

otáčkám jako při dimenzování rotorů. Prosté napětí v tahu u paty lopatky lze přibližně stanovit podle *Vzorce 139*. Toto napětí lze snížit použitím materiálu s nižší hustotou lopatky, například použitím titanových slitin či lopatky CMC materiálů apod. – samozřejmě to smysl jen tehdy pokud dovolené napětí v tahu nového materiálu je stejné nebo vyšší než u původního materiálu. V případě větších sérií se pevnost několika lopatek obvykle testuje na trhacím stroji [42, s. 39]. Při vyšších napětí je nutné brát v úvahu i prodloužení lopatky vlivem pružné deformace deformace.

$$(a) \quad \sigma = \frac{\rho \cdot \omega^2 \int_{r_h}^{r_{h+l}} r \cdot A \cdot dr}{A_h} \quad (b) \quad \sigma = \frac{1}{2} \rho \cdot \omega^2 (2r_h \cdot l + l^2)$$

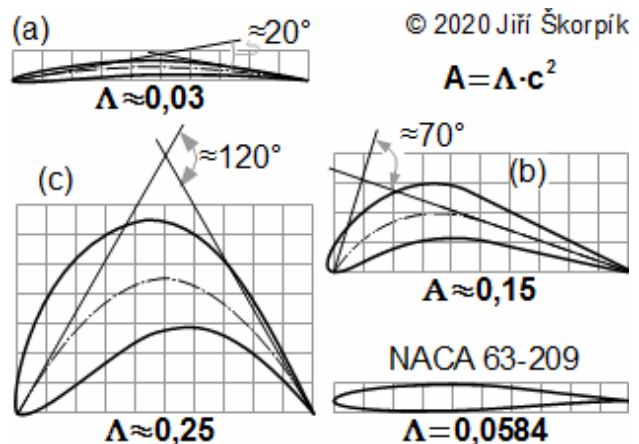
139 Napětí v tahu u paty lopatky

(a) obecný vzorec; (b) vzorec pro prizmatickou lopatku – lze použít i pro lopatku s proměnným průřezem profilu po výšce lopatky, ale v případě, že se její průřez postupně bude snižovat bude i maximální napětí u paty lopatky ve skutečnosti a naopak.  $\sigma$  [Pa] napětí v tahu;  $\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>] hustota materiálu lopatky;  $\omega$  [rad·s<sup>-1</sup>] úhlová rychlost otáčení kola;  $r_h$  [m] poloměr u paty lopatky;  $A$  [m<sup>2</sup>] průřez profilu lopatky na vyšetřovaném poloměru;  $A_h$  [m<sup>2</sup>] průřez profilu lopatky u její paty. Vzorec bere v úvahu pouze namáhání od odstředivé síly. Odvozeno pro konstantní hustotu materiálu lopatky v *Příloze 139*.

Jednotlivé průřezy profilu loptek jsou součástí jeho dokumentace. K orientačnímu výpočtu průřezu profilu lopatky můžete použít hodnoty měrných průřezů (plocha profilu v mm<sup>2</sup>, jestliže délka jeho tětiny by byla 1 mm) typických profilů uvedených na *Obrázku 1210*.

Při pevnostním výpočtu lopatky také kontrola odolnosti na otláčení stykových ploch v závěsech. V oblasti závěsu bývá často i větší napětí než v samotné lopatce a velikost potřebná velikost závěsů často určuje jak bude lopatková řada široká. U má-li závěs vícenasobné stykové plochy (například stromečkový, vícenasobný

závěs typu T...) nelze očekávat, že by bez zatížení byly všechny plochy namáhané stejně – musí nejdříve dojít k zatížení závěsů a pružné deformaci. Podrobnější pevnostní výpočet lopatky včetně zahrnutí vlivů sil do proudu pracovní tekutiny je proveden v [17].



1210 Měrné průřezy profilů lopatek

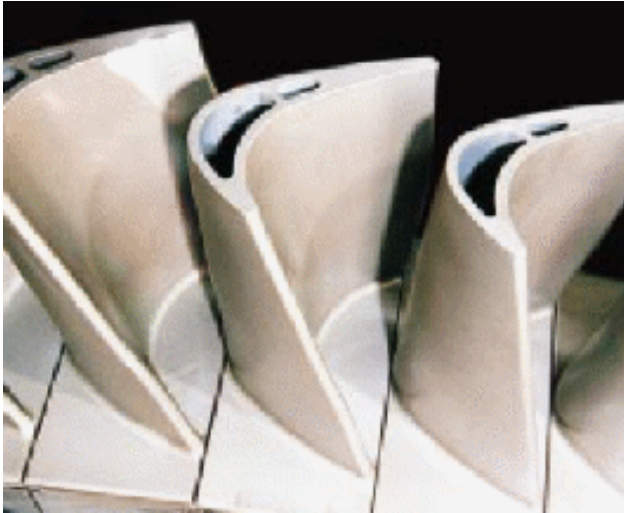
(a) měrný průřez tenké lopatky blízký stupňům tepelných turbín a turbokompresorů s malým prohnutím proudu (střední čára profilu kružnice); (b) měrný průřez lopatky blízký přetlakovým stupňům tepelných turbín se stupněm reakce 0,5 (střední čára profilu kružnice a přímka); (c) měrný průřez lopatky blízký rovnotlakým stupňům tepelných turbín (střední čára profilu parabola).  $A$  [mm<sup>2</sup>] skutečný průřez profilu lopatky;  $\Delta$  [mm<sup>2</sup>] průřez profilu při délce tětiny 1 mm.

Populárně naučnou formou o výrobě a hodnotách namáhání lopatek prvních proudových motorů pojednává publikace [43, s. 75-76, 158-159].

### • Vliv teploty na konstrukci lopatek

U prvních stupňů tepelných turbín, zejména pak u spalovacích turbín, vysoká jakost materiálu lopatek a úprava jejich povrchu nestačí k zaručení pevnosti i při vysokých teplotách pracovního plynu a je nutné lopatky aktivně chladit. Aktivním chlazením je myšleno chlazení například závěsů lopatek, chlazení celé lopatky protkané chladícími kanálky (*Obrázek 682*) nebo chlazení filmem studeného plynu, který je drobnými otvory na

přetlakové i sací straně vháněn do mezni vrstvy kolem lopatky apod. Jako chladicí médium se používá vzduch (spalovací turbíny) nebo v případě parních turbín voda [53, s. 931].



**682** Lopatky spalovací turbíny řady MS5002 od GE s chladicími kanály

Vzduch pro chlazení lopatek se odebírá v některé části kompresoru (pro první stupně expanzní části turbíny za posledním stupněm kompresoru). Kanálky chladicího vzduchu ústí na povrchu lopatky do proudu expandujících spalin. Povrch lopatek musí být ošetřen ze strany chlazení korozivzdornou vrstvou. Obrázek z [54].

Některé zajímavé koncepty chlazení lopatek z ranných dob vývoje spalovacích turbín, které se ovšem neosvědčily jsou uvedeny v [43, s. 221].

• • •

## Úvod do teorie tření

Pohyb dvou součástí po sobě znamená vždy vznik tření, které vzniká při styku dvou látek pohybujících se různou rychlostí, například povrch závitu šroubu se tře o povrch závitu matice; povrch otáčejícího se hřídele v ložisku se tře o mazací kapalinu apod. Plocha styku dvou látek se nazývá styková plocha. Podle Newtonova prvního pohybového zákona třecí síla musí postupně pohyb součástí zpomalovat pokud na tyto tělesa nepůsobí síla stejně velká jako třecí ale opačná.

Nejen v lopatkových strojích rozlišujeme tření v důsledku proudění tzv. aerodynamické a tření, které vzniká v důsledku rozdílných rychlostí pohybujících se ploch (trnění v ložiscích, ventilační ztráty apod). Tato kapitola je zaměřena na druhý případ, o aerodynamickém tření se můžete dočíst zejména v kapitolách 16. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, 38. Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny.

Tření není jenom problém sil působící na pohybující se součásti, ale i problém ztráty pohybové energie těles v důsledku vzniku třecího tepla, které ovlivňuje funkci tohoto uložení. Navíc při tření dochází často i k opotřebením povrchů stykových součástí a k fyzikálním změnám na těchto površích včetně změn tvaru a rozměru součástí. Tření je tam, kde neslouží k přenosu sil (brzdy, šrouby a matice..) nežádoucím jevem, jehož vliv se snažíme omezit, přičemž se hledají optimální opatření pro jeho potlačení mezi náklady a spolehlivosti zařízení [2].

### • Druhy tření a nosný podíl

V technické praxi je možné se setkat se třením smykovým a valivým, oba druhy tření mohou probíhat za sucha i za mazání pomocí mazací tekutiny (mazivo), která vyplňuje mezeru mezi třecími plochami,