NAPJATOST TURBINOVÉ LOPATKY DÉLKY 1050 MM

Ing.R.Zimmerhakl, Ing.H.Polachová
k.p.Škoda Plzeň

Abstrakt

Předloženy jsou výsledky experimentálního ověření napjatosti v listu i závěsu turbinové lopatky 1050 mm. Napjatost v listu byla zjišťována tenzometricky, za rotace, na skutečné lopatce. Nožka byla měřena modelově, na zatěžovacím stroji a tenzometry byly kombinovány s metodou povrchové fotoelasticimetrie.

1. Úvod

Jedním z důležitých úkolů, při vývoji turbin velkých výkonů pro jaderné elektrárny, je koncová lopatka. Tyto lopatky jsou vysoce namáhaným elementem a proto je jejich vývoji věnována značná pozornost. Namáhány jsou hlavně odstředivými silami, které se projevují tahem a rozkrucováním lopatky, ale také silami od přenášeného výkonu, které lopatku ohýbají. Nově vyvinutá lopatka délky 1050 mm je konstruována jako zborcená, s proměnným profilem po délce lopatky. V nejbližší budoucnosti bude použita pro turbinu 1000 MW na sytou páru, s provozními otáčkami 3000 1/min, která je určena pro jaderné elektrárny. Lopatka je uchycena na patním průměru 1750 mm, její hmotnost je cca 25 kg a odstředivá síla 2,4 MN. V Ústředním výzkumném ústavu Škoda byla pro tuto lopatku vyvinuta nová nerezavějící ocel na bázi CrNi, vyznačující se značnou houževnatostí, s následujícími mechanickými hodnotami: mez kluzu $R_{pC,2}$=950 MPa, pevnost R_m=1000 MPa, mez únavy v ohybu σ_{oc} =560 MPa.

Pevnostní problematika lopatky byla řešena nejprve teoreticky, kdy se pevnostní výpočet listu realizoval jak v podniku Škoda, tak na dvou externích pracovištích v SVÚSS. Teoretický rozbor napjatosti stromečkového závěsu byl proveden ve Výzkumném ústavu energetických zařízení v Brně, kde se zkoumala závislost napjatosti v závěsu na výrobních a montážních úchylkách. Výpočet byl proveden v pěti alternativách, které se lišily vůlemi v zubech závěsu. Výsledky těchto teoretických prací byly podkladem pro experimentální analýzu napětí.

2. Experimentální část

Experimentální práce na této lopatce byly rozděleny do tří etap. V prvé etapě byly provedeny dynamické zkoušky lopatky, které provedl Ústřední výzkumný ústav Škoda. V další etapě byla měřena statická složka napětí v listu od odstředivých sil a konečně v třetí etapě se prováděl rozbor napjatosti v závěsu lopatky, s cílem určit také mezní stav. Obě poslední etapy byly realizovány v závodě Energetické strojírenství k.p.Škoda.

Statická složka napětí v listu lopatky byla měřena za rotace na olopatkovaném zkušebním kole. Na konci hřídele byl upevněn dvanáctikanálový rotační převodník fy HBM. Celý rotor, včetně rotačního převodníku, byl umístěn ve vakuu odstřeďovacího zařízení pro rotory turbin na zkušebně závodu. Byly použity samokompenzační tenzometry S-9-A, výrobce SVÚSS Běchovice, které byly nalepeny na dvě protilehlé lopatky kola. Každý snímač byl chráněn proti vlhkosti slabou vrstvou epoxydové pryskyřice. Všechny snímače i celá instalace po lopatce i na disku byla opatřena ocelovými krytkami o tloušťce 0,15 mm, které byly připevněny k povrchu bodovým svářením. Vodiče od tenzometrů byly ukončeny na svorkovnici z cuprextidu, umístěné na disku a od svorkovnice byl veden dvacetižilový stíněný kabel, který byl chráněn ocelovou folií. Kabel byl vývrtem rotoru přiveden na rotační převodník. K měřící aparatuře M 1000 byly tenzometry připojeny třívodičově. K registraci byl použit liniový zapisovač Servogor 461, přičemž na jednu osu záznamu byly přivedeny otáčky rotoru a na druhou signál od tenzometru. Tento zápis umožňoval jednoduchou kontrolu stability počátečních hodnot i parabolických průběhů poměrných deformací. Vzhledem k použitému dvanáctikanálovému převodníku, byly po každém najetí na požadované otáčky, změřeny čtyři snímače. Zapojení bylo polomostové tak, že kompenzační snímač, stejné výrobní serie jako snímač aktivní, byl instalován na krakorcovém nosníku a umožňoval zatížením nosníku provádět cejchování před zahájením měření každé čtveřice snímačů. Vliv dlouhých přívodních vodičů byl korigován použitím redukovaného k-faktoru. Celé měření proběhlo nejdříve při 1500 ot/min a později bylo opakováno při 2500 ot/min. Při pokusu měřit některé z tenzometrů při 3000 ot/min, došlo k poškození přívodních kabelů.

Experimentální zjištění napjatosti v nožce lopatky bylo realizováno na zatěžovacím zařízení ZU 1000/1000 na zkušebně VVZ-reakto-

ry. Zkušební kus, určený pro měření nožky, tvořil v podstatě značně zesílený list lopatky konstantního průřezu, přecházející na obou koncích ve stromečkovou nožku v měřítku 1:1. Takto uspořádaný vzorek umožňoval při jediném zatížení měřit současně na dvou závěsech. Vzorek byl na každém konci vsazen do stromečkové drážky robustní upínací hlavy, které byly konstruovány tak, aby se daly upnout do použitého zkušebního zařízení. Takto bylo celkem uspokojivě simulováno provozní zatížení závěsu lopatky. Jak ukázaly výsledky teoretického rozboru, pole napětí je v závěsu velmi nerovnoměrné, s vysokými gradienty napětí. To vyžadovalo tenzometry s velmi malou měrnou základnou, které nebyly k disposici. Byly proto použity tenzometry LY11-6/120 fy HBM a tenzometrická metoda byla kombinována s metodou povrchové fotoelasticimetrie. Na dolním závěsu byla aplikována opticky citlivá vrstva, na horním závěsu tenzometry. Použité zatěžovací zařízení umožňovalo zatížení až do 10 MN. Při ustáleném zatížení kolísala zatěžující síla ±15 kN, což je v relaci k provoznímu zatížení přibližně ±0,6 %. Měření bylo rozděleno do tří fází. V prvé fázi bylo měřeno v pružné oblasti, s cílem určit základní napětí v průřezu nožky. Druhá a třetí fáze sloužila k určení mezního stavu nožky. Zprvu bylo měřeno v pružněplastické oblasti, abychom určili okamžik vzniku prvých plastických deformací a posléze zatěžováno až do porušení.

3. Závěr

Pole napětí v listu lopatky je rovnoměrné, bez velkých gradientů a špičkových hodnot. Statická složka napětí byla ověřena na 21 místě lopatky. Oblast s maximálním napětím je na žlábkové straně lopatky, v 60 % délky od paty, v blízkosti těžnice. Hodnota napětí zde dosahuje přibližně 50 % meze kluzu při provozních otáčkách. Porovnání této hodnoty s výpočtovými ukázalo u všech tří výpočtů vcelku dobrou shodu, největší rozdíl byl asi 10 %. Při porovnávání celého napjatostního pole jsou v místech nižších napětí odchylky podstatně vyšší. Mezní stav listu je zřejmě určen vznikem prvních plastických deformací, jelikož nelze připustit větší deformace v radiálním směru, které by měly za následek dotyk s nerotačními částmi turbiny. Bezpečnost proti vzniku plastických deformací je přibližně 2.

Naproti tomu pole napjatosti v závěsu lopatky je rozloženo nesouměrně podél osy, s maximem u vnitřního radiusu nožky, v řezu nad horním zubem. Základní provozní napětí v průřezu nožky se pohybuje v rozmezí 250 ± 30 MPa. Maximální špičková napětí změřena nebyla, vzhledem k použitým tenzometrům. Podle výpočtu lze očekávat, že jejich hodnota je značně vysoká. S ohledem na redistribuci napětí v průřezu nožky, však vznik prvých plastických deformací není kritický z hlediska mezního stavu. Mezní stav je definován přetržením nožky v nejužším místě průřezu nad horním zubem, což bylo experimentálně ověřeno na dvou vzorcích. Okamžiku přetržení odpovídá 5230 ot/min a bezpečnost proti přetržení nožky při provozních otáčkách je 3.

Z uvedeného vyplývá, že kritickým místem celé lopatky je místo maximálního napětí v listu lopatky. Uvážíme-li, že olopatkovaný rotor je ve výrobním závodě odstřeďován o 15 % nad provozní otáčky a to při teplotě cca 20 °C, vidíme, že koncová lopatka je součástí, která si zasluhuje velkou pozornost.