

METODIKA STANOVENÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ TURBÍNOVÉHO ROTORU PŘI TERMOMECHANICKÉ ÚNAVĚ

THERMOMECHANICS FATIGUE DAMAGE METHODOLOGY OF THE TURBINE ROTOR

Milan Růžička^{a)}, Josef Jurenka^{a)}, Martin Nesládek^{a)}, Maxim Lutovinov^{a)}, Petr Měšťánek^{b)} a Jan Džugan^{c)}

^{a)} ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6

^{b)} Doosan Škoda Power s.r.o., Tylova 1/57, 301 28 Plzeň,

^{c)} COMTES FHT a.s., Průmyslová 995, Dobřany 334 41

Abstrakt

Príspevek se zabývá metodikou výpočtu životnosti a stanovením kritických míst rotoru turbíny při zvýšené četnosti teplých i studených startů a následně postupy vyhodnocování únavového poškození s využitím teorií kombinace nízkocyklové (vysokocyklové) únavy a creepu, zejména potom Sehitoglu modelem a modelem dle Nagodeho. Popisuje potřebné materiálové parametry a schéma programových skriptů a postupu numerických simulací.

This paper describes a fatigue life methodology and determination of critical points of the turbine rotor by increased frequency of both hot and cold operational starts, followed by methods of evaluation of fatigue damage using the combination of low cycle (fatigue) and creep theory, especially the Sehitoglu and the Nagode models. It describes the necessary material parameters and schema of the program scripts and the procedure of numerical simulations.

Úvod

Evropská unie (EU) si dala za cíl podporovat energetické výrobní zdroje produkující nízký obsah uhlíkových zplodin. Priority výzkumných a vývojových iniciativ EU, a zejména programu Horizont 2020, podporují obnovitelné zdroje energie (OZE), inteligentní sítě a další udržitelné hospodářské činnosti (bydlení, doprava, průmysl atd.). Podíl OZE se v energetickém sektoru v Evropě zvýšil z 16,1% v roce 2007 na 23,5% v roce 2012 a očekává se, že v roce 2020 dosáhne 34%. Zatímco podíl výroby energie z vodních zdrojů je stále okolo 10%, podíl energie získaný z větru i slunce se výrazně zvýšil. Jejich podíl se v roce 2007 pohyboval pod 5,0%, ale v roce 2012 dosáhl 6,3% pro sluneční energii a 5,0% pro větrné elektrárny a v roce 2020 se očekává 15,0%, resp. 10,0%. S masivním nasazením OZE v souladu s rostoucí poptávkou po elektřině - zejména v důsledku přechodu na elektrickou energii jako hlavní energie pro dopravu a vytápění - vyvstávají tři hlavní problémy:

- **Stabilita:** Přerušovaná povaha dodávek větrných a zejména solárních zdrojů vede k náhlým změnám zatížení energetických soustav, a tím k ovlivňování stability sítě.
- **Flexibilita:** Výpady dodávek OZE vytvářejí potřebu flexibilních záložních elektráren schopných rychlého náběhu výkonu a s opakovanými cykly provozu.
- **Efektivnost:** Stabilita a flexibilita musí být zohledněna ve spojení s environmentální a ekonomickou efektivitou a se zvýšením životnosti těchto zdrojů.

Existují dvě alternativy, jak řešit přerušované dodávky obnovitelných energií: Buď nalézt metody skladování obnovitelné energie, nebo budovat operativní zdroje, které přemostí nízkou operativnost ve změně výkonu konvenčních elektráren. Tato alternativa předpokládá vyrovnání energetických mezer vyvolaných přerušovanými OZE a to energií vyrobenou konvenčními elektrárnami, tj. stávající infrastrukturou fosilních a jaderných zdrojů energií, případně paroplynovými zdroji. Moderní flexibilní zdroje se vyznačují specifickými

provozními podmínkami. Životnost ovlivňují zejména tzv. studené starty (kde dochází k mechanickým a termomechanickým poškozením), případně teplé starty (kde hrozí vznik nízkocyklové únavy za vysokých teplot). V tomto kontextu partneři, kteří se podílejí na projektu v rámci výzkumného programu EU Horizon 2020 s názvem FLEXTURBINE, navrhli a realizují výzkumný program vývoje upravených a nových fosilních a plynových energetických zdrojů. Tento příspěvek se zaměřuje na cíl výrazně zvýšit počty startů a odstávek, což vyžaduje vývoj metod pro prodlouženého životního cyklu turbín, včetně všech jejích namáhaných komponent.

Termomechanická únava a její poškozovací mechanismy (TMF)

Obor termomechanické únavy materiálu (TMF-Thermo-Mechanical Fatigue) pojednává o poškození způsobeném jak mechanickým, tak teplotním namáháním. Literární zdroje ukázaly, že použití postupů platných pro isothermický výpočet (např. odpovídající maximální teplotě TMF cyklu) může vést i k nekonzervativní predikci, a tedy k potencionální poruše zařízení. Je několik degradačních mechanismů, které se při TMF mohou uplatnit i vzájemně ovlivňovat:

- mechanické poškození,
- creepové poškození a
- oxidační poškození.

V literatuře lze najít celou řadu postupů výpočtů vzorků, dílů a konstrukcí pro režimy TMF. Většina z nich kombinuje mechanickou únavu s creepovým poškozením, případně s oxidací. Velmi často používaným modelem je **Neu-Sehitoglu model** [1], [2], který zohledňuje všechny výše zmíněné typy degradace. Celkové únavové poškození způsobné jedním cyklem degradačních účinků je dáno prostým součtem dílčích poškození všech výše zmíněných vlivů:

$$D = \frac{1}{N} = D_{fat} + D_{ox} + D_{creep} = \frac{1}{N_{fat}} + \frac{1}{N_{ox}} + \frac{1}{N_{creep}} \quad (1)$$

Mechanická únava je zde popisována Manson-Coffinovými křivkami určenými pro pokojovou teplotu (20° C) a účinek teploty zahrnují další uvažovaná poškození.

Oxidační proces je modelován rychlostí růstu oxidů při rozkmitu deformace $\Delta\varepsilon_{mech}$ v závislosti na teplotě a čase. Dosažením kritické tloušťky oxidační vrstvy h_{cr} dochází k jejímu prasknutí a odloupení a další modifikované oxidační degradaci působící na mateřský substrát. Výsledný vztah pro oxidační poškození je ve tvaru

$$D_{ox} = \frac{1}{N_{ox}} = \left[\frac{h_{cr} \delta_0}{B \Phi_{ox} K_p^{eff}} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \frac{2(\Delta\varepsilon_{mech})^{\frac{2}{\beta}+1}}{\dot{\varepsilon}^{1-\frac{a}{\beta}}}, \quad (2)$$

který obsahuje množství parametrů (B , β , a , δ_0 , K_p^{eff}), jež je třeba určit experimentálně. Faktor Φ_{ox} vyjadřuje faktor sfázování. Je maximální $\Phi_{ox} = 1$ pro TMF mimo fázi, a $\Phi_{ox} = 0$, jestliže sfázování nebude mít vliv na oxidační poškození. Oxidace má nejničivější účinek když TMF proces je mimo fázi (maximu teploty odpovídá minimum zatížení a naopak).

Creepové poškození v modelu Neu-Sehitoglu vychází z dutinového modelu tvárného porušování. Růst dutin a trhlin na hranicích zrn je obvykle řízen tahovým zatížením. Creepové poškození je popisováno vztahem:

$$D_{creep} = \Phi_{creep} \int_0^{t_c} A \cdot e^{\frac{-\Delta H}{RT}} \left(\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{eff} + \alpha_2 \cdot \sigma_H}{K} \right)^m dt \quad (3)$$

Rovnice pracuje s napětíovými parametry σ_{eff} efektivního napětí, σ_H hydrostatického napětí a K kinematické zpevnění při creepu (drag stress). Proto je potřeba použít vhodný konstitutivní model materiálu. Parametry α_1 a α_2 určují poměrné množství poškození v tahu či za tlaku, A a m jsou materiálové konstanty, Φ_{creep} pak faktor vlivu rozfázování analogicky jako při oxidaci.

Aby se creep projevil, musí být materiál vystaven kombinaci obou namáhání po jistý čas. Proto soufázové namáhání s rychlejšími změnami stavů nemusí vůbec creepový mechanismus nastartovat. U turbínových rotorů vyvíjených zdrojů se ukázalo, že vlastní mechanismus creepu lze zanedbat, naopak ale mohou být významná teplotní napětí, vznikající při studených startech.

Aplikovatelnost použití Neu-Sehitoglu metody je v praxi limitována potřebou určení velkého množství parametrů: modulu pružnosti a čtyř únavových parametrů, dále až deseti parametrů pro popis oxidačního procesu a šesti parametrů dutinového creepu. K tomu ještě přistupují parametry konstitutivního popisu materiálového chování (např. Druckerův s kombinací izotropního a kinematického zpevnění).

Druhá z popsáných metod TMF popisuje model Nagodeho, viz lit. [3]. Je postaven na myšlence kontinuálního modelování kumulace poškození pomocí modifikovaných hysterezních operátorů. Interpolované ε - N křivky v závislosti na teplotě dodané modelu ve formě vztahu [5], kdy do výpočtu vstupují Manson-Coffinovy křivky s teplotně závislými koeficienty:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ael} + \varepsilon_{apl} = \frac{C_{el}}{E} (2N_f)^b + C_{pl} (2N_f)^c \quad (4)$$

Modul pružnosti E ve vztahu je tzv. dynamický modul pružnosti identifikovaný na základě měření saturovaných hysterezních smyček v polovině životnosti zkušební vzorku. Únavová data jsou nejprve přeočtena pomocí uniaxiálního SWT parametru (Smith-Watson-Topper) na pole diskretních bodů o „souřadnicích“ [PSWT, d_f , T], kde d_f je poškození odpovídající počtu cyklů N_f na dané hladině PSWT a teploty. Vlastní SWT parametr je použit v modifikovaném tvaru

$$P_{SWT}(N_f, T) = \sqrt{E(T) \cdot \varepsilon_a(N_f, T) \cdot (\sigma_a(N_f, T) + \sigma_m(N_f, T))}, \quad (5)$$

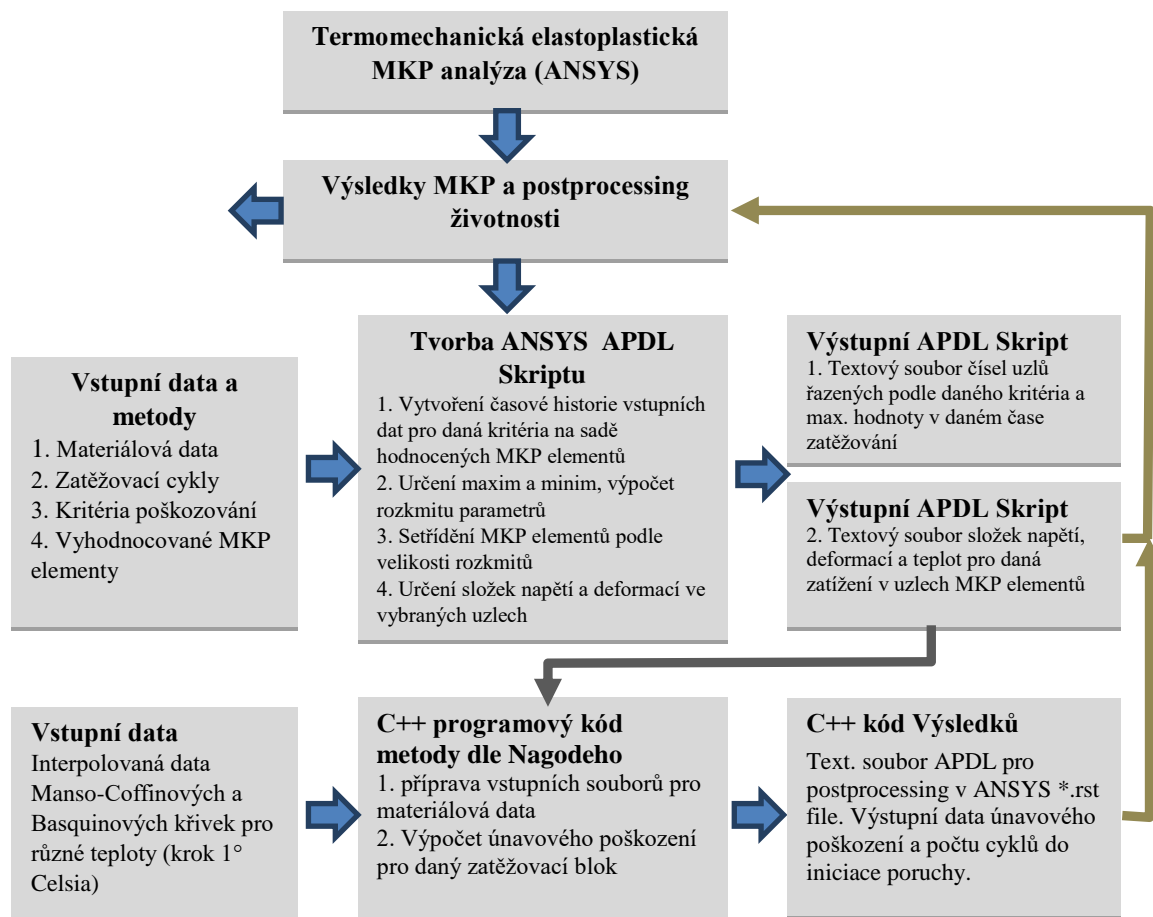
přičemž uvažujeme-li jako vstup ε - N křivky pro střídavý cyklus tah-tlak, je $\sigma_m(N_f, T) = 0$.

Z hlediska lokálního zatížení vyžaduje Nagodeho model jako vstup časovou historii elasto-plastického napětí, deformací a teplot. Tvorba sekvence zatížení a teploty je zajištěna speciálním algoritmem dekompozice amplitud a středních hodnot popsaném detailně v článku [3]. Tento algoritmus zachovává časovou souslednost dekomponovaných amplitud a středních hodnot napětí a deformace spolu s teplotami. To je důležité z hlediska následného výpočtu kumulace poškození v každém časovém okamžiku. Zároveň jsou průběžně počítány hodnoty SWT parametru a následně i poškození. Výhodou tohoto postupu je vysoká efektivnost, neboť finální poškození je spočteno v rámci jediného průchodu programového cyklu přes všechny časové inkrementy. Výpočet poškození je realizován v každém časovém okamžiku ti pomocí hysterezního operátoru (bližší popis viz [4]).

Numerická implementace metod a výpočty MKP

Z důvodů operativnosti výpočtů byl vytvořen MKP model pro predikci životnosti rotoru turbín vycházející z rotačně symetrického (2D) modelu s výpočty časově proměnné elasto-

plastické termomechanické odezvy napětí a deformace. Byly vytvořeny programové skripty pro analýzu únavy, vycházející z výstupů programu ANSYS *.rst. Výsledky výpočtů lze zobrazit v původním MKP modelu a zobrazit tak kritické oblasti na rotoru i mapu výsledných poškození, resp. počtu startů a odstávek do potenciální iniciace únavové trhliny. Výpočtové schéma ukazuje obr. 1. Podrobnější postup a výsledky predikce jsou blíže popsány v příspěvku [6].



Obr. 1 Schéma postupu tvorby programových skriptů pro predikci životnosti rotoru turbíny v podmínkách TMF

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za laskavé podpory grantu No. 653941 v rámci programu Horizont 2020 Evropské Unie.

Literatura

- [1] Sehitoglu, H. (1990): *Thermo-mechanical fatigue life prediction methods. Proc. Conf. Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques*, San Francisco, California, USA, 24 Apr 1990, pp. 47-76.
- [2] Neu, R. W.; Sehitoglu, H.: Thermo-mechanical fatigue, oxidation and creep: I. Damage mechanisms. *Metall. Trans. A* 1989 20, (9), pp. 1755–1767.
- [3] Nagode, M. (2014) : *Continuous damage parameter calculation under thermo-mechanical random loading. MethodsX 1*, pp. 81-89.
- [4] Nagode, M.; Hack, M.; Fajdiga, M. (2009): *Low cycle thermo-mechanical fatigue: damage operator approach. FFEMS 33*, pp. 149-160.
- [5] Nagode, M.; Hack, M.; Fajdiga, M. (2009): *High cycle thermo-mechanical fatigue: Damage operator approach. FFEMS 32*, pp. 505-514.
- [6] Nesládek, M.; Jurenka, J.; Lutovinov, M.; Růžička, M.; Měšťánek, P.; Džugan, J. (2017): *An assessment of thermo-mechanically induced fatigue damage of a steam turbine shaft. In: 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017*, 19-22 September, Lecco, Italy.