

ŽIVOTNOST LOPATEK PARNÍCH TURBÍN

BLADES LIFETIME OF STEAM TURBINES

Miroslav J. Černý

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 16608 Praha 6

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou životnosti lopatek parních turbín vzhledem k únavové korozi a možné tvorbě trhlin. Vliv kombinace dynamického zatížení a koroze na tvorbu únavových trhlin.

Úvod

Diverzifikace výrobních metod energie v rámci stávajících rozvodných sítí zvyšuje požadavek na operační pružnost elektráren využívající parní turbíny.

Aktuální požadavky na provoz moderních fosilních zdrojů jsou do velké míry ovlivněny rychle vzrůstajícím podílem obnovitelných zdrojů, které jsou ze své podstaty nestabilní. To klade nové požadavky na provoz klasických zdrojů s parní turbínou, které se stále využívají i u obnovitelných zdrojů. Mezi hlavní provozní požadavky patří zejména flexibilita provozu, okamžitá dostupnost výkonu, dlouhodobý bezpečný provoz na částečných a minimálních výkonech při zachování vysoké účinnosti nebo vysoký počet startů turbíny s krátkými najížděcími časy.

To vede k situaci, kdy parní turbíny mohou pracovat s velmi nízkými objemovými průtoky (NN) po delší dobu. Za provozních podmínek, kdy je objem průtoku v poslední fázi nízkotlaké části (LP) parní turbíny (obr. 1) pod určitou hranicí, energie se vrací do pracovního média, spíše než by byla extrahována. Tak nazývaný jev „ventilace“ může produkovat non-synchronní aerodynamické excitace, které mohou vést k vysokému dynamickému zatížení lopatek.

Nesynchronní buzení za normálního i nízkého operačního objemu může být velké riziko pro mechanickou odolnost lopatek v nízkotlaké části (LP) parní turbíny. V současné době rozsáhlé ověřování platnosti nových projektů vyžaduje objasnění, zda jsou lopatky vystaveny riziku nepřipustných vibrací. Obvykle jsou tyto zkoušky provedeny na konci návrhu lopatek.

Pokud dojde k rezonanci a porušení lopatek, nákladná renovace je nutná, což může vést také ke snížení výkonu. Je proto velký zájem o správnou predikci neustáleného proudění a jeho účinků.

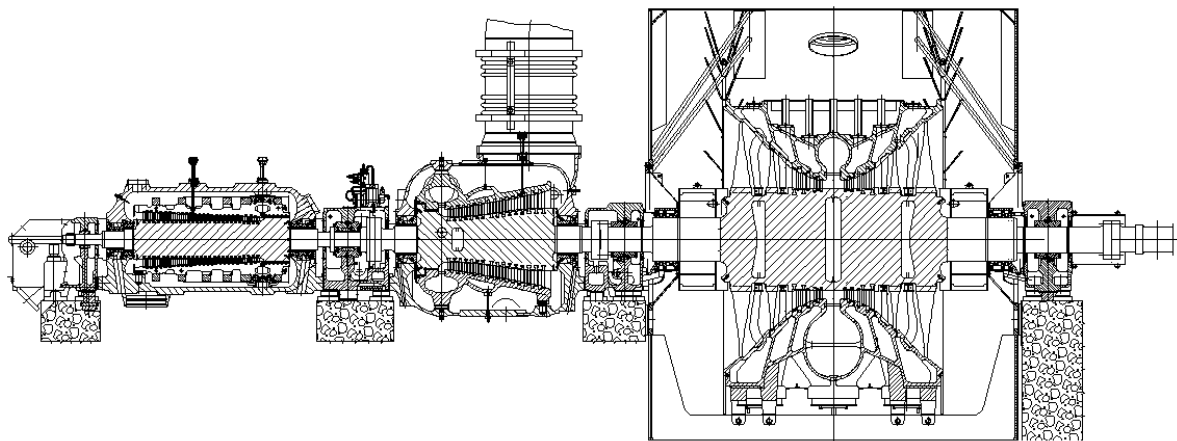
Buzení lopatek

Synchronní buzení

Nejčastěji uvažované buzení v turbosoustrojí při libovolném provozním režimu je synchronní v důsledku nedokonalostí obvodové symetrie apod. Protože vlastní frekvence lze předpovídat poměrně dobře, poslední lopatky v nízkotlaké části (LSMB) jsou navrženy tak, aby byly mimo rezonance od rotační frekvence až do pátého a desátého řádu (násobek rotační frekvence).

Nesynchronní buzení

Naproti tomu rezonanční nesynchronní buzení je obtížnější předpovědět, a proto je obtížné se mu vyhnout. Takové buzení může být přítomno v širokém frekvenčním rozsahu. Ačkoli buďící síly mohou být malé, v případě rezonance mohou vznikat velká dynamická napětí v lopátkách, kde je tlumení nízké. Kromě toho aero-elastická nestabilita může vzniknout, pokud vibrace lopatky jsou zesilovány výsledným polem neustáleného proudění. Tento jev se nazývá flutter.



Vysokotlaká část
(HP) turbína

Středotlaká část
(IP) turbína

Nízkotlaká část
(LP) turbína

Obr. 1: Schéma parní turbíny

Turbulence

Turbulentní proudění je nepravidelné se změnami rychlosti závislými na místě a čase, proudnice se navzájem promíchávají. Částice media vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Jedno měření tudíž neposkytuje přesně opakovatelné výsledky. Výsledek je jinými slovy stochastický. Kromě toho je turbulentní proudění nestabilní a trojrozměrné, a protože při turbulentním proudění nechybí rotace, viskozita proudícího media má velký význam. Výskyt turbulence je typický pro proudící media s vysokým Reynoldsovým číslem.

Flutter

Flutter je aeroelastická nestabilita, která se vyskytuje u mnoha typů turbosoustrojí a může vést k selhání lopatek. Původně malé pohyby lopatek mění okolní proud tak, že nestabilní síly proudu, působící na lopatku zesilují vibrace.

Flutter spočívá ve škodlivém přenosu energie proudící páry do lopatkové mříže, vzniku rezonance a rozvoje mechanického poškození lopatkování turbíny.

Navíc provozní rozsah je omezený maximálním hmotnostním tokem. To je dané tím, že nestabilní tlakové síly působící na lopatku se mění lineárně s hustotou media. Strukturální tlumení se uvažuje konstantní v celém provozním rozsahu při konstantní rychlosti rotoru. To znamená, že pokud je lopatka aerodynamicky nestabilní mechanické tlumení bude dostatečně bránit vibraci lopatky do určitého hmotnostního průtoku. Kritickou oblastí flutteru je typicky oblast s vyšším hmotnostním tokem.

Hlavní korozní problémy parních turbín

Hlavní korozní mechanismy, působící v parních turbínách jsou: **korozní únava** (corrosion fatigue – CF), **korozní praskání** (stress corrosion cracking – SCC), **důlková koroze** (pitting) a **eroze-koroze** (erosion-corrosion) [1].

Důlková koroze a korozní únava lopatek turbín a koroze pod napětím (korozní praskání) jsou v současné době nejdůležitější problémy.

Je zřejmé, že některé stupně šíření koroze mají statistickou povahu pro řadu korozních událostí. Předpokládá se, že repasivace důlkové koroze probíhá náhodně. Statistická povaha jevu se uvádí pro postupnou nukleaci koroze a přechod na trhliny.

SCC a CF poškození se inicializuje v nízkotlaké části parní turbíny ve vysoce lokalizovaných oblastech, obvykle v důlcích koroze jako koncentrátorech napětí. Stádia jsou: akumulace

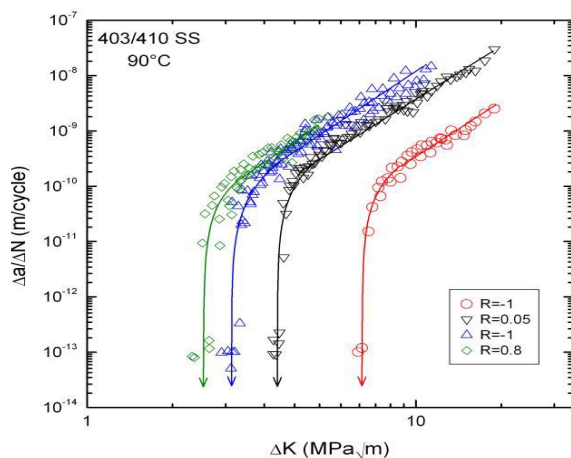
vané poškození metastabilních důlků na stabilní důlky, růst stabilních důlků, přechod důlků na trhliny, růst subkritických trhlín, a nakonec nestabilní porušení.

Mezi významnou korozi patří oxidace při vysokých teplotách, která obvykle vede ke snížení průřezu součásti. Tepelný přestup se potom zhorší a může způsobit lokální přehřívání materiálu a jeho urychlenou degradaci působením zvýšené teploty. Dále zde může působit abrazivní působení uvolněných částic oxidických vrstev na vnitřní povrchy součástí konstrukce při jejich unášení médii. Důležitá je oxidace vnitřních povrchů materiálů používaných v prostředích s nadkritickými parametry páry (vysokolegovaná-chromová ocel) v závislosti na kvalitě a provozních parametrech páry a na odolnosti použitého materiálu.

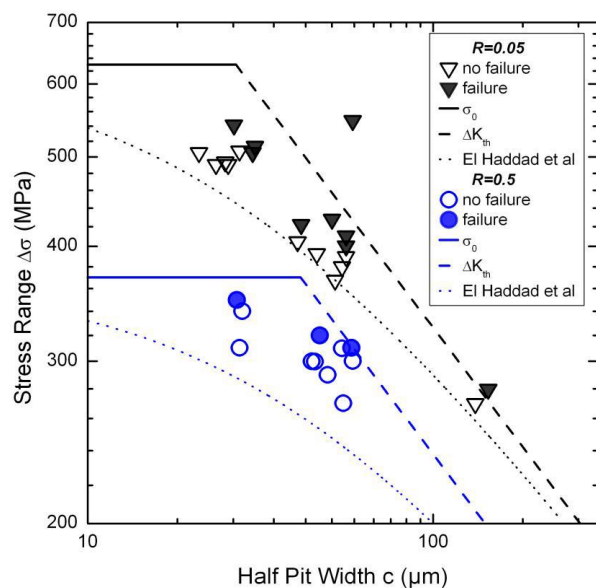
Problémy životnosti lopatek parních turbín

Požadavky na kvalitní servis, přesnou diagnózu, načasované opravy a zlepšování materiálů a provozu parních turbín vedou k systematickému výzkumu iniciace a šíření trhlín, porušení a odhadu životnosti částí turbín, včetně lopatek za normálních podmínek a za resonance. Koncové lopatky NT části turbíny (L-1) přenášejí vysoké alternující napětí, expozici při vysokých teplotách a mechanické síly při opakovaných poměrných deformacích cyklického zatížení. Lopatky také přenášejí určité obvodové (centrifugální) síly, které jsou v kombinaci s alternujícím napětím odpovědné za únavové poškození. Životnost nejvíce exponovaných (posledních L-1) lopatek je dána kombinací účinků sil, působících na lopatky parní turbíny a vlastností materiálu při daných korozních podmínkách.

Pro hodnocení vlivu důlkové koroze na únavové vlastnosti materiálu se obvykle používá lineární lomová mechanika. Bylo pozorováno, že většina korozních důlků má přibližně semi-eliptický tvar se šířkou $2c$, a hloubkou a . Následný výzkum ukázal, že korozní důlky mohou být uvažovány jako polokruhové povrchové trhliny s uvedenými rozměry. S použitím této aproximace a za předpokladu, že rozměry korozního důlku jsou malé vzhledem k vytvořeným trhlinám, může být stanoven faktor intenzity napětí, FCGR diagram (obr. 2) a na konec Kitagawa-Takahashi (K-T) diagram (obr. 3) pro danou legovanou ocel. K-T diagram koreluje korozní důlek s únavovou trhlinou. Data mohou být získána pro specifické hodnoty R (alternující napětí). Ve výsledku mohou být použity K-T diagram pro odhad únavové meze a životnosti korodovaných částí lopatek parních turbín.



Obr. 2: FCGR Diagram



Obr. 3: Kitagawa-Takahashi Diagram

Příspěvek byl vytvořen v rámci grantového projektu TE01020068.

Literatura

- [1] Černý, M. (2014): *Damage and Localized Corrosion in Steam Turbines*. Conference EAN 2014, Proceedings.
- [2] Černý, M. (2014): *Korozní poškození legovaných ocelí v parních turbínách*. 9. konference Zvyšování životnosti component energetických zařízení v elektrárnách, Srní, 2014.
- [3] Černý, M. (2015): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Conference EAN 2015, Proceedings.
- [4] Černý, M. (2016): *Localized Corrosion in Alloy Steel of Steam Turbines*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 827 (2016), Trans Tech Publications.
doi:10.428/www.scientific.net/AMM.827.177.
- [5] Černý, M. (2016): *Modeling of Corrosion Fatigue Crack Initiation in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proc. EAN 2016, Srní.
- [6] Černý, M. J. (2017): *Modeling of Corrosion Fatigue Damage in Steel Alloy for Steam Turbines*. Proc. EAN 2017, Nový Smokovec, Slovakia.