Experimentální Analýza Napětí 2004

MEASUREMENT AND CALCULATION OF DEFLECTION AND STRAINS IN A MECHANICALLY ASSEMBLED STEAM TURBINE DIAPHRAGM

SROVNÁNÍ MĚŘENÍ A VÝPOČTU PRŮHYBU A DEFORMACE SKLÁDANÉHO ROZVÁDĚCÍHO KOLA PARNÍ TURBÍNY

Luboš Prchlík[1], Petr Bohdan[1], Pavel Albl[1], Tomáš Míšek[1]

Diaphragms of impulse steam turbines are typically manufactured by welding of discs and blades or in special cases machined from one piece of material. Increasing requirements on manufacturing accuracy and pursuit for cost reduction lead to the new design of diaphragms, where discs and blades are connected mechanically using arrangement similar to „pin and fingers“ root used on rotating blades. Such attachement has a limited bending stiffeness and thus influences the deformation of the entire diaphragm. The calculation of deflections and stresses then becomes more complex and traditional anälytical methods may not predict deformations and stresses correctly.

In the presented work an experimental measurement on an actual diaphragm of a high-pressure steam turbine has been performed. Measured deflections and strains were in a good agreement with values predicted by FEM model. The measurement confirmed the highest stress loading of the blade near the dividing plane of the diaphragm. This critical blade was loaded by the combination of axial force and bending moment as confirmed by the strain measuremnet along blade edges. It was also observed that the stiffeness of the mechanical connection blade-disk significantly affected the total deflection of the diaphragm.

Keywords: steam turbine, strain, deflection, stress measurement, diaphragm.

Klíčová slova: parní turbína, deformace, průhyb, měření napjatosti, rozváděcí kolo.

Úvod

Dostupné analytické výpočtové metody používané pro kontrolu deformace a napjatosti rozváděcího kola vychází z předpokladů, jejichž platnost je omezena jak rozměry kola a délkou lopatky, tak způsobem spojení elementů disk-lopatka, lopatka-věnec. Napětí a deformace rozváděcího kola se v současné době vyhodnocuje metodami dle Ref. [1]-[3]. Metody vychází z předpokladu krátkých lopatek a podobných tuhostí (šířek) disku, lopatky, věnce i svaru. Z důvodu snížení profilových ztrát rozváděcích lopatek vzniká potřeba vsadit relativně štíhlé komplexně tvarované lopatky do širokého disku a věnce (šířka disku a věnce vychází z pevnostní kontroly). To však technologie svařovaného spoje mezi lopatkou a diskem (věncem) nedovoluje. Proto je svařované spojení nahrazeno kolíkovaným “vidličkovým” spojem. Pro takto sestavené rozváděcí kolo, které umožňuje zvýšit výrobní přesnost a jednoduše spojit 3D proflly s diskem a věncem se ve ŠKODA Energo vžil název „skládané rozváděcí kolo.“ Tuhost a rozložení skládaného rozváděcího kola bylo experimentálně ověřeno a srovnáno s numerickým a analytickým výpočtem.

[1] ŠKODA Energo s.r.o., Tylova 57, 316 00 Plzeň, Česká Republika, kontakt: Ing. Luboš Prchlík, Ph.D., tel.: +420378135351, e-mail: lubos.prchlik@skoda.cz.

Experiment a numerický výpočet

Popis experimentu

Zatěžování kola bylo prováděno na jednoúčelovém hydraulickém zatěžovacím zařízení zachyceném na Obr. 1. Princip zařízení spočívá v tlačení hydraulického plunžru s přítlačnou deskou proti zkoušenému rozváděcímu kolu uchycenému pomocí příchytek k základové desce. Pro ověření skutečné tlačné síly hydraulického lisu bylo provedeno cejchování zátěžné síly pomocí siloměru z akreditované zkušebny.

Vlastní experiment sestával z tenzometrického měření deformací vybraných míst na disku, věnci a lopatkách při stupňovitém zatěžování upnutého rozváděcího kola až do zatížení odpovídajícímu reálnému přetlaku v turbíně. Současně byly při jednotlivých zátěžných krocích měřeny hodnoty průhybu ve vybraných místech v rovině kolmé k dělící rovině kola.

Při tenzometrickém měření byly použity odporové foliové tenzometry firmy Hottinger Baldwin Messtechnik typ 3/12LY11 a typ 6/120LY11. K vyšetření průběhu napjatosti v lopatce byly použity tenzometrické řetězce s maximální velikostí tenzometru 1 mm. Pro snímání hodnot byla použita šedesátikanálová statická ústředna UPM 60 od stejného výrobce.

Modelování metodou konečných prvků (MKP)

Vlastní zjednodušený geometrický model rozváděcího kola byl vytvořen v programu Catia a následovně importován do prostředí MKP ANSYS. Model byl převážně mapovaně vysíťován pomocí 3D kvadratických prvků, což výrazně snížilo jejich počet.

Klíčovým problémem celého modelu bylo zvolení náhrady kontaktních ploch disk-prsty lopatky resp. věnec-prsty lopatky. Použití klasických kontaktních elementů nebylo možné vzhledem k velkému počtu stupňů volnosti celého MKP modelu. Proto byl kontakt obou ploch modelován pomocí tzv. couplingu, který sice nevystihuje zcela reálnou situaci, ale pro daný účel je postačující. Jeho hlavní výhodou je, že model zůstane lineární, což výrazně sníží výpočetní čas.

Výsledky - srovnání měření a hodnot získaných numerickým modelováním

Vybrané výsledky měření jsou prezentovány v grafech na Obr. 2 a 3. Srovnání ukazuje, že FEM model poměrně dobře vystihuje průběh napětí jak na disku rozváděcího kola, tak i v rozváděcích lopatkách (Obr. 2). Rozdíl mezi měřením a výpočtem MKP byl pozorován v případě maximální deformace rozváděcího kola (Obr. 3). Naměřená hodnota překračovala vypočtenou o zhruba čtyřicet procent, jak při srovnání s „klasickým“ výpočtem WAHL, tak při porovnání s MKP modelem. Proto byl výpočtový model rozšířen o model opěrného mezikruží používaného při měření. Po této úpravě se již vypočtené deformace poměrně dobře shodují s naměřenými, aniž by došlo k významné změně ve vypočtených napjatostech. Srovnání vybraných hodnot je uvedeno v Tab. 1.

Závěr

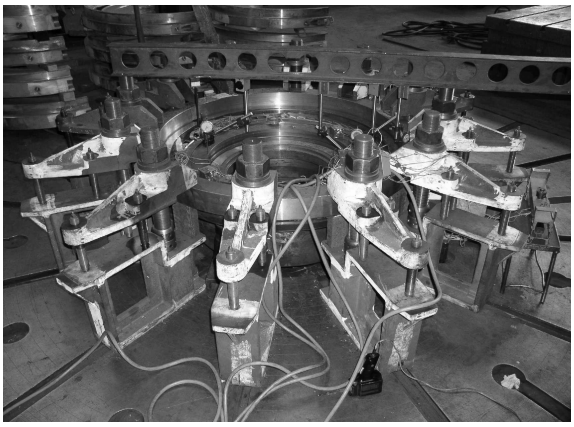
Měření potvrdilo, že při vhodně zvoleném modelu MKP lze chování skládaného rozváděcího kola postihnout numerickým výpočtem. Další úsilí směřuje k vývoji přibližných semi-analytických metod, které by jak zohlednily vliv rozdílné poddajnosti věnce a disku, tak i poddajnost spojení mezi lopatkou a diskem-věncem a umožnily nahradit v současnosti dostupné analytické metody.

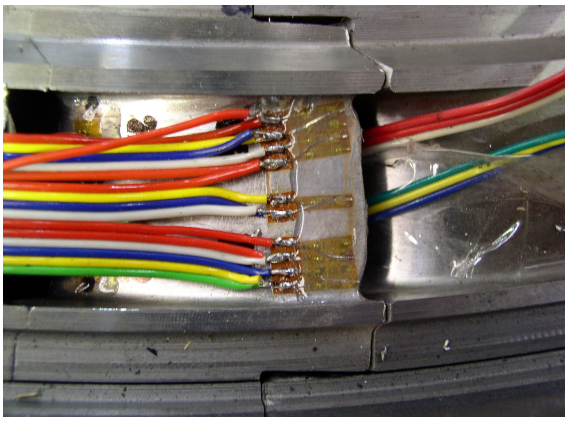
Literatura

[1] A.M.Wahl: Strength of Semicular Plates and Rings Under Uniform Pressure,Trans. ASME, vol.54, pp.311-320, 1932.
[2] P.S.Kuratov: Výpočet statické pevnosti základních součástí parních a plynových turbin - návod č.14 - CKTI Leningrad, 1966, 21 stran.
[3] A.Jindřich: Řešení deformace a napjatosti dělených mezistěn parních turbin se zalitými plechovými lopatkami - výzkumný úkol č.7/66, Fakulta elektrotechnická ČVUT - pracoviště Poděbrady, 1972.

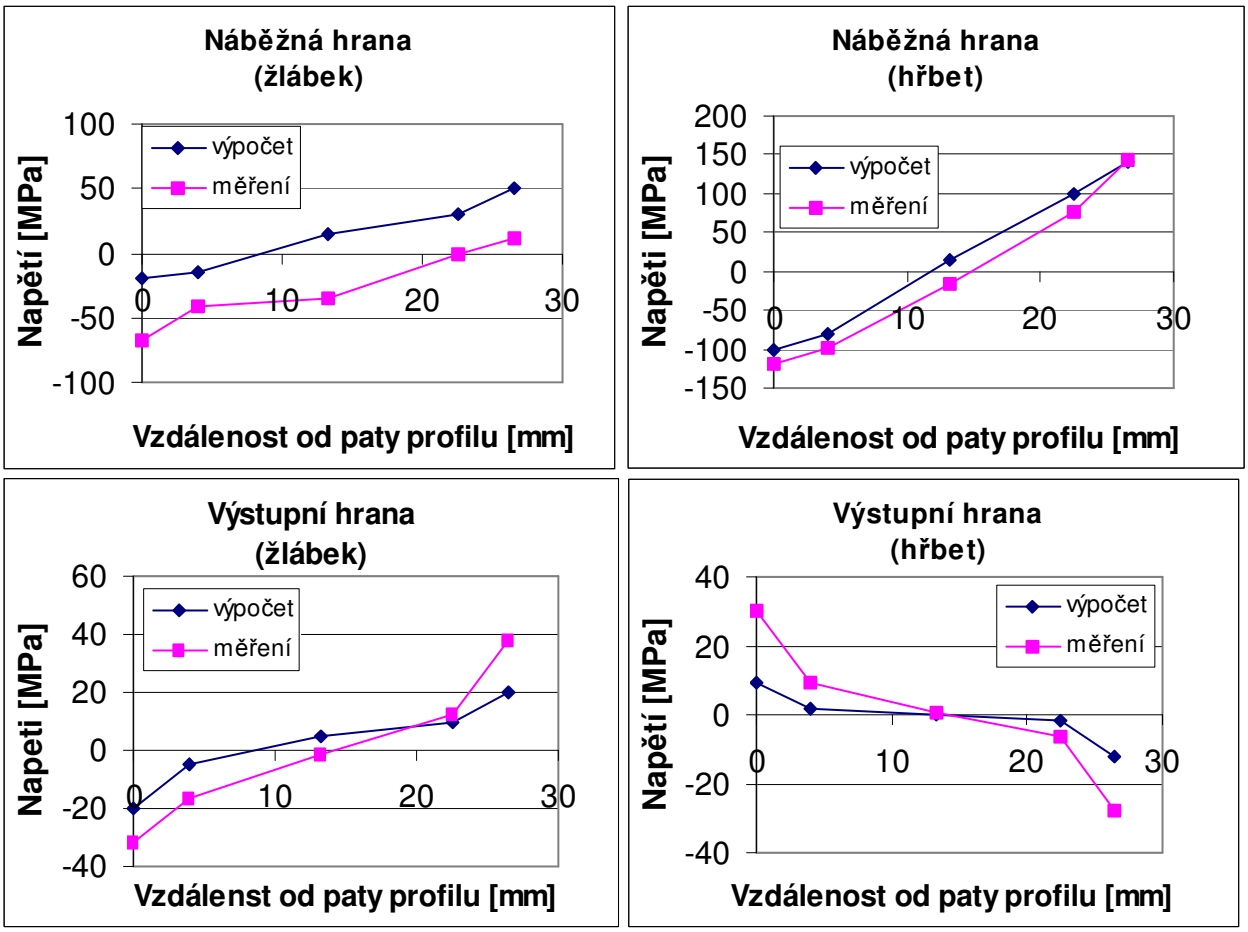
	Měření	MKP analýza – ANSYS		"Klasická" analýza WAHL (JINDŘICH)	
				opřeno o vnitřní těleso	opřeno nad mezikusem
Sledovaná veličina	zatížení liniové 320 kN	zatížení liniové 320 kN	zatížení : tlak 0,9 MPa	zatížení: tlak 0,9 MPa	zatížení: tlak 0,9 MPa
Max. axiální posuv v dělící rovině	1,1 / 1,4 mm	1,21 mm	1,04 mm	0,65 mm	0,91 mm
Max. axiální posuv kolmo k dělící rovině kola	0,9 mm	0,79 mm	0,7 mm		
Max. tangenciální napětí na vnitřní hraně disku	76 MPa	81 / -56 Mpa	55 / -38 MPa	53 MPa	69 MPa
Radiální napětí na náběžné hraně lopatky v dělící rovině kola	143 MPa	140 Mpa	120 MPa	164 MPa	76 MPa
Radiální napětí na náběžné hraně lopatky kolmo k dělící rovině	97 MPa	80 Mpa	95 MPa	89 MPa	41 MPa

Tabulka 1 Srovnání průhybů-napjatostí změřených a vypočtených metodou konečných prvků a metodou dle Ref. [3].

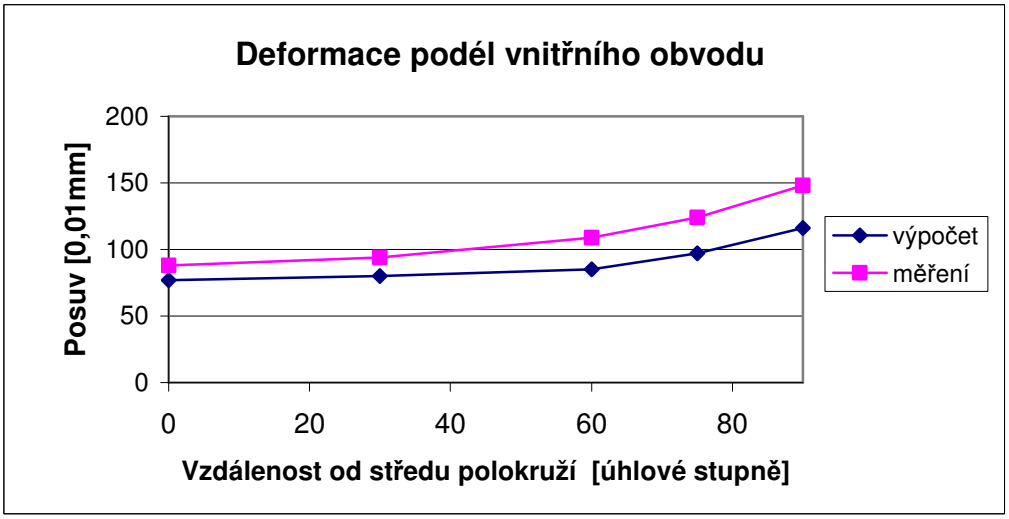




Obr. 1 Experimentální zařízení použité k měření průhybu a napjatosti ve skládaném rozváděcím kole a příklad umístění tenzometrů na lopatce v dělící rovině.



Obr. 2 Srovnání napjatosti podél listu lopatky v dělící rovině změřených tenzometrickými řetězci a vypočtených metodou konečných prvků. Náběžná hrana namáhána převážbě ohybem a výstupní smykem.



Obr. 3 Srovnání měřených a vypočtených hodnot deformace podél vnitřní hrany rozváděcího kola.