

SIMULATION OF CRACK PROPAGATION IN STEAM TURBINE BLADE LOCK

J. Růžička*, J. Jurenka*

Summary: This paper presents a simulation of 3D curved crack propagation in a steam turbine blade lock. These fatigue cracks are often initiated near a blade root contact zone. Two FEM analyses of the blade root were carried out based on stress intensity factor computation along cracks tips. The first was focused on the evaluation of probably initiation crack position according to the contact zone and its geometrical configuration. The second deals with simulation of crack propagation from the most probable initial configuration under cyclic loading caused by starting and shuting down of turbine.

1. Úvod

Faktorů ovlivňujících životnost parních turbín je celá řada a jen málo z nich lze identifikovat s dostatečnou přesností a následně použít při výpočetních analýzách. Rotor parní turbíny pracuje v korozním prostředí a je namáhán nejen statickým ale i dynamickým zatížením. S ohledem na spolehlivost, resp. životnost turbíny, lze za kritické místo označit spojení oběžných lopatek s rotorem. Vzhledem ke značnému namáhání materiálu v těchto oblastech je nezbytné posuzovat možnost jak iniciace, tak i následného šíření únavových trhlin. V článku je prezentován postup a dosažené výsledky simulací šíření únavové trhliny ve stromečkovém zámku lopatky parní turbíny vycházející z MKP modelování (v programu ABAQUS) 3D obecně zakřivených únavových trhlin a výpočtu faktoru intenzity napětí podél jejich čel.

2. MKP model lopatky

Předmětem modelování byl segment disku rotoru nízkotlakého stupně parní turbíny, který se skládal z jediné lopatky a odpovídající části rotoru. Lopatka byla s rotorem spojena pomocí stromečkového zámku. Na dosedacích plochách byl definován kontakt s koeficientem tření f = 0,15. Segment rotoru byl v tangenciálním směru uložen pomocí podmínek rotační symetrie. Ve směru axiálním byl uložen v jednom z příčných řezů rotoru. Byl uvažován čistě elastický model materiálu, přičemž při výpočtu bylo zanedbáno teplotní zatížení a změna materiálových vlastností, které jsou na teplotě obecně závislé.

Při tvorbě výpočetní sítě modelu segmentu rotorového disku byl brán ohled především na oblast stromečkové nožky, kde byl simulován růst únavové trhliny. Model segmentu byl rozdělen na podobjemy, které bylo možné diskretizovat navzájem nekompatibilními MKP

^{*} Ing. Jan Růžička, Ing. Josef Jurenka, : Ústav mechaniky / Odbor pružnosti a pevnosti, České vysoké učení technické v Praze; e-mail: ruzicka.jan@seznam.cz

sítěmi. To umožnilo snížit výpočetní nároky a zároveň zachovat dostatečně jemnou výpočetní síť v kritických oblastech modelu. Detailní pohled na MKP sítě jednotlivých částí zachycuje Obr.1. Celý model byl tvořen kvadratickými elementy s redukovanou integrací.

Při simulacích byly uvažovány dva typy zatěžování. Jednak zatížení odstředivou silou a jednak periodicky se opakující zatížení způsobené obtékáním lopatky vodní párou (z CFD výpočtu). Vzhledem k velkému množství kontaktních párů se během výpočtu vyskytovaly problémy s jejich konvergencí. Rozdělením simulace do následných výpočetních kroků ("stepů") byly tyto problémy eliminovány. V prvním kroku byl model zatížen pouze odstředivou silou. Ve druhém kroku výpočtu bylo k odstředivé síle připojeno buzení od obtékání lopatky vodní párou.



Obr.1: MKP model lopatky.

Na napjatost zámku lopatky má dominantní vliv zatížení odstředivou silou. Maximálních napětí podle hypotézy HMH bylo dosaženo v rádiusech stromečkové nožky. Časový průběh napětí v kritickém místě (vyznačeného na Obr.2) uvádí Obr.3. Rozkmit napětí, který byl způsoben zatížením od obtékání lopatky vodní párou nepřesahuje hodnotu 3 MPa, což odpovídá přibližně 0,4% maximální hodnoty napětí odpovídající zatížení od odstředivých sil.



Obr.2: HMH napětí v rotoru a lopatce.



Obr.3: Časový průběh HMH napětí v kritickém místě lopatky.

Celkové rozložení HMH napětí ve stromečkovém zámku lopatky a předpokládané místo iniciace únavové trhliny je vyznačené na Obr.4. Zvýšenou koncentraci napětí je možno pozorovat i v místě přechodu listu lopatky a stromečkové nožky. Geometrie lopatky je však v tomto místě vlivem diskretizace poměrně hrubou sítí nepřesná, a hodnoty napětí je tedy nutno pokládat pouze za přibližné. Detailní pohled na pole napětí stromečkové nožky lopatky s vyznačeným místem předpokládané iniciace únavové trhliny udává Obr.4.



Obr.4: Napjatost (HMH) stromečkové nožky lopatky.

3. Modelování iniciační trhliny

Únavová trhlina se u reálných součástí často iniciuje v těsné blízkosti kontaktní oblasti stromečku lopatky. Iniciace trhlin v těchto místech je pravděpodobně způsobena tzv. frettingem. Ten je spojen s komplexním degradačním mechanismem, jehož zákonitosti jsou stále předmětem výzkumu. Faktorů, které ovlivňují degradační procesy za podmínek frettingu je celá řada. Mezi nejčastěji citované a zkoumané patří třecí napětí a velikost relativních skluzů v kontaktní oblasti. Predikce okamžiku a místa iniciace únavové trhliny v podmínkách frettingu může být díky komplexní povaze tohoto degradačního procesu a neúplnému poznání zatížena značnou nejistotou. Nasvědčuje tomu také to, že k iniciaci únavových trhlin dochází i mimo oblast s největším namáháním. To může být spojeno právě s vlivem relativních skluzů, které závisí jak na součiniteli tření, tak i na kontaktním tlaku. Polohu modelované iniciační trhliny znázorňuje Obr.5. Trhlina je charakterizována délkou *a*, šířkou *c*, úhlem α , který trhlina svírá s kontaktní plochou, a vzdáleností *e* trhliny od hranice kontaktní oblasti.

Vzhledem k tomu, že zatím nejsou zcela objasněny mechanismy vzniku iniciačních trhlin v blízkosti kontaktních ploch, byla provedena citlivostní analýza vybraných parametrů iniciační trhliny na velikost faktoru intenzity napětí K a směr následného šíření. Byly modelovány čtyři různé konfigurace iniciačních trhlin označené jako A0 až D0. Trhliny jsou schematicky znázorněny na Obr.6. Čelo trhliny je u všech těchto případů tvořeno částí kružnice. Hodnoty jednotlivých parametrů modelovaných iniciačních trhlin udává Tab.1. Záporné znaménko parametru e trhliny D0 znamená umístění iniciační trhliny uvnitř kontaktní oblasti.



Obr.5: Umístění iniciační trhliny.



Tab.1: Parametry iniciačních trhlin

Trhlina	<i>a</i> [mm]	2 <i>c</i> [mm]	α [°]	<i>e</i> [mm]
A0	2	10	83	0,19
B0	1	5	83	0,19
C0	1	5	103	0,48
D0	1	5	83	-0,19

Obr.6: Schematické znázornění iniciačních trhlin.

Modelování obecně zakřivené trhliny a jejího prorůstání stromečkovým zámkem lopatky vyžaduje tvorbu specifické dostatečně jemné MKP sítě především v nejbližším okolí čela trhliny. Za předpokladu, že trhlina v zámku lopatky svou aktuální velikostí významně neovlivní jeho celkovou tuhost, a tedy ani globální přerozdělení napjatosti, lze s výhodou využít techniku submodelingu. S ohledem na velikost modelové trhliny byl submodel tvořen částí zámku lopatky a částí zámku rotoru, jak je pro případ iniciačních trhlin vidět na Obr.7. Model byl diskretizován kvadratickými šestistěnnými elementy s redukovanou integrací.



Obr.7: MKP síť submodelu.

4. Vyhodnocení modelování iniciačních trhlin

Módy namáhání trhlin I, II a III se obecně vyskytují v různých kombinacích. Pro posuzování těchto případů byla navržena řada řešení, přičemž všeobecně přijímaný postup stále neexistuje. Mezi nejznámější kriteria patří kriterium založené na největším hlavním napětí (Erdogan a Sih), kriterium založené na objemové hustotě deformační energie (Sih) a kriterium založené na hnací síle trhliny. Pro popis chování iniciační trhliny byl s ohledem na elastický model materiálu zvolen faktor intenzity napětí *K*. Vzhledem ke smíšenému módu namáhání byl aplikován výpočet efektivní hodnoty faktoru intenzity napětí K_{ef} podle práce Vlk & Florian (2007), který vychází z kriteria hnací síly trhliny. V prvním přiblížení můžeme mezní podmínku šíření trhliny uvažovat ve tvaru $K_{ef} = K_{Ic}$. Aplikací této mezní podmínky dostáváme pro rovinnou deformaci

$$K_{ef}^{2} = K_{I}^{2} + K_{II}^{2} + \frac{K_{III}^{2}}{1 - v} = K_{Ic}^{2} \quad .$$
(1)

Pro cyklické zatěžování zámku lopatky dané obtékáním lopatky vodní párou byla vyhodnocena střední hodnota efektivního faktoru intenzity napětí K_{mef} a amplituda efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} . Obr.8 znázorňuje závislost K_{mef} na bezrozměrné souřadnici l, která udává polohu na čele trhliny (Obr.14). Průběh K_{aef} podél čela trhliny v závislosti na l zachycuje Obr.9. Protože jednotlivé trhliny nemají shodnou velikost, resp. délku čela, bylo nutné pro vzájemné porovnání jednotlivých variant iniciačních trhlin normovat souřadnici l příslušnou délkou čela trhliny.

Směr šíření trhliny definovaný úhlem θ byl určován pomocí kritéria největšího hlavního napětí, které vychází z předpokladu, že trhlina se bude šířit kolmo na směr algebraicky největšího hlavního napětí.



Obr.8: Střední hodnota efektivního faktoru intenzity napětí K_{mef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny l[1]



Obr.9: Amplituda efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny l[1]

Iniciační trhlina označená jako D0 byla modelována přímo v oblasti kontaktu stromečkové nožky lopatky se zámkem rotoru. Výslednou napjatost v okolí trhliny znázorňuje Obr.11. Z obrázku je patrné, že u trhliny D0 dochází k jejímu zavírání. Líce trhliny navzájem penetrují, a v modelu tak dochází k fyzikálně nemožnému stavu. Penetraci kontaktních ploch, resp. lomových ploch, lze eliminovat definicí kontaktu uvnitř trhliny. Definováním kontaktu by však byla porušena podmínka volných nezatížených lícních povrchů předpokládaných pro výpočet *J*-integrálu. S ohledem na tuto skutečnost a vzhledem k tomu, že iniciační trhlina se na tomto místě zavírá, nebyla v simulacích dále uvažována.



Obr.10: Napjatost trhliny A0. Obr.11: Napjatost trhliny D0. Obr.12: Směry šíření trhliny

Následné únavové šíření trhlin iniciovaných v zámku lopatky parní turbíny může být vyvoláno jednak namáháním lopatky od proudící páry, které indukuje malé amplitudy napětí při současně vysokém statickém předpětí, a jednak zátěžnými cykly, které jsou spojeny se starty a odstávkami turbíny.

Křivka závislosti rychlosti šíření únavových trhlin na amplitudě faktoru intenzity napětí je v log-log souřadnicové soustavě ve své střední části lineární. S klesající hodnotou amplitudy faktoru intenzity napětí se křivka asymptoticky blíží k tzv. prahové hodnotě, pod kterou již k šíření trhliny prakticky nedochází. Směrem k vysokým hodnotám *K* se tato křivka asymptoticky blíží k hodnotě, při které dochází k závěrečnému lomu. Pro analytické vyjádření této závislosti zde byla podle práce Lukáš & Klesnil (1978) použita rovnice

$$\frac{dl}{dN} = A \left[\left(K_a P^{\gamma} \right)^{\beta} - K_{apz}^{\beta(1-\alpha)} \left(K_a P^{\gamma} \right)^{\alpha\beta} \right] \quad , \quad P = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_a} \quad , \tag{2}$$

kde α , β , γ , A jsou materiálové konstanty, P je parametr asymetrie cyklu a K_{apz} je prahová hodnota faktoru intenzity napětí, která pro daný materiál nabývá hodnoty $K_{apz} = 2,89$ MPa·m^{1/2}.

Z porovnání amplitud efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} (Obr.9) s prahovou hodnotou amplitudy faktoru intenzity napětí K_{apz} daného materiálu vyplývá, že hodnoty K_{aef} jsou až o tři řády nižší. Proto by nemělo vlivem cyklické složky zatížení vyvolané obtékáním lopatky vodní párou docházet k následnému únavovému šíření uvažovaných iniciačních trhlin. Prahové hodnotě šíření K_{apz} se však blíží efektivní střední hodnoty faktorů intenzity napětí K_{mef} (Obr.8). Z tohoto grafu je patrné, že v případě iniciační trhliny A0 dosahuje efektivní střední hodnota faktorů intenzity napětí K_{mef} hodnoty K_{apz} , což znamená, že jsou splněny podmínky pro další únavové šíření této trhliny. Zatěžovací cyklus odpovídá opětovnému spouštění a odstavování turbíny. U takto uvažovaného zatěžování bude amplitudu K_a^* a současně i střední hodnotu K_m^* představovat poloviční hodnota K_{mef} . Tuto situaci ukazuje Obr.13. Pro takovéto cyklické zatěžování nabývá parametr asymetrie cyklu v rovnici (2) hodnoty P = 2.



Obr.13: Cyklické zatěžování vlivem startu a odstavení turbíny.

Směry dalšího únavového šíření iniciačních trhlin A0, B0 a C0 stanovené podle kriteria největšího hlavního napětí, odpovídaly situaci, kterou znázorňuje Obr.12. Vlivem převládajícího smykového módu zatížení iniciačních trhlin docházelo bezprostředně po celé délce jejích čel k natočení směru šíření tak, aby se trhliny dále šířily pokud možno v otevíracím módu I.

5. Simulace šíření únavové trhliny

Rozbor namáhání jednotlivých modelových iniciačních trhlin v blízkosti kontaktní oblasti stromečkového zámku parní lopatky v závislosti na způsobu zatěžování popsaný v předchozí kapitole ukazuje, že pouze v případě iniciační trhliny označené jako A0 jsou splněny podmínky pro její následné únavové šíření.

Velikost amplitudy faktoru intenzity napětí indukované zatěžováním, které odpovídá cyklu start-odstávka, je poměrně malá (řádově shodná s prahovou hodnotou amplitudy faktoru intenzity napětí) a pro přírůstek délky trhliny o několik milimetrů by bylo nutné podle rovnice (2) absolvovat stovky tisíců těchto cyklů. Ačkoliv provedený výpočet neprokazuje významné únavové šíření iniciační trhliny A0 vlivem uvažovaného zatěžování, byly provedeny 4 po sobě jdoucí výpočty, které simulovaly její únavový růst. Vyhodnocovány byly především hodnoty faktoru intenzity napětí podél čela trhliny v závislosti na délce (hloubce) trhliny, směr šíření a výsledný tvar trhliny. Predikce směru šíření trhliny vycházela z kriteria maximálního tangenciálního napětí, které bylo vyčísleno v každém uzlu čela trhliny. Velikost přírůstku délky trhliny v jednotlivých uzlech čela trhliny v daném směru byla vypočtena pomocí rovnice (2), kde počet cyklů *N* byl interpretován jako měřítko zvoleného přírůstku délky. Vypočtené přírůstky modelované trhliny zachycuje Obr.14. Konfigurace výsledné trhliny je vidět na Obr. 15.



Obr.14: Průběh trhliny A v jednotlivých krocích výpočtu.



Obr.15: Konfigurace výsledné trhliny.

Obr.16: Napjatost výsledné trhliny (v řezu).

Trhliny A1 až A3 byly z důvodu redukce výpočetní náročnosti modelovány v rámci submodelu lopatky a disku. Závislost K_{mef} a K_{aef} na bezrozměrné délkové souřadnici *l* podél čel jednotlivých trhlin zachycuje Obr.17 a Obr.18. Výsledné hodnoty vykazují kolísavý charakter, který může být způsobený ne zcela relevantním tvarem čela modelové trhliny, který díky poměrně velkým přírůstkům nemusí zcela respektovat změny napjatosti v materiálu vlivem šíření trhliny, kvalitou MKP sítě atd. Pro potřeby modelování přírůstků trhliny byly dosažené průběhy faktoru intenzity napětí podél jejího čela aproximovány polynomickými funkcemi, čímž je zaručen poměrně hladký tvar dalšího čela trhliny



Obr.17: Střední hodnota efektivního faktoru intenzity napětí K_{mef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny *l*[1]



Obr.18: Amplituda efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny l[1]

Po čtvrtém prodloužení dosahovala trhlina již značných rozměrů vzhledem ke zbytkovému průřezu, čímž ovlivnila globální tuhost stromečkového zámku a přerozdělení napjatosti. Proto bylo upuštěno od použití submodelingu a trhlina A4 byla vytvořena v globálním modelu lopatky. Hodnoty K_{mef} a K_{aef} (Obr.19 a Obr.20) podél čela trhliny A4 se ve srovnání s předchozími trhlinami výrazně zvýšily. Nicméně amplituda efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} (Obr.20), která odpovídá cyklickému namáhání od proudící páry stále nedosahuje prahové hodnoty šíření K_{apz} . To znamená, že ani tato trhlina by se neměla šířit vlivem cyklického zatěžování od obtékání lopatky vodní párou při jmenovitých otáčkách turbíny. Hodnota K_{mef} se v tomto případě již může přibližovat únavové lomové houževnatosti daného materiálu. Po jejím dosažení vlivem např. dalšího šíření tak může nastat nestabilní lom, který by vedl k celkovému porušení stromečkového zámku lopatky.



Obr.19: Střední hodnota efektivního faktoru intenzity napětí K_{mef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny l[1]



Obr.20: Amplituda efektivního faktoru intenzity napětí K_{aef} [MPa·m^{1/2}] podél čela trhliny *l*[1]

6. Závěr

V článku je uvedeno hodnocení možnosti vzniku a dalšího šíření únavové trhliny ve stromečkovém zámku lopatky nízkotlakého stupně parní turbíny. K iniciaci únavových trhlin dochází v těchto případech často v blízkosti kontaktních oblastí a je spojována s degradačním procesem označovaným jako fretting, neboli únava v kontaktních podmínkách. V rámci MKP byly modelovány 4 iniciační trhliny, které se lišily jak velikostí, tak i umístěním vzhledem ke kontaktnímu rozhraní. Výsledkem modelování byly hodnoty amplitudy a střední hodnoty faktoru intenzity napětí podél čel modelových iniciačních trhlin. Uvažovány byly dva režimy namáhání. Jednak režim nominálního provozu, kde amplituda faktoru intenzity napětí (dále FIN) byla indukována silovými účinky od proudící páry a střední hodnota FIN odpovídala namáhání odstředivých sil, a jednak režim startů a odstávek, kde amplituda i střední hodnota odpovídala polovině namáhání od odstředivých sil. Dosažené výsledky ukázaly, že vlivem zatížení od proudící páry by nemělo docházet k dalšímu šíření modelovaných iniciačních trhlin. Amplituda FIN byla v těchto případech mnohem menší než amplituda prahová. V případě uvažování zátěžného cyklu start-odstávka byla pro iniciační trhlinu označenou jako A0 dosažena amplituda FIN srovnatelná s prahovou hodnotou. Nicméně vzhledem k velikosti amplitudy by pro rozšíření iniciační trhliny o několik milimetrů bylo zapotřebí několik stovek tisíc cyklů.

Druhá část práce byla věnována simulaci šíření únavové trhliny v zámku lopatky. Na základě předchozích výpočtů byla jako iniciační zvolena trhlina A0 a zatěžování od zátěžného cyklu start-odstávka. Podél čela trhliny v jednotlivých uzlech byly vyhodnocovány jak příslušné hodnoty FIN, tak i pravděpodobné směry dalšího šíření a virtuální přírůstky délky trhliny, které odpovídaly velikosti vypočteného FIN, resp. rychlosti šíření. Celkem byly modelovány 4 přírůstky délky, přičemž čelo trhliny bylo uvažováno jako prostorová obecná křivka. Amplitudy FIN podél čela jednotlivých trhlin byly srovnatelné s amplitudou prahovou, což ukazuje na velmi pomalý růst takového defektu.

V rámci MKP simulací byla odladěna jak metodika modelování obecně zakřivených únavových trhlin na základě MKP výsledků, tak i metodika diskretizace oblastí v blízkosti čela trhliny a vyhodnocení FIN a pravděpodobných směrů dalšího šíření podél čela trhliny.

Dosažení relevantnějších výsledků je podmíněno:

- Ověřením způsobu zatěžování, případně identifikací dalších silových účinků vznikajících zvláště při startu parní turbíny (v této práci bylo uvažováno zatížení při provozních otáčkách stroje).
- Ověřením použitých materiálových charakteristik.
- Zahrnutím vlivu okolního prostředí a teploty na šíření únavových trhlin.
- Verifikací metodiky submodelingu, která byla použita pro trhliny A0 až A3.
- Modelováním kratších délkových přírůstků únavových trhlin.

7. Literatura

Růžička, J. (2009) MKP modelování šíření únavových trhlin. Diplomová práce ČVUT-FS

Vlk, M. & Florian, Z. (2007) Mezní stavy a spolehlivost. Brno

Lukáš, P. & Klesnil, M. (1978) Použití lomové mechaniky pro klasifikaci materiálů na koncové lopatky parních turbín. *Strojírenství 28*