

# 15. GEOMETRIE A MATERIÁLY LOPATKOVÝCH STROJŮ

*Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz*

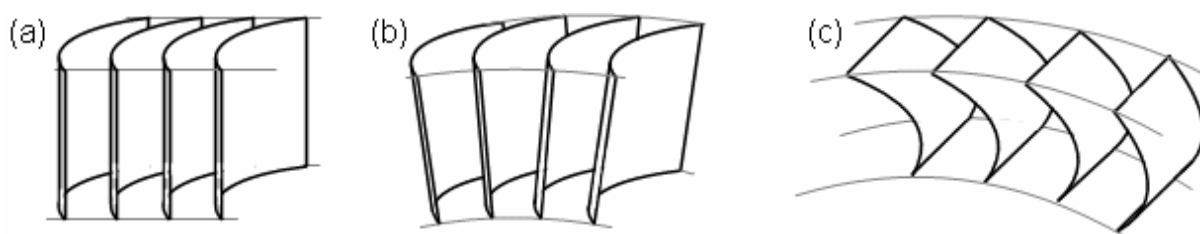
<hr/> <i>strana 1</i> <hr/> <b>Úvod</b>	<hr/> <i>strana 5</i> <hr/> <b>Tvary spirálních skříní</b>
<hr/> <i>strana 1</i> <hr/> <b>Základní pojmy lopatkových mříží</b>	<hr/> <i>strana 6</i> <hr/> <b>Materiály lopatkových strojů</b> Železné kovy • Neželezné kovy • Plasty a pryže • Ostatní materiály
<hr/> <i>strana 2</i> <hr/> <b>Tvar profilu lopatky</b>	<hr/> <i>strana 11</i> <hr/> <b>Odkazy</b>
<hr/> <i>strana 3</i> <hr/> <b>Geometrické a aerodynamické veličiny lopatkových mříží</b>	<hr/> <i>strana 14</i> <hr/> <b>Přílohy</b>
<hr/> <i>strana 4</i> <hr/> <b>Tvary vstupních a výstupních hrdel lopatkových strojů</b>	

## Úvod

V předchozích člancích tématu Lopatkové stroje je zmíněno několik typů lopatek, lopatkových mříží a dalších kanálů (hrdla, skříně...) důležitých pro funkčnost stroje. Jejich tvar a geometrie souvisí s typem lopatkového stroje, druhem pracovní tekutiny a charakterem proudění (především Reynoldsovo číslo). Optimální tvar těchto částí, jejich uspořádání ve stroji je ovlivněno i dalšími faktory jako jsou vyrobiteľnost, způsob připevnění ve stroji, zatížení (pevnost), možnosti oprav apod. Tyto faktory ovlivňují výslednou cenu stroje i jeho účinnost.

### Základní pojmy lopatkových mříží

Základní rozlišení lopatkových mříží je podle uspořádání lopatek v mříži [1]:



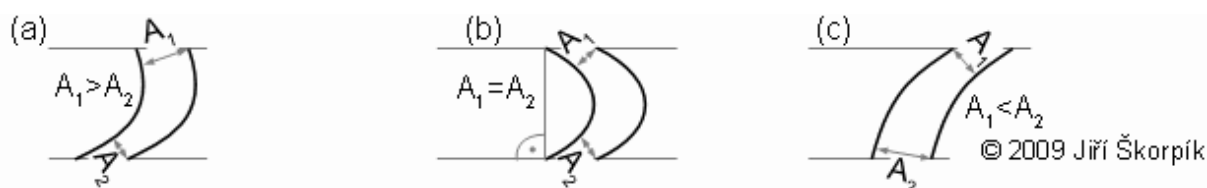
© 2009 Jiří Škorpík

1.291 Základní typy lopatkových mříží.

(a) rovinná (přímá) (u lopatkových strojů se neuplatňuje přímo, ale používá v aerodynamických tunelech lopatkových mříží odkud se výsledky přenáší do konstrukce jiných typů lopatkových mříží); (b) axiálně kruhová; (c) radiálně kruhová (například statorová řada lopatek u Kaplanovy turbíny. Lopatky jsou zjednodušeně kresleny jakoby byly vyrobeny z plechu.

Mimo tyto tři základní typy lopatkových mříží ještě existují mříže diagonální používané u diagonálních stupňů nebo axiálně-radiální používané u radiálních stupňů.

Lopatky v lopatkové mříži jsou natočené tak, aby vytvořili požadovaný typ lopatkového kanálu, přičemž existují tři základní typy lopatkového kanálu:



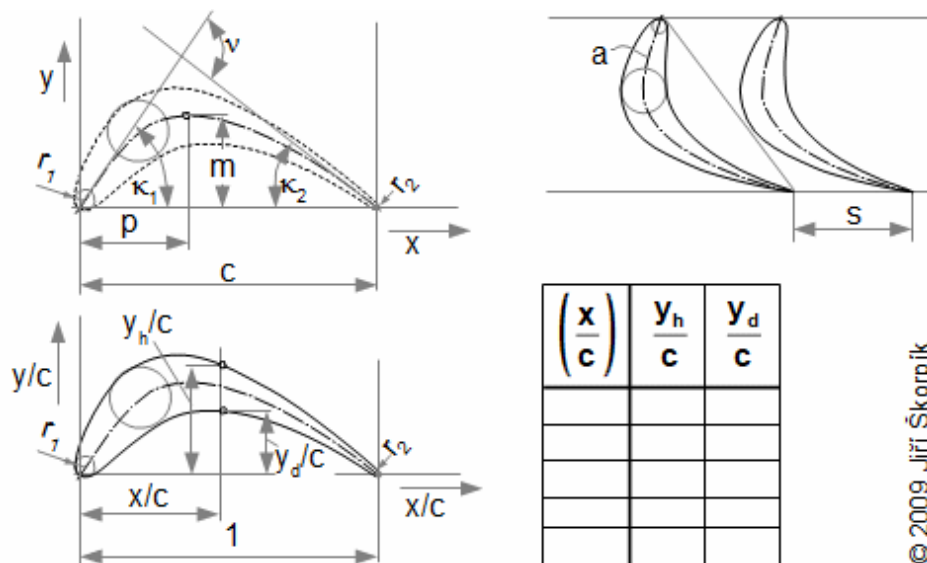
© 2009 Jiří Škorpík

2.312 Schématické znázornění základních typů lopatkových kanálů.

(a) konfuzorový lopatkový kanál (turbínový); (b) rovnotlaký lopatkový kanál; (c) difuzorový lopatkový kanál (kompresorový kanál nebo turbínový pro případ, že  $A_1$  je kritický průřez).  $A$  [ $m^2$ ] průtočný průřez v daném místě kanálu. Lopatky jsou zjednodušeně kresleny jakoby byly vyrobeny z plechu.

## Tvar profilu lopatky

Tvar profilu lopatky souvisí s rychlostním trojúhelníkem a aerodynamickým výpočtem uvedeným v článku 16. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží. Aby mohla být lopatka vyrobena musí být její tvar zaznamenán vhodným způsobem ve výrobní dokumentaci. V současnosti stačí grafický výstup (pomocí vektorové grafiky) např. v CAD systémech, protože obráběcí stroje jsou schopné s takovým výstupem pracovat přímo, ale existují i jiné formy zápisu tvaru profilu lopatky. Například se zapisují tabelárně v souřadnicích  $y$ ;  $c$  nebo pomocí **střední čáry profilu** a na ni nabalené kružnice:



© 2009 Jiří Škorpík

3.314 Tvar profilu a jeho zakótování pomocí střední čáry profilu.

**a** střední čára profilu (geometrické místo středů kružnic vepsaných do profilu); **m** [m] maximální prohnutí; **p** [m] poloha maximálního prohnutí;  $\kappa_1, \kappa_2$  [°] úhly střední čáry (v náběžné hraně profilu a odtokové hraně profilu);  $v = \kappa_1 + \kappa_2$  [°] prohnutí střední čáry profilu; **c** [m] délka tětivy; **s** [m] rozteč lopatkové mříže; **r** [m] poloměr hrany lopatky. Tvar střední čáry profilu je nejčastěji tvořen částí kružnice, paraboly a jiných typů křivek (popřípadě dvou křivek se společnou tečnou v maximálním bodě prohnutí [4, s. 123]). Značení a definice rozměrů se může lišit a je dána zvyklostí či normou (podle oblasti, literatury, autora apod.), proto se při popisu uvádí vždy obrázek se zakreslením popisovaných rozměrů. Zde je použito značení obvyklé pro prohnuté profily podle [6, s. 572].

Profily lopatek se vybírají na základě aerodynamických požadavků z katalogů profilů. Tvar profilů tenkých a málo zakřivených lze vytvořit z tzv. **základních profilů**<sup>(1)</sup> používané v aerodynamice leteckých profilů, v ostatních případech tvary profilů lopatek vychází například z experimentálních profilů testovaných přímo v mřížích. Pokud vhodný tvar profilu lopatky v katalogu chybí je nutné jej vyvinout a experimentálně ověřit.

### <sup>(1)</sup>Základní profil

Jedná se o symetrický hladký profil. Některé tvary základních profilů nebo jejich souřadnice jsou uvedeny např. [4], [6], [2]. Existuje mnoho základních profilů odlišující se od sebe tvarem, aerodynamickými charakteristikami a dalšími vlastnostmi podle kterých se vybírá nejvhodnější základní profil pro návrh lopatky. Prohnutím základního profilu vznikne požadovaný profil lopatky:

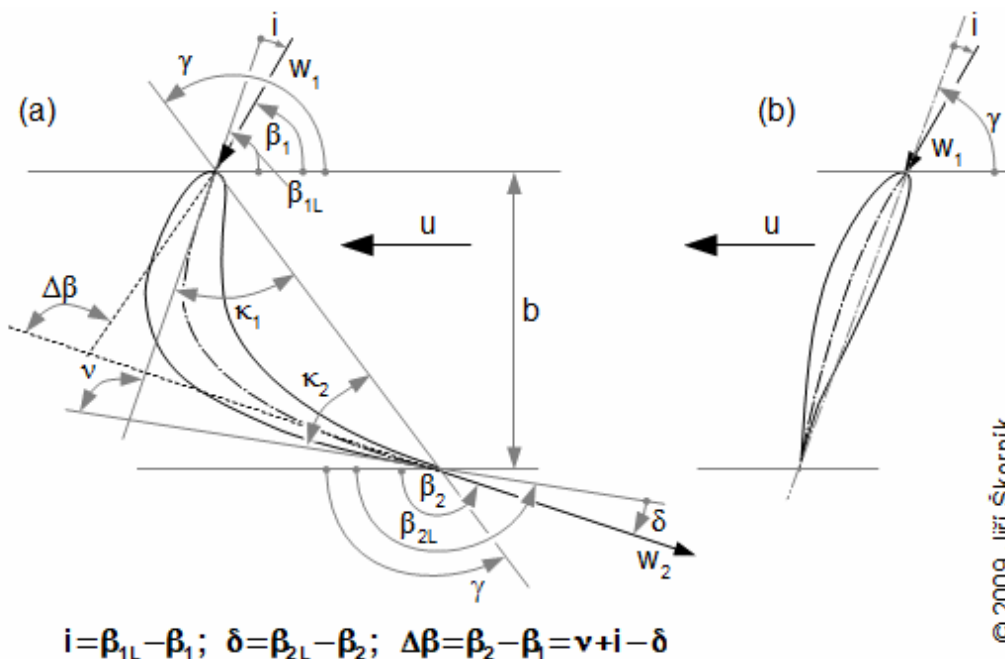


4.618 Základní profil a profil lopatky vzniklý prohnutím základního profilu.

V tomto případě se jedná o základní profil *NACA 63*, který svými vlastnostmi je vhodný pro použití u lopatek větrných turbín [3] (prohnutí je zde relativně malé). Způsoby prohnutí jsou popsány například v [1], [4], [6].

## Geometrické a aerodynamické veličiny lopatkových mříží

Umístění lopatek v lopatkové mříži je popsáno několika geometrickými a aerodynamickými úhly:



5.315 Základní geometrické a aerodynamické úhly profilu v mříži.

(a) nejpoužívanější systém kótování; (b) jiný systém kótování úhlu náběhu používaný u málo zakřivených profilů.  $\gamma$  [°] **úhel nastavení profilu v mříži**;  $\beta_{1L}$  [°] **vstupní úhel profilu**;  $\beta_{2L}$  [°] **výstupní úhel profilu**;  $i$  [°] **úhel náběhu**;  $\delta$  [°] **úhel deviační**;  $\Delta\beta$  [°] **úhel zakřivení proudu**;  $b$  [m] **šířka lopatkové mříže**;  $w_1$  [m·s<sup>-1</sup>] **nátoková rychlost**;  $w_2$  [m·s<sup>-1</sup>] **odtoková rychlost**. Podobně jako u kótování úhlů rychlostního trojúhelníku tak i v tomto případě se používá i jiné systémy kótování např. [4, s. 129], [1, s. 64].

Rozteč mříže se vypočítá z hustoty mříže:

$$\sigma = \frac{c}{s}$$

6.619 Hustota a poměrná rozteč lopatkové mříže.  
 $\sigma$  [-] hustota lopatkové mříže.

Jednotlivé geometrické parametry mají různý vliv na funkci lopatkové mříže. Například změnou úhlu nastavení lopatky v mříži  $\gamma$  stejných lopatek, lze získat jak turbínovou, tak kompresorovou lopatkovou mříž. Obvyklé hodnoty poměru  $p \cdot c^{-1}$  jsou mezi 0,4 až 0,5 [1, s. 62]. Rovnotlaké lopatkové mříže mívají poměr  $p \cdot c^{-1}$  roven 0,5 (ale není to nezbytně nutné).

Příklady aerodynamických a geometrických rozměrů lopatkových kanálů parních turbín jsou uvedeny v [8, s. 57].

Navrhnete geometrii lopatky oběžného kola nízkotlakého radiálního ventilátoru s dopředu zahnutými lopatkami,  $d_1=52,6\text{ mm}$ ,  $d_2=65,8\text{ mm}$ ,  $\beta_1=142^\circ$ ,  $\beta_2=29,5^\circ$ . Lopatka je jednoduchá z tenkého plechu. Střední čára profilu je tvořena kružnicí. Předpokládejte úhel náběhu a úhel deviační  $3^\circ$ . Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 755.

Úloha 1.755

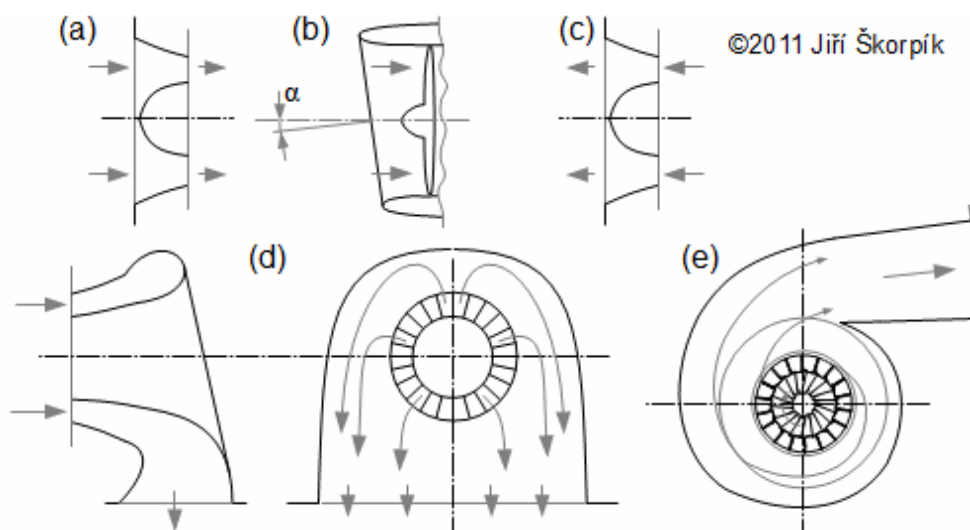
Obrázek k úloze 1.

## Tvary vstupních a výstupních hrdel lopatkových strojů

Většina lopatkových strojů obsahuje vstupní a výstupní hrdlo<sup>(2)</sup>. Hrdla slouží k přívodu pracovní tekutiny k lopatkové části stroje nebo k odvodu pracovní tekutiny od lopatkové části stroje. Požadavky na hrdla jsou dále popsány v kapitole 17. Ztráty v hrdlech lopatkových strojů.

<sup>(2)</sup>Poznámka

Například lopatkové stroje bez skříně (některé typy vrtulí a větrných turbín) žádná hrdla nemají.



7.385 Základní typ hrdel lopatkových strojů podle směru vstupu/výstupu pracovní tekutiny.

(a) axiální vstupní hrdlo (například vstupní hrdlo spalovací turbíny); (b) vstupní hrdlo proudového motoru<sup>(3)</sup>; (c) axiální výstupní hrdlo (například výstupní hrdlo axiálního ventilátoru); (d) boční hrdla (například boční hrdla axiálního kompresoru); (e) spirální skříně s tangenciálním vstupem nebo výstupem (například hrdla tangenciální u turbodmychadla).  $\alpha$  [°] odklon osy sání od osy motoru.

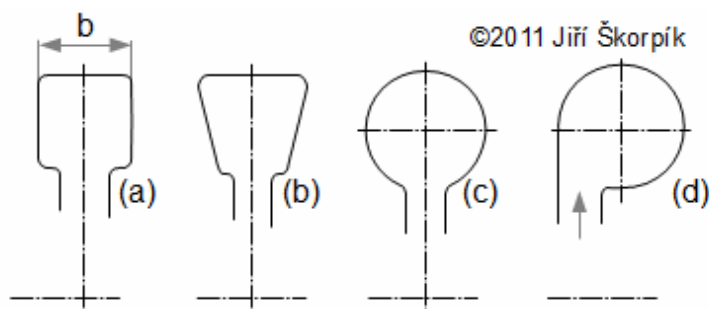
<sup>(3)</sup>Poznámka

Šikmo seříznuté axiální hrdlo proudového motoru umožňuje optimálnější rozložení tlaku před prvním stupněm turbokompresoru. Maximální výkon motoru (spotřeba vzduchu) je při vzletu letounu, a proto úhel  $\alpha$  přibližně odpovídá úhlu stoupání během startu. Více o této problematice, včetně výpočtu optimálního odklonu  $\alpha$  je uvedeno v [5, s. 424].

Hrdla axiální a boční se používají u lopatkových strojů s axiálním vstupem/výstupem z lopatkové části. Spirální skříně se používají u radiálních a diagonálních lopatkových strojů.

### Tvary spirálních skříní

Tvar spirální skříně ovlivňuje mnoho faktorů. Především se jedná o vektor rychlosti proudění vstupující do skříně a ztráty. Z rovnic a úloh uvedených v kapitole 12. Spirální kanály v lopatkových strojích plyne, že poloměr spirální skříně je podstatným způsobem ovlivňován šířkou spirální skříně. V případě, že by tato šířka byla stejná jako šířka oběžného kola (na straně spirální skříně) může poloměr skříně být i několikrát větší než poloměr oběžného kola. Především z tohoto důvodu bývá šířka spirálních skříní větší než šířka oběžného kola:



8.754 Základní tvary spirálních skříní.

(a) obdélníková (konstantní šířka skříně – použití především u ventilátorů); (b) lichoběžníková (postupné rozšiřování vede na nižší ztráty než skokové rozšíření); (c) kruhová; (d) tangenciální (používá se u výstupních spirálních skříní). **b** šířka spirální skříně.

## Materiály lopatkových strojů

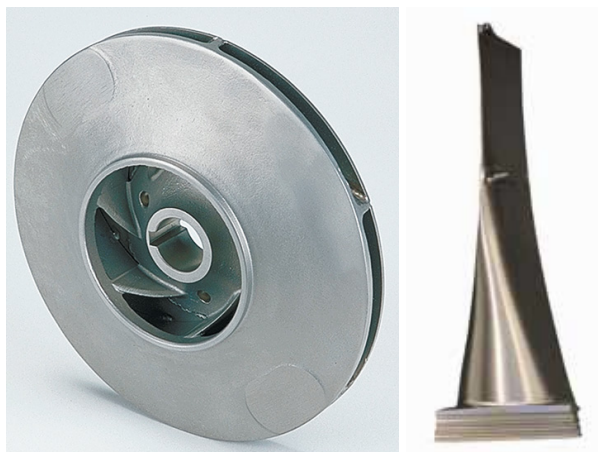
Lopatkové stroje obvykle obsahují více druhů materiálů (malé lopatkové stroje mohou být složeny z jednoho druhu plastu či kovu). Při výběru vhodného materiálu pro konkrétní část lopatkového stroje musí konstruktér přihlížet nejen k pevnostnímu namáhání dané součásti, ale musí si ověřit zda neexistují nějaké další požadavky, které výběr materiálu ovlivňují jako například: požadavek na výslednou hmotnost stroje, požadavek na vysokoteplotní odolnost součásti nebo naopak požadavek plnit funkci při extrémně nízkých teplotách (kryogenní teploty). Výběr vhodného materiálu závisí také na typu a stavu pracovní látky v dané části stroje (v průběhu pracovního procesu ve stroji se může měnit skupenství i fyzikální vlastnosti, u hydraulických strojů může dojít ke kavitaci a následně kavitační erozi a korozi), požadavky na odolnost proti otěru či korozi. Do výběru materiálu zasahuje i technolog svými požadavky na obrobiteľnosť, svařitelnost a druhy polotovarů (například jestli je požadován polotovar ve formě odlitku potom musí mít i dobré lící vlastnosti). A samozřejmě je třeba přihlížet k ceně stroje. Materiál pro lopatkový stroj vyhledáváme podle požadavků z katalogů a materiálových listů jednotlivých výrobců nebo strojnických tabulek.

### Železné kovy

Litina, ocel a její slitiny jsou nejčastějšími materiály lopatkových strojů. Jedná se o široce dostupné materiály (pokud nehovoříme o slitinách s vyšším obsahem drahých přísad). Jedná se o materiál s použitím v širokém teplotním rozsahu. Nevýhodou je vysoká hustota, což znamená vysoké hmotnosti a vyšší namáhání od hmotnostních sil (např. odstředivá). Většina železných kovů podléhá korozi a nejsou odolné kyselinám. V lopatkových strojích se lze setkat prakticky se všemi druhy oceli.

**Oceli uhlíkové** obsahují pouze  $Fe$  a menší díl uhlíku  $C$  (pod 2 % a oceli na odlitky pod 0,6 %  $C$ ) a samozřejmě další doprovodné příměsi ve stopovém množství, které se dostaly do oceli při výrobě a mohou být považovány za nečistoty, těmito stopovými prvky jsou nejčastěji  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Cu$ , které v obvyklých množstvích nemají vliv na vlastnosti oceli. Ocel obsahuje i škodlivé příměsi jako  $P$  a  $S$ , které zhoršují vlastnosti oceli prakticky i ve velmi malém množství. Mez kluzu uhlíkových ocelí je 345 až 635 MPa, měrný elektrický odpor od 0,1 až 0,4  $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$  (vyšší čísla pro vyšší obsah uhlíku), modul pružnosti kolem  $206 \cdot 10^3$  MPa, průměrná hustota  $7850 \text{ kg} \cdot m^{-3}$  [12, s. 162] (tepelné zpracování některé vlastnosti může měnit). Uhlíkové oceli jsou levné a dostupné. Uhlíkové oceli s nízkým obsahem uhlíku se dobře tváří a svařují. Díky příměsím nitridů podléhají uhlíkové oceli stárnutí při vyšších teplotách. Používají se ve formě plechů pro tváření a svařování pro výrobu dílů pracujících při nízkých teplotách cca do 250 °C (například svařované vstupní a výstupní skříně, plechové lopatky ventilátorů a pod). Nejsou odolné korozi, nutná je antikorozní úprava povrchu například zinkování povrchu či antikorozní nátěry. Pro změnu mechanických vlastností, případně zvýšení odolnosti proti korozi či stárnutí, se přidává malé množství legujících příměsí.

**Oceli slitinové** obsahují obvykle stejné prvky jako v předchozím případě (mění se složení stopových příměsí podle způsobu výroby), ale navíc obsahují další příměsi, které mění mechanické i chemické vlastnosti výsledné oceli tj. mění pevnost, odolnost vůči prostředí, svařitelnost, obrobitelnost, mění lící vlastnosti oceli apod. Nejčastějšími tzv. legujícími prvky jsou *Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Co, Ti, Al*. Jak jednotlivé příměsi mění vlastnosti oceli je uvedeno například v [12, s. 166]. Některé ocelové slitiny lze dobře tepelně, chemicky i mechanicky zušlechťovat. Nevýhodou použití legujících příměsí v oceli je, že mohou zlepšovat nějakou primární požadovanou vlastnost ale jinou zhoršovat:

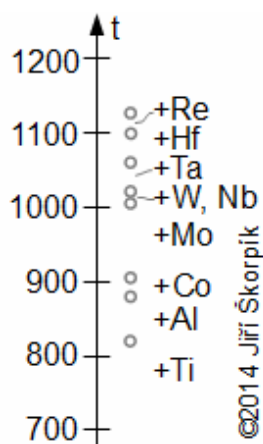


9.1014 Příklady užití ocelových slitin.

**vlevo** Oběžné kolo radiálního čerpadla z nerezových ocelových slitin. Oběžné kolo je vyrobeno ze tří částí – přesný odlitek lopatek (*1.4581-Cr-Ni-Mo-Nb*, ocel nerezová na odlitky), přední a zadní disk (*1.4404-Cr-Ni-Mo*). Tyto části jsou k sobě přivařeny. Povrch kola je očištěn elektrochemickou cestou – oproti třískovému obrábění je povrch bez trhlinek, což zvyšuje odolnost vůči korozi. Průměr oběžného kola je *200 mm*. Tento typ oběžného kola je určeno do čerpadel používaných ve farmacii a potravinářství do teploty pracovní tekutiny *120 °C*. Oběžné kolo je z čerpadla YMD společnosti Iwaki (Japonsko), [14]. **vpravo** Lopatka parní turbíny ze slitiny oceli a titanu. Lopatka je dlouhá *1375 mm* určená především jako poslední stupně parních turbín. Protože je lopatka dlouhá je napětí od odstředivé síly u závěsu lopatky vysoké, z toho důvodu se snižuje hustota materiálu lopatky pomocí titanu a tím se snižuje i napětí. Nevýhodou je snížení odolnosti povrchu proti otěru, proto se na takové lopatky navařuje pomocí laseru vrstva z tvrdšího kovu (na obrázku bez návarku). Výrobce lopatky je společnost Doosan Škoda Power (Česká republika), obrázek z [13].

Speciálním druhem slitin jsou slitiny určené pro tepelné stroje. Tepelné stroje pracují často s extrémními teplotami (u spalovacích turbín dosahuje teplota spalin *1300 °C*, u kryogenních kompresorů se teplota pracovního plynu blíží k absolutní nule). Velké zatížení lopatek od odstředivých sil při takových extrémních teplotách klade velmi vysoké nároky na materiál, povrchovou úpravu a konstrukci lopatek. Při vysokých teplotách se především zvyšuje citlivost nejen na korozi, ale snižuje se pevnost oceli a její modul pružnosti [18, Příloha 27]:





10.1001 *Potřebné příměsi materiálu lopatek podle provozní teploty.*

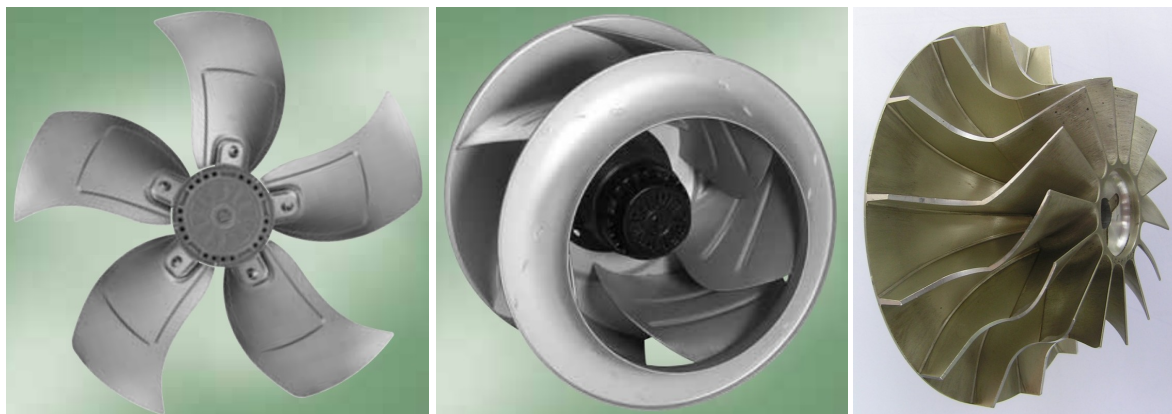
$t$  [°C] provozní teplota lopatek. Data pro graf z [10]. Složení slitin ocelí pro hřídele a lopatky tepelných turbín pro vysoké teploty jsou uvedeny v [12, s. 194], [17, s. 61] či [18, Příloha 20].

Za **litinu** jsou považovány slitiny  $Fe$  s obsahem  $C$  nad  $2,14\%$ , obvyklou příměsí je i  $Si$ . Obecně mají dobrý tlumicí účinek vibrací, ořezuvzdornost, odolnost proti korozi a relativně dobře se z ní vyrábí malé (minimální tloušťka stěny  $4-5\text{ mm}$ ) i několika tunové odlitky. Použití litiny na lopatkových strojích pro jejich dobrou ořezuschopnost se už nevyužívá, protože jako kluzné plochy jsou používány plasty, neželezné kovy nebo materiály na bázi uhlíku. Velkou výhodou šedé litiny je její relativně nízká cena v porovnání s dalšími kovovými materiály.

Z litiny se vyrábí ventilové skříně, oběžná kola čerpadel (pokud nehrozí kavitace), skříně turbín i čerpadel, výstupní i vstupní hrdla, ložiskové stojany, spirální skříně čerpadel a menších vodních turbín apod.

## Neželezné kovy

**Hliník** se svými slitinami je široce používaný kov v lopatkových strojích. Velmi dobře se odlévají i tenké a přesné odlitky. Jsou méně pevné než slitiny oceli, ale mají menší hustotu, což snižuje napětí od hmotnostních sil (například odstředivé). Ve vnějším prostředí je čistý hliník odolný korozi (zoxidovaný povrch se neodlupuje jako u oceli), to platí i pro jeho slitiny pokud neobsahují měď (např. dural). Je dobře elektricky vodivý, což na druhou stranu může způsobovat galvanickou korozi při styku s jinými kovy [19, s. 199]. Špatně snáší prostředí s vysokým nebo nízkým pH a prostředí s obsahem chloridů. V lopatkových strojích se vyskytují nejčastěji slitiny hliníku pro odlitky s pevností do  $250\text{ MPa}$  [19, s. 203], ale používá se i výrobky z plechů. Ze slitiny hliníku se odlévají oběžná složitá kola turbokompresorů a dmychadel, lopatky pro ventilátory pro venkovní použití, hliníkové skříně ventilátorů, výstupní a vstupní hrdla apod. Z plechů hliníkových slitin se vyrábí například jednoduché lopatky či skříně ventilátorů. Používají se také tam kde je požadavek na lehkou konstrukci tj. letecký průmysl a přenosná zařízení jako přenosná čerpadla.



11.1015 Hliníkové díly na lopatkových strojích.

**vlevo** rotor axiálního ventilátoru s lopatkami vyrobenými z hliníkového plechu, které jsou přišroubované k hřídeli [20], průměr je  $400\text{ mm}$ ; **uprostřed** rotor radiálního ventilátoru s laserem svařovanými lopatkami z hliníkového plechu [21], průměr oběžného kola je  $355\text{ mm}$ ; **vpravo** oběžné kolo radiálního kompresoru slepeného z jednoho odlitku (sací strana vyrobena se slévarenské slitiny hliníku) a přesného výkovku z duralu (vyšší zatížení vyžaduje kvalitnější slitinu duralu, která se ale nedá odlévat), průměr oběžného kola je  $160\text{ mm}$ , povrchová úprava eloxováním.

**Slitiny mědi** mají vhodné vlastnosti pro lití nebo kování. Mají vysokou hustotu, nízkou pevnost a nízkou teplotní odolnost. Nelze je použít tam kde je podmínka naprostého sterilního prostředí, protože se z jeho povrchu uvolňují oxidy. Nejsou odolné prostředí s vysokým pH, obsahující čpavek nebo sulfidy [9, s. 69]. Nejsou odolné na otěr. Dnes se používají především jako kovová těsnění čerpadel pro dobrou samomaznost. Nejpoužívanější slitinou mědi **bronz** (slitina  $\text{Cu}$  a  $\text{Sn}$ ), který je velmi odolný vodě obsahující chloridy jako například mořská voda, proto se z ní vyrábí lodní šrouby či oběžná kola čerpadel na mořskou vodu apod.

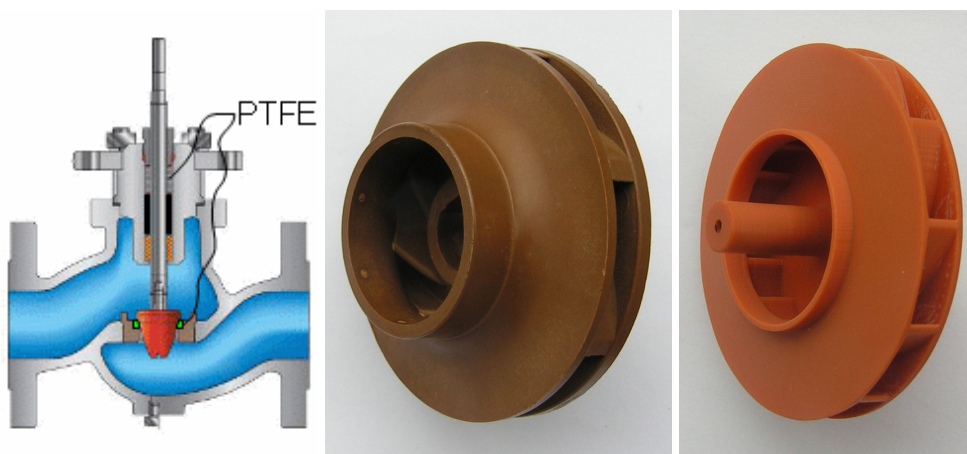
## Plasty a pryže

Plasty a pryže mohou mít velmi různorodé vlastnosti, které závisí na složení a pracovní teplotě. Dosažitelné vlastnosti těchto materiálů jsou: vysoká pružnost, přilnavost, bezmaznost a zároveň kluznost či odolnost vůči povětrnostním vlivům nebo kyselinám, dobrá obrobitelnost i lící a vstřikovací vlastnosti. Obvykle je nalezneme jako těsnící plochy ventilů, hřídelů (ucpávky i prachovky), posuvných tyčí a dosedací plochy ventilů. Jsou i pracovní hmotou 3D tiskáren na tisk prototypů oběžných kol do ventilátorů a čerpadel. Jsou častým materiálem u ministrojů, která mohou být vyrobena celá z plastu včetně ložisek, kovová část je jen hřídel a pohon (například chladicí ventilátory elektroniky a malá cirkulační čerpadla). Většina plastů je špatným elektrickým vodičem.

Pracovní podmínky plastů jsou ale velmi omezené. Obvykle musí být konstruktér připraven, že na stykových plochách plast/kov je důležité dosahovat maximální povolené drsnosti do  $Ra\ 0,4$  u intenzivně pohyblivé části s dlouhou životností spíše do  $Ra\ 0,1$ . Plastové díly na pohyblivých stykových plochách nemusí být mazány, ale také mají omezenou kluznou rychlost přibližně na  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ale obvykle ještě nižší s rostoucím tlakem, protože součin styčného tlaku a rychlosti je limitován.

Kluzné vlastnosti většiny plastů jsou výborné, ale i přesto vzniká třecí teplo, které je nutné odvádět. Proto se plastová ložiska usazují do chlazených pouzder. Chlazení plastových dílů je naprosto nezbytné u strojů, kde pracovní látky mají teplotu blízkou se teplotě hraničící s pracovní teplotou plastového dílu nebo ji dokonce překračuje. S těmito skutečnostmi je potřeba při konstrukci stroje počítat. Plasty mají relativně vysokou pevnost vzhledem ke své hustotě, což je jeden z důvodů jejich použití pro lopatky například větrných turbín. Plasty se používají i k ochraně povrchu kovových částí lopatkových strojů například před působením kyselin. Naopak plastové díly jsou velmi náchylné na ořez, a proto nevhodná do abrasivního prostředí.

Některé druhy plastů, umělých hmot a pryží, které můžete nalézt na lopatkových strojích: **Teflon** (Polytetrafluoroethylene) má vynikající kluzné vlastnosti i při teplotách kolem  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , používá se u kluzných ložisek jako antikorozi povlaky – špatně se nanáší ve větších vrstvách, má dobrou obrobnitelnost. **PPS** (Polyfenylsulfid) tvrdý plast použitelný až do  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , může se používat pro výrobu oběžných kol cirkulačních čerpadel určené pro čerpání horké vody. **PEEK** (Polyetherketon) oběžná kola čerpadel, je odolný proti ořezu i většině organických rozpouštědel, použití maximálně do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  – například oběžná kola kalových čerpadel. **EP** epoxidová pryskyřice-sklolaminát, používá se k výrobě vrtulí, lopatek větrných turbín i ventilátorů, je pevný, ale křehký, odolný povětrnostním vlivům. Případně se jako pojivo do sklolaminátu používá PF (fenolformaldehydová pryskyřice), která má vyšší pevnost. **PVC** polyvinylchlorid, používá se jako potahový materiál některých částí čerpadel pro odolnost proti kyselinám a zásadám. **NBR** (butadien-acrylnitril-kaučuk) vysoká abrazivní odolnost, použití jako těsnění-prachovka, teploty  $-40$  až  $108^{\circ}\text{C}$ . Vlastnosti plastových materiálu naleznete například v [7].



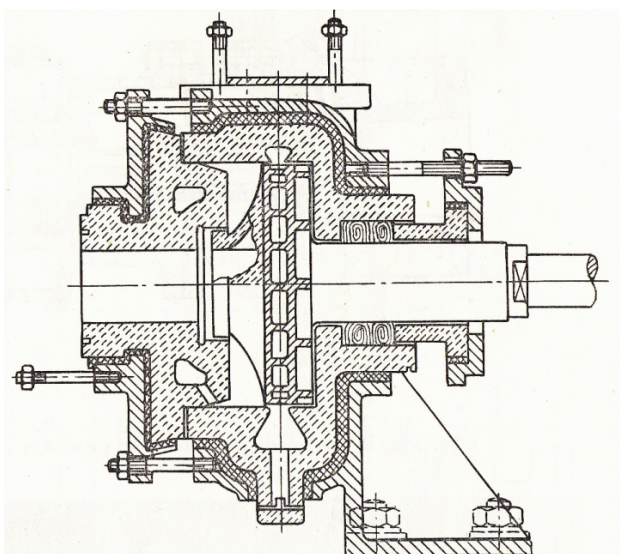
12.1013 Příklady použití umělých hmot na částech lopatkových strojů.

**vlevo** použití *PTFE* jako těsnění táhla regulačního ventilu a jako sedla ventilu, obrázek z [15]. **uprostřed** Oběžné kolo cirkulačního čerpadla ze dvou slepených kusů PPS ( $\varnothing 70\text{ mm}$ ). **vpravo** plastový prototyp oběžného kolo ventilátoru vyrobený technologií 3D tisku ( $\varnothing 60\text{ mm}$ ).

## Ostatní materiály

Především jako materiály dotykových ucpávek se používají části vyrobené na bázi **grafitu** (grafitové šňůry apod). Kluzné plochy kluzných ložisek se vyrábí z **kompozitů** na bázi měkkých kovů (nejčastěji kombinace *Sn* a *Pb* [12, s. 275]).

Pro zvýšení teplotní odolnosti lopatek se používají keramické povlaky s vysokým tepelným odporem. **Keramika** nebo **kamenivo** se používá jako výstelka přívodních kanálů čerpadel a kompresorů, především tam, kde se používá agresivních pracovních látek jako jsou kyseliny. Používají se i povlaky či návarky z jiných materiálů než je základní materiál ke snížení tření, zvýšení korozivzdornost nebo odolnosti vůči otěru. Povlak se vytváří přilepením, nátěrem, nástřikem a teplotním zpracováním (například PTFE vrstvy) nebo elektrochemickým způsobem. Možné je i chemicko-tepelné zpracování povrchu základních materiálu za podobnými účely. Pokud konstruktér je nucen kombinovat dva nebo více materiálů musí brát v úvahu rozdílnou délkovou roztažnost hlavně při velkých změnách teplot mezi klidem stroje a provozní teplotou. Pro zvýšení vysokoteplotní odolnosti lopatek se také používají kompozitní materiály s keramickou maticí (**CMC** ceramic matrix composite). Tento materiál má také relativně nízkou hustotu, což snižuje napětí v lopatce od odstředivých sil [11, s. 55].



13.1016 Čerpadlo pro čerpání kyseliny s částmi vyrobenými z kameniny.

Části vyrobené z kameniny jsou vyznačeny přerušovaným čárkováním, litina čárkováním obyčejným a vrstvy tmelu jsou čárkovány do kříže [16, s. 191].

V lopatkových strojích se mohou vyskytovat také i **bio-materiály** šetrné k přírodě (jsou v přírodě rozložitelné a jejich zpracování není energeticky náročné). Mezi takové materiály se počítá i dřevo a výrobky z celulózy či škrobů. Vyrábí se z nich obvykle skříně, izolace strojů a lopatky (například malých větrných turbín a vrtulí) apod. Nevýhodou bio-materiálů jsou poměrně velká bio-degradovatelnost, vysoké požadavky na údržbu a nižší odolnost v povětrnostních podmínkách.

Výše uvedené materiály nejsou jediné používané ke konstrukci lopatkových strojů, ale jsou nejpoužívanější. Existují i speciální aplikace lopatkových strojů například pro letectví, zdravotnictví, kde se mohou vyrábět některé části z velmi drahých materiálů (z různých důvodů jako mechanické vlastnosti, elektrické či chemické), které se širším použitím pro svou cenu nemohou vyplatit.

## Odkazy

1. KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje*, 2003. 1. vydání, upravené. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., ISBN 80-7204-297-1.

2. ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert. *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*, 1959. Druhé upravené vydání. New York: Dover publications, inc., ISBN-10:0-486-60586-8.
3. STIESDAL, Henrik. *The wind turbine components and operation*, BONUS-INFO, 2010, autumn. Brande: Bonus Energy A/S. Dostupné on-line z <http://www.windmission.dk>.
4. KOUSAL, Milan. *Spalovací turbíny*, 1980. 2. vydání, přepracované. Praha: Nakladatelství technické literatury, n. p.
5. MATTINGLY, Jack, HEISER, William, PRATT, David, *Aircraft Engine Design*, 2002. Second edition. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, ISBN 1-56347-538-3.
6. HOŠEK, Josef. *Aerodynamika vysokých rychlostí*, 1949. 1. vydání. Praha: Naše vojsko.
7. *Boedeker Plastics, Inc.*, 904 West 6th Street • Shiner, Texas 77984 USA, <http://boedeker.com>, [cit-2015-02].
8. FIEDLER, Jan. *Parní turbíny-Návrh a výpočet*, 2004. Vydání první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., ISBN 80-214-2777-9.
9. Autor neuveden. *PUMP HANDBOOK*, 2004. Bjerringbro: Grundfos industry. Dostupné na adrese <http://www.grundfos.com>, [19-09-2014].
10. Autor neuveden. Co nám může v budoucnosti nejvíc chybět? Na čem jsem závislí, *Technický týdeník*, č. 01, 2014. Praha: Business Media CZ, ISSN 0040-1064.
11. HOCKO, Marián. *Transformace leteckých lopatkových motorů na spalovací turbíny*, 2012. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-80-261-0218-2.
12. BENEŠ, Antonín. DRASTÍK, František. HOSTINSKÝ, Zdeněk. KOUTSKÝ, Jaroslav. NĚMEC, Josef. *Nauka o kovech*, 1974. Vydání druhé, upravené. Praha: SNTL.
13. MÍŠEK, Tomáš. Vývoj ultra dlouhé lopatky 1375 mm Doosan Škoda Power pro kondenzační parní turbíny, *Technický týdeník*, č. 10, 2014. Praha: Business Media CZ, ISSN 0040-1064.
14. Autor neuveden. *Čerpadla s elektromagnetickým pohonem YMD typ*. Katalog společnosti IWAKI CO.,LTD., 2-6-6, Kanda Suda-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, web: <http://www.iwakipumps.jp/>. 2014-09.
15. Autor neuveden. *Regulační ventil TYP BR12A®*. Katalog společnosti Polna corp. s.r.o. (Česká republika) dostupný na adrese <http://www.polnacorp.eu/>. 2014-09.

16. NECHLEBA, Miroslav, HUŠEK, Josef. *Hydraulické stroje*, 1966. Vydání první. Praha Státní nakladatelství technické literatury.

17. KOUTSKÝ, Jaroslav. *Development and application of Original Special Steels-Base of World Famous Level of Skoda-Works Steam turbines*, příspěvek ve sborníku konference: Energetické stroje-termomechanika-mechanika tekutin 2005, pořádala Fakulta strojní Západočeské university v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení, Česká společnost pro mechaniku, Plzeň, 2005.

18. ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína-tepelný a pevnostní výpočet*, 2007. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-;80-7043-256-3.

19. PTÁČEK, Luděk, CIHLÁŘ, Jaroslav, FORET, Rudolf, KOŘÍNEK, Zdeněk, PACAL, Bohumil, PĚNKAVA, Josef, STEIDL, Josef, ŠENBERGER, Jaroslav, ŠVEJCAR, Jiří, USTOHAL, Vladimír. *Nauka o materiálu II*, 2002. 2. opravené a rozšířené vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN 80-7204-248-3.

20. *Axial fans*, 2009. Version 07. Katalog společnosti ebmpapst. Dostupné z <http://www.ebmpapst.com>.

21. *Centrifugal fans and blowers*, 2009. Version 07. Katalog společnosti ebmpapst. Dostupné z <http://www.ebmpapst.com>.

### **Bibliografická citace článku**

ŠKORPÍK, Jiří. Geometrie a materiály lopatkových strojů, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2018-11-19]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/15.html>. English version: Shapes of parts of turbomachines. Web: [http://www.transformacni-technologie.cz/en\\_15.html](http://www.transformacni-technologie.cz/en_15.html).