



Vývoj ultra dlouhé lopatky 1375 mm

Doosan Škoda Power pro kondenzační parní turbíny

Doosan Škoda Power

Trvalým trendem v oblasti vývoje energetických strojů (např. parní turbíny) je **zvyšování jejich účinnosti**.

U kondenzačních parních turbín je klíčovým faktorem, který významně ovlivňuje účinnost, koncová lopatka nízkotlakové části turbíny. Snížením výstupních ztrát koncové lopatky,

prostředím páry vytváří rovněž vysoké nároky na materiál lopatky.

Vysokopevnostní korozivzdorné oceli s mezí pevnosti dosahující hodnot až 1300 MPa, které se často pou-

žijávají pro koncové lopatky, lze již jen problematicky použít pro ultra dlouhé lopatky. Proto se pro tyto lopatky zvolily titanové slitiny, např. 6Ti4Al, původně vyvinuté pro letecký průmysl.

Živají pro koncové lopatky, lze již jen problematicky použít pro ultra dlouhé lopatky. Proto se pro tyto lopatky zvolily titanové slitiny, např. 6Ti4Al, původně vyvinuté pro letecký průmysl.

Při návrhu listu lopatky je kladen značný důraz na minimalizaci velikosti odstředivých sil, neboť ty mají přímý vliv na životnost závěsu lopatky. Při každém startu turbíny dochází k zátěžnému cyklu, kdy v určitých částech závěsu dochází k překro-

trhlin, které mohou následně zapříčinit vážnou havárii. Je logické, že čím je lopatka delší, tím je její frekvenční naladění náročnější.

Při procesu vývoje ultra dlouhých lopatek se hledá jejich optimální aerodynamický a mechanický design, což často obnáší i několik desítek interakčních kroků, než jsou splněna veškerá požadovaná kritéria kladená na lopatku.

Nezbytným krokem pro ověření korektnosti numerických analýz a mechanického návrhu lopatky je zhotovení prototypového kola v reálné velikosti. Toto kolo je pak následně podrobeno rozsáhlému souboru testů v experimentálním zařízení zvaném Campbell, které je součástí vývojové a experimentální základny Doosan Škoda Power v Plzni.

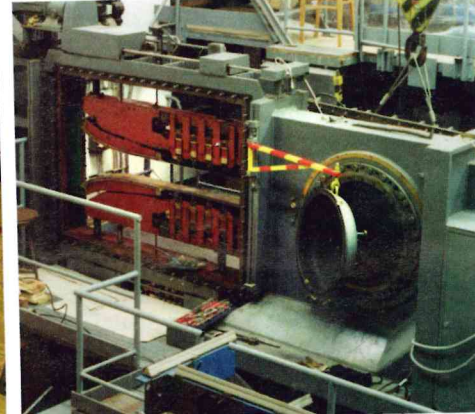
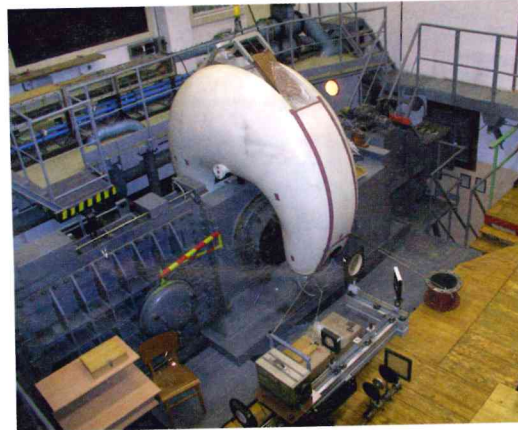
Prototyp olopatkového kola s lopatkou 1375 mm v testovacím zařízení Campbell



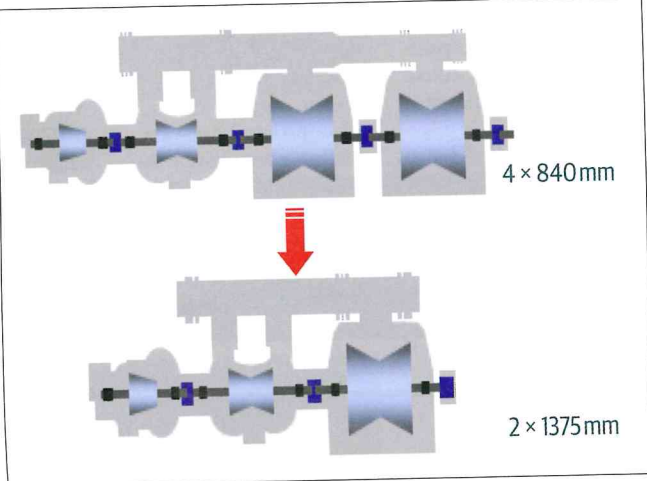
způsobeny vlivem dilatací od nerovnoměrného ohřátí. To vše má nepříznivý vliv nejen na účinnost, ale také na spolehlivost a životnost parních turbín.

Ještě v nedávné době se účinky proudu pracovní páry zkoumaly převážně experimentálně v aerodynamických vzduchových tunelech. Z praktických důvodů se až na výjimky jedná o vzduchové tunele. V České republice jsou hlavními experimentálními pracovišti cirkulační tunel ve Výzkumném zkušebním a leteckém ústavu v Praze Na Palmovce a vysokorychlostní tunel AV ČR v Novém Kníně. Tento vysokorychlostní aerodynamický tunel využívá Doosan Škoda Power k validačnímu měření také proto, že v tunelu lze dosáhnout při měření turbínových mříží vysokých hodnot výstupního Machova čísla proudu - vyšších než 2.

S nástupem výkonných počítačů se rychle rozvinuly výpočtové metody, které umožňují komplexně modelovat proudění pracovní páry v posledních stupních. Kromě nominál-



Vpravo je pohled na měřicí část tunelu v laboratoři v Novém Kníně, vlevo na vstupní dýzu tunelu

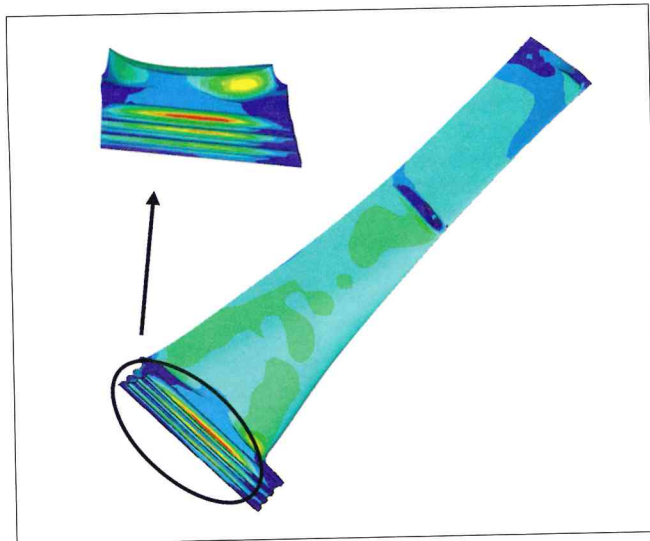


Obrázek dokumentuje zjednodušenou parní turbínu použitím delší lopatky posledního stupně. Původní oběžná lopatka posledního stupně 840mm v nízkotlakovém dílu parní turbíny byla nahrazena oběžnou lopatkou 1375mm. Rotorová soustava se tak zkrátá cca o 6 metrů

a tím zvýšením účinnosti je možné docílit větší výstupní průtočnou plochou turbíny, čehož lze dosáhnout právě použitím delší lopatky. To má mimo jiné i ekonomický přínos, neboť větší výstupní průtočná plocha turbíny v mnoha případech umožňuje snížit počet jejích nízkotlakových dílů, což má pozitivní vliv na cenu (cena dvouproutového nízkotlakového dílu se pohybuje vysoko nad 100 mil. Kč).

Vývoj ultra dlouhých koncových lopatek vyžaduje aplikovat nejmodernější numerické simulační přístupy. Je nutné optimálně skloubit aerodynamický a mechanický návrh lopatky. Z pohledu proudění páry se dosahují kolem koncových lopatek supersonické rychlosti, které vykazují hodnoty až 2 Ma (1 Ma = rychlost zvuku). Z pohledu pevnosti je kritickým konstrukčním uzlem zavěšení lopatky do rotoru. Například závěs lopatky je při jmenovitých otáčkách turbíny 3000 ot/min namáhán odstředivými silami, které jsou rovny ekvivalentní hmotnosti až 500 tun. Takto vysoké namáhání lopatky společně s korozivním a erozním

živají pro koncové lopatky, lze již jen problematicky použít pro ultra dlouhé lopatky. Proto se pro tyto lopatky zvolily titanové slitiny, např. 6Ti4Al, původně vyvinuté pro letecký průmysl.



Typický příklad napětového pole u lopatky 1375 mm, které je vyvoláno v důsledku rotace

Hlavní výhodou titanových slitin je jejich příznivý poměr mezi měrnou hmotností a pevností, která dosahuje hodnot kolem 1000 MPa. Na druhou stranu je nutné počítat s problematickou obrabitelností a zhoršenou erozní odolností, tu lze zlepšit speciálními laserovými nástřiky povrchu lopatky.

POPIS NÁVRHU LOPATKY

Oběžná lopatka je tvořena aerodynamickým listem a tzv. stromečkovým závěsem, jímž se lopatka upevňuje v disku rotoru a přenáší veškeré odstředivé síly lopatky. Ultra dlouhé lopatky jsou dále osazeny dvěma integrovanými vazebními členy, a to na špičce listu a pak přibližně v polovině délky listu. Tyto vazební členy mají za úkol jednotlivé lopatky oběžného kola obvodově propojit, a tím využít celé kolo, což má pozitivní vliv na snížení nebezpečného kmitání lopatek. Vazební člen na špičce listu plní funkci bandáže, která slouží takéž

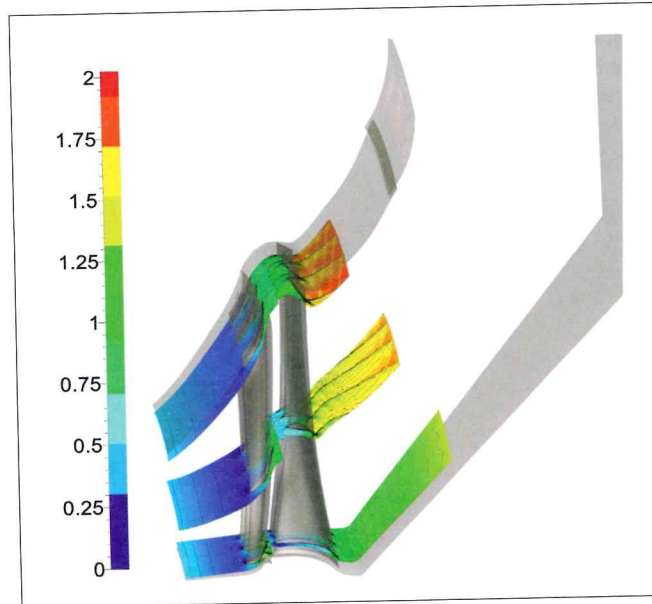
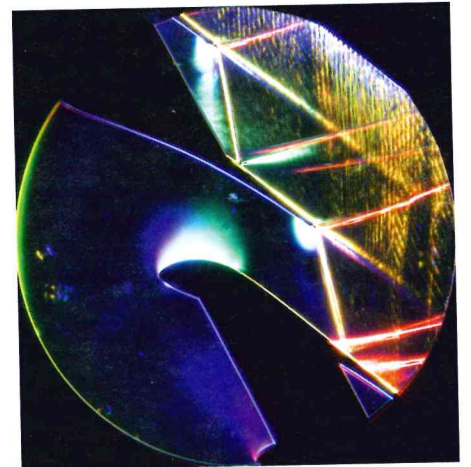
čení meze kluzu materiálu lopatky i rotoru, a to způsobuje snižování její životnosti. Pokud je lopatka použita u turbín pracujících v režimu každodenního odstavování (špičkovací turbíny), pak zvýšený počet startů turbíny je jedním z mnoha kritérií při návrhu lopatky.

Pro získání pole napjatosti v lopatce a rotoru jsou prováděny rozsáhlé nelineární numerické simulace na základě tzv. metody konečných prvků. Výsledná vypočtená napětí jsou pak následně hodnocena například z pohledu nízkocyklové únavy, kdy se stanovuje dovolený počet startů.

Každá oběžná lopatka musí být frekvenčně naladěna tak, aby se její vlastní frekvence nevyskytovaly v blízkosti násobků frekvence otáčení, což je nutné kritérium pro eliminování rezonančního kmitání lopatky. Rezananční kmitání lopatek bývá často hlavní příčinou vzniku

Jak již bylo zmíněno, v nízkotlakových dílech - zvláště na jejich konci - dosahuje proud pracovní páry supersonických rychlostí. Kondenzační páry zde vzniká vodní fáze ve formě vodních kapiček. V koncových stupních parních turbín dochází k podstatným změnám rychlosti proudu, jejichž příčinou jsou změny výkonového zatížení, které je pak zvýrazněné například u turbín s teplofikačním odběrem páry. Uvedené jevy jsou zdrojem budičích sil, které dynamicky namáhají oběžné lopatky. Rovněž vedou ke zvýšení eroze nebo k nežádoucím deformacím nízkotlakových dílů, jež jsou

Barevné šlíry proudového pole středové profilové mříže oběžné lopatky s délkou listu 1375 mm při subsonické vstupní rychlosti a výstupním Machově čísle 1,2. Výsledek optického měření, které bylo provedeno ve vysokorychlostním vzduchovém tunelu AV ČR v Novém Kníně



Výsledek 3D výpočtu proudu mokré pracovní páry v posledním stupni s titanovou oběžnou lopatkou 1375 mm. Geometrie stupně zahrnovala kromě oběžné lopatky také optimalizované tvary rozváděcí lopatky a difuzoru za stupněm. Rovněž jsou zobrazena Machova čísla proudu na patě, uprostřed lopatky a na špičce stupně. U špičky dosahuje výstupní Machovo číslo podle barevné škály hodnoty 2

ních provozních bodů lze výpočtem vyhodnotit i vlivy dílčích výkonových režimů na účinnost a životnost. Významné jsou pro návrh posledních stupňů výpočtové optimalizační metody. Výpočtovými metodami se podstatně zrychlil a zlevnil návrh nových nízkotlakových dílů s moderními koncovými stupni. V případě velmi dlouhých oběžných lopatek jsou zcela nezastupitelné.

Nově vyvinutá titanová lopatka o délce 1375 mm se může uplatnit jak u turbín velkých výkonů až 1200 MW (např. pro nové bloky jaderné elektrárny Temelín), tak i pro menší jednotělesové turbíny (např. pro paroplynové cykly).

Vývoj posledního stupně s titanovou oběžnou lopatkou byl finančně podpořen Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky, jeho grantovým programem TIP projektu FR - T11/458 s názvem Koncový stupeň parní turbíny s vysokou účinností a průtočností.

Ing. Tomáš Mišek Ph.D.,
vedoucí odboru
Dynamika a pevnost,
Doosan Škoda Power



Titanová oběžná lopatka s délkou pracovního listu 1375 mm. Závěs je tvořen přímou stromečkovou nožkou, nad středem listu vazební člen, bandáž na špičce lopatky s těsnicím břitem radiální vůle