m/s porušují povrch náběžné hrany lopatky, kde největší poškození je zejména ve špičkové oblasti lopatky. V prostředí mokré páry rozlišujeme dva typy kapek: jemné ($d_k < 1 \mu\text{m}$) a hrubé ($d_k = 5 - 500 \mu\text{m}$) d_k – průměr [6]. Jemné kapky vznikají kondenzací začínající v oblasti Wilsonovy linie, tyto kapky nezpůsobují erozní poškození. Jisté množství těchto kapek však ulpívá na rozváděcích lopatkách – obr. 1, kde posléze dochází ke slití do vodního filmu, který je poté strháván proudem páry a na odtokové hraně lopatky je rozdroben na hrubou fázi kapek. Hrubé kapky jsou pak proudem páry urychlovány a dopadají na náběžnou hranu oběžné lopatky velkou rychlostí a způsobují erozní poškození.



Obr. 1: Schématické znázornění formování vodních kapek na rozváděcích lopátkách ve vodní film s následným rozpadem na odtokové hraně [1]



Obr. 2: 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. 2. 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. 3, které způsobují úbytky velikosti tětivy a tím čerpání životnosti lopatky. Při velkém zmenšení délky tětivy může dojít k předčasnému vyčerpání životnosti a následné destrukci lopatky. Proto je potřeba použití erozních ochran, které mohou výrazně zpomalit erozní poškození, a tak zajistit splnění návrhové životnosti lopatky.

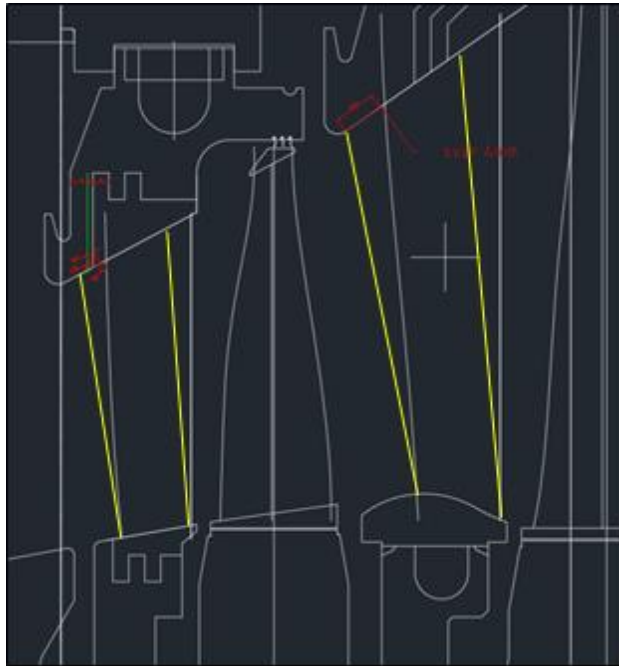


Obr. 3: Erodivané lopatky z elektrárny spalující odpady – servis Doosan Škoda Power

Erozní ochrany (EO)

EO dělíme na dvě skupiny:

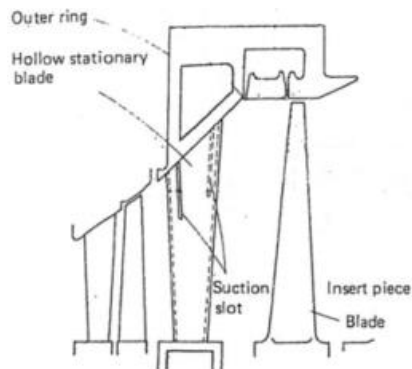
- aktivní – předchází eroznímu působení,
- pasivní – zmírnění erozního působení.



Obr. 4: Schématické znázornění naklonění rozváděcích lopatek za účelem zvětšení axiální mezery pro špičkový profil lopatky

Aktivní ochrana snižuje erozní působení tím, že ovlivňuje tvorbu kapek a vodních filmů anebo dochází k separaci kapalně fáze před jejím vstupem do kanálu oběžných lopatek. Mezi aktivní ochrany řadíme:

- Odvodňovací kanály – separátory, které odvádějí vlhkost [2].
- Axiální vzdálenost mezi rozváděcí a oběžnou lopatkou – čím větší je vzdálenost, tím je menší dopadová rychlost kapek, protože mají více času na urychlení [4] – viz obr. 4. Aby nedocházelo k výraznému zásahu do konstrukčního řešení turbíny, je naprosto dostačující naklonění rozváděcích lopatek. Toto řešení bylo již úspěšně realizováno v Doosan Škoda Power na reálném projektu.
- Duté odsávané lopatky – vodní film je odsáván otvory, které jsou vyfrézovány na přetlakové a podtlakové straně rozváděcí lopatky – obr. 5. Při správném navržení a spojení v kombinaci s odvodňovacím kanálem je možné snížit erozní působení až o 50 % [2]. Tato ochrana je velmi účinná a využívaná. Nevýhodou je vyšší cena finální lopatky.
- Hydrofobní povlak – ovlivňuje formování vodního filmu na rozváděcí lopatce. Vysoký kontaktní úhel (mezi kapkou a povlakem) hydrofobního povlaku zajistí tvorbu menších kapek než v případě bez povlaku. Tyto závěry jsou potvrzeny měření distribuce vodních kapek rozpadem vodních filmů na experimentálním tunelu na ČVUT [8]. Měření prokázalo výrazné snížení množství velkých kapek, které byly posléze přerозděleny na větší množství menších kapek, které pak v turbíně způsobují menší erozi. Použitím této ochrany je možné dosáhnout snížení eroze až o polovinu. Doosan Škoda Power v roce 2019/2020 úspěšně realizovala dva projekty s tímto typem ochrany – viz obr. 6.



Obr. 5: Příklad rozváděcích lopatek opatřených drážkami pro odsávání vodních filmů [2]

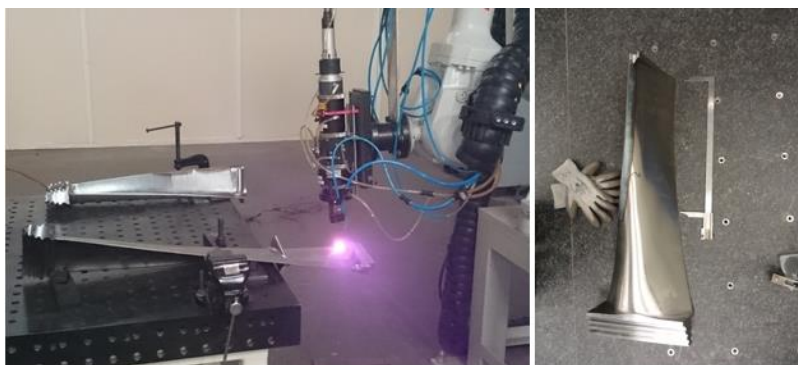


Obr. 6: Rozváděcí lopatky opatřeny hydrofobním povlakem – Doosan Škoda Power

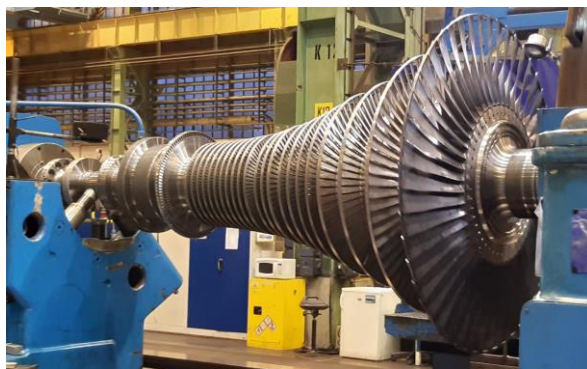
Pasivní ochrana zmírňuje erozní působení tím, že zvyšujeme tvrdost oblasti erozí postižené lopatky. Zejména se jedná o povrchové úpravy oběžných lopatek.

- Celosvětově známé a velmi užívané je kalení náběžné hrany lopatky (obr. 7). Tvrdá martenzitická struktura vykazuje vyšší erozní odolnost. V současné době v DSPW se používá kalení laserem, je velice efektivní a technologicky zvládnuté pro sériovou produkci. Historicky bylo v DSPW použito kalení plamenem a poté kalení indukční. Tyto dvě metody měly nevýhodu ve vzniku poměrně velkých deformací listů lopatek. V případě volných lopatek tento problém nebyl významný, ale s příchodem lopatek vázaných zejména tzv. bandáží na špičce lopatky již bylo zapotřebí deformace omezit a odpovědí bylo právě kalení laserem. Obecně aplikace kalení má podstatnou nevýhodu, a to v omezení pro materiály, které není možné kalit např. T671 (vysokopevnostní vysoce legovaná martenzitická precipitačně vytvrditelná ocel) a titanová slitina Ti Grade 5 (Ti6Al4V).
- PVD tenké vrstvy (obr. 8) řeší ochranu nekalitelných materiálů, případně je možné ji využít zároveň s kalením, čímž se erozní ochrana výrazně zkvalitňuje. Aplikace PVD vrstev znamená fyzikální depozici velmi tenkých a tvrdých vrstev na povrch lopatky. Výhodou této ochrany je, taktéž ochrana odtokové hrany oběžné lopatky, kde dochází k eroznímu poškození vlivem ventilačních provozů. Při nich vzniká za posledním stupněm vír, který vrací velké množství velkých kapek zpět na oběžnou lopatku a dochází tak k erozi odtokové hrany. Nevýhodou PVD vrstev je vysoká pořizovací cena, která oproti kalení může být až 10x vyšší. Volba této ochrany tedy závisí na zvážení technologických a ekonomických záležitostí.
- V současnosti nejvíce progresivní a efektivní metodou pasivní ochrany je v DSPW právě vyvíjena erozní ochrana pomocí stelliteového (slitina kobaltu) návaru. Laserovým paprskem je roztaven stelliteový prášek a je navařován ve formě jednotlivých housenek, které vystaví na náběžné hraně erozní štít. Její významná erozní odolnost je daná tvrdými karbidy chromu rozmístěné v měkké kobaltové matici. Historicky tato ochrana byla již použita, ale ve formě plátek naletovaných na náběžnou hranu. Je však nebezpečí odtržení plátek případně iniciace trhlin v místech napojení stelliteových plátek.

Z pohledu eroze je stellite významně odolnější než základní materiál. Hrozí zde však při návaru vznik deformací listu, ale ty je možné minimalizovat vhodnou intenzitou laseru spolu s autonomním řízením navařování, které přizpůsobuje laserový paprsek k deformovanému listu.



Obr. 7: Příklad pracoviště laserového kalení oběžných lopatek a zakalené oběžné lopatky



Obr. 8: Ukázka oběžných lopatek s PVD ochranou pro spalovnu odpadu – Doosan Škoda Power

Volba 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 několika důležitých informací [4]:

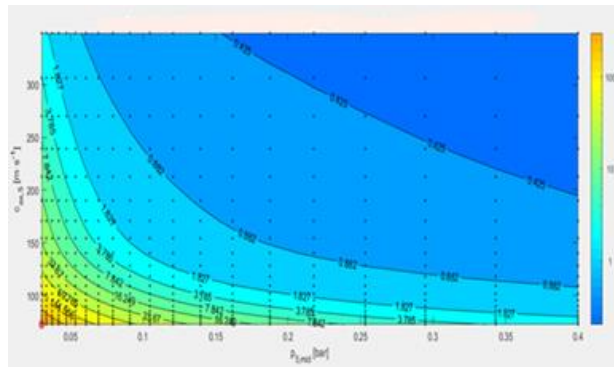
- způsob provozování,
- časové zastoupení jednotlivých provozů,
- požadované garance,
- požadovaná životnost lopatky.

V případě znalosti výše zmíněných bodů se může přejít k samotnému hodnocení. DSPW disponuje erozním modelem ŠKODAR, který byl vytvořen a validován 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. V nedávné době došlo k implementaci erozního modelu do tzv. erozních map, které výrazně zjednodušily a urychlily erozní hodnocení.

Po zadání několik vstupních dat (c_{2ax} – axiální rychlost páry, p_2 – protitlak, x_2 – suchost) je možné určit erozní úbytek pro danou lopatku pro daný čas – obr. 9. Tento způsob hodnocení se využívá pro návrh nového projektu nebo zpětné hodnocení eroze, kde pomocí provozních dat je možné vyhodnotit, jak byla turbína provozována a jaké provozování způsobily výrazné erozní úbytky.

Posledním a velmi slibným přístupem použití erozního modelu je online erozní monitoring pomocí tzv. RMS (Remote Monitoring System) daných lopatek. Provozní data z elektrárny jsou v reálném čase analyzována softwarovou aplikací. Erozní úbytky je možné sledovat v reálném

čase. Nový přístup monitorovat erozního poškození online významně přispívá k zefektivnění a plánování údržby turbíny.



Obr. 9: Příklad erozní mapy pro modulovou lopatku ukazující erozní úbytek v závislosti na axiální rychlosti páry, protitlaku a vlhkosti pro daný čas

Závěr

Koncové oběžné lopatky turbín bloků s proměnlivým výkonem, které jsou provozovány v prostředí mokré páry, jsou vystaveny výrazně vyššímu eroznímu poškození, než je tomu v případě uhelných nebo jaderných bloků (provozovaných v nominálních režimech). Ať už je to způsobeno parametry páry nebo samotným designem turbíny, je potřeba použití sofistikovaných erozních ochranných aktivních, pasivních nebo kombinací obou. V současné době DSPW je schopna nabídnout vhodné řešení erozní ochrany, které zajistí požadovanou životnost LSB i pro velmi erozně náročné způsoby provozování. V řešení může být využita aplikace kalení, stelitového návaru nebo PVD povlaku na oběžné lopatky v kombinaci s dutou rozváděcí lopatkou opatřenou hydrofobním povlakem. Pro případ včasného varování nebo efektivního plánování údržby je online monitoring lopatek velmi perspektivní SW aplikací.

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 00431648
- [4] Krzyzanowski, J. (1991): *Steam Turbine Blade Erosion*. Wydawnictwo PAN, Wrocław.
- [5] Kirillov, I.I., Faddějev, I.P. Cigler, Ch.Ch. (1968): *Energomašinostrojenije*, 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.