

# NÁVRH INOVAČNÍHO ŘEŠENÍ LOPATEK TRYSKACÍHO KOLA

Igor Růžička

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – STROJÍRENSTVÍ

**Abstrakt:** Bakalářská práce se zabývá inovativním řešením lopatek tryskacího kola, jehož cílem je zlepšit efektivitu tryskacích kol v oblasti rozsahu plochy pokryté abrazivem. V rešeršní části je rozebrán základní princip tryskání, metody tryskání a druhy abraziv. Rešeršní část je zakončena představením křivky nejrychlejšího spádu a popisem základního modelu metací turbíny. Konstrukční část obsahuje postup návrhu lopatek s odlišnou křivostí od stávajícího řešení. Pro vybrané řešení byl proveden výpočet křivky nejrychlejšího spádu a nalezena nejbližší kružnice k této křivce, pomocí níž vznikl model lopatky s poloměrem  $R = 103$  mm. Nový model lopatek prošel simulacemi v různém natočení ve stroji v programu Ansys Fluent. Nejlepší výsledek byl zaznamenán při natočení lopatek o  $8^\circ$  a rozdělovače o  $30^\circ$ , kde bylo dosaženo 56% zlepšení v rozložení dopadové plochy a 29% zlepšení průměrné rychlosti dopadajících částic oproti referenčním přímým lopatkám.

**Klíčová slova:** inovace, 3D model, simulace, metací kolo, tryskání

## 1 Úvod

Jednou z důležitých oblastí dnešní konstrukce strojních součástí je jejich povrch, a to z hlediska jejich funkce, životnosti, ale také spolehlivosti. Povrchové vlastnosti rozhodují o odolnosti vůči opotřebení součástí, korozi nebo také o kvalitě dalších operací.

Pro průmyslovou výrobu, kde je kladen důraz na vysokou produktivitu, se dlouhodobě osvědčilo tryskání pomocí metacích turbín. Funkce těchto turbín je však výrazně ovlivněna konstrukcí pracovních částí, a to především lopatek oběžného kola. Cílem této práce je vytvořit inovativní řešení pro zlepšení efektivity těchto metacích kol. Při návrhu nové geometrie byl kladen důraz na zvětšení dopadové plochy abraziva.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Tryskání a metody trykání

Tryskání je technologický postup opracování povrchu nejrůznějších materiálů pomocí proudu abrazivních částic urychlovaných stlačeným vzduchem nebo přes metací kola. Kinetická energie částic způsobuje odlamování povrchové vrstvy nebo plastické deformace. Největší vliv na účinnost trykání má rychlost abraziva, neboť kinetická energie je  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ .

Mechanické trykání využívá k urychlování abraziva mechanickou práci rotujícího metacího kola. Kinetická energie zde vzniká působením odstředivé síly na jednotlivé částice abraziva. Částice jsou přiváděny do středu turbíny na rozdělovací kolo, z něhož se dostávají na lopatky metacího kola pomocí otvoru v pouzdře rozdělovacího kola. Toto pouzdro je možno natočit v rozsahu od  $0^\circ$  do  $30^\circ$  pro ovlivnění dopadové plochy. Výhodou této metody je vysoký hmotnostní průtok a snadná automatizace.

### 2.2 Křivka nejrychlejšího spádu

Křivka nejrychlejšího spádu, jinak také brachistochrona, je křivka, po které se bod pohybující se pouze pod vlivem gravitační síly dostane z bodu A do bodu B v nejkratším čase. Při pohybu tělesa na takové křivce je prvotní trajektorie velmi strmá a umožní tak nabrat tělesu velkou rychlost, takže urazí zbytek dráhy výrazně rychleji, a to i přes to, že dráha je delší než u přímky mezi dvěma body.

### 2.3 Výchozí model metací turbíny

Výchozí model pro účely práce byl model poskytnutý firmou Kovo Staněk s.r.o. Tento model vychází z aktuálních konstrukčních řešení průmyslových metacích turbín s rovnými lopatkami. Délka přímých lopatek je  $L = 126$  mm. Turbína pracuje při otáčkách 2 900 ot/min s hmotnostním průtokem abraziva 1,81 kg/s.

## 3 Praktická část

### 3.1 Výpočet křivky pro návrh lopatky

Návrh křivky pro novou geometrii lopatek vychází z vlastností brachistochrony. Křivka byla spočítána pomocí programu Matlab. Pro výpočet brachistochrony byla využita délka přímky  $L = 116$  mm (původní délka 126 mm zkrácena o 10 mm pro dosažení větší konstrukční vůle). Byla vytvořena nelineární rovnice vycházející z parametrického popisu cykloidy, přičemž neznámá  $\phi$  byla nalezena pomocí funkce fzero. Z této hodnoty byl určen parametr a definující tvar cykloidy.

Protože cykloida jako křivka s proměnným poloměrem křivosti by byla složitá na výrobu, byl vypočítán nejbližší možný poloměr kružnice, který se jí nejvíce blíží. Kružnice nejvíce podobná brachistochroně byla nalezena pomocí minimalizace kvadratické odchylky metodou nejmenších čtverců v rozsahu poloměrů 50 mm až 200 mm. Výsledný optimální poloměr byl  $R = 102,8$  mm, pro geometrii lopatky zaokrouhlen na  $R = 103$  mm.

### 3.2 Tvorba modelu lopatky

Model lopatky byl vytvořen v programu Catia s vnitřním rádiusem  $R = 103$  mm a tloušťkou stěny 10 mm. Ve spodní části lopatky byl vytvořen úkos  $30^\circ$ . Pro uchycení lopatky byla přidána zadní žebra s prostorem pro čep průměru 10 mm.

### 3.3 Tvorba modelu pro simulaci

Pro simulaci musel být vytvořen negativ turbíny s novou geometrií lopatek. Simulace tak probíhala v 2D prostoru.

### 3.4 Nastavení simulace v programu Ansys

Pro simulaci byl použit program Ansys s modulem Fluent a byl zvolen typ analýzy Fluid Flow (Fluent). Nastavení simulace bylo rozděleno do několika hlavních bodů. Těmito body jsou příprava geometrie, síťování modelu a nastavení fyzikálních podmínek.

### 3.3 Pevnostní výpočet čepu

Lopatky metací turbíny jsou uchyceny pomocí dvou čepů se šestihrannou hlavou průměru 10 mm. Čepy jsou namáhány na stříh od odstředivé síly vyvozené rotací turbíny. Hmotnost lopatky  $m = 0,483$  kg, vzdálenost těžiště  $R = 118$  mm, otáčky  $n = 2\,900$  ot/min, třída pevnosti čepu 10.9 ( $R_e = 900$  MPa).

Odstředivá síla  $F = m \cdot \omega^2 \cdot r = 0,483 \cdot 303,7^2 \cdot 0,118 = 5\,257$  N. Síla na jeden čep  $F_k = 2\,628,5$  N. Průřez čepu  $S = 78,54$  mm<sup>2</sup>. Napětí ve stříhu  $\tau = F_k / (2S) = 16,7$  MPa. Dovolené napětí  $\tau_{DOV} = 0,6 \cdot 900 = 540$  MPa. Bezpečnost ve stříhu  $k_\tau = 540 / 16,7 = 32,3$ . Bezpečnost v otláčení  $k_p = 540 / 131,4 = 4,1$ .

Navržený čep vyhovuje na stříh i na otláčení.

## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

### 4.1 Metodika vyhodnocení

Pro vyhodnocení výsledků ze simulací byl využit program LabVIEW. Program vyhodnocuje dopadovou plochu pomocí obrázků generovaných v programu Ansys. Data jsou zpracovávána v podobě po sobě jdoucích 10 obrázků a zapisována do textového souboru. Oblast měření částic byla nastavena od 200 mm od kraje turbíny do 1 000 mm od středu turbíny. Pro srovnání bylo provedeno celkem 14 vyhodnocení simulací: přímé lopatky jako referenční hodnoty a zakřivené lopatky s natočením  $6^\circ$ ,  $7^\circ$  a  $8^\circ$  v kombinaci s natočením rozdělovníku  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  a  $30^\circ$ .

### 4.2 Referenční hodnoty – přímé lopatky

Referenční simulace s přímými lopatkami a rozdělovačem nastaveným na  $0^\circ$  ukázala, že největší koncentrace částic dopadá do horní poloviny simulovaného prostoru. Ve vzdálenosti nad 500 mm intenzita dopadů výrazně klesá, a to o zhruba 60 %. Celková pokrytá plocha je výrazně nevyrovnaná a dopad částic je soustředěn především do pásma od 50 mm do 500 mm. Rychlost částic se pohybuje v rozmezí 47 m/s až 103 m/s, přičemž průměrná rychlost dosahuje 73 m/s.

### 4.3 Vliv natočení rozdělovníku a úhlu lopatek

Zásadním zjištěním bylo, že natočení rozdělovníku má výrazný vliv na rozložení dopadové plochy. Zlepšení se projevilo pouze u vyšších úhlů natočení, a to mezi  $20^\circ$  a  $30^\circ$  v kombinaci se zakřivenými lopatkami. U menších úhlů bylo zaznamenáno i mírné zhoršení v dopadové ploše.

Při srovnání výsledků simulovaných variant zakřivených lopatek při natočení rozdělovníku o  $30^\circ$  bylo zjištěno, že větší natočení přispívá k rovnoměrnějšímu rozložení dopadové plochy. Bylo také zjištěno, že při zvětšujícím se natočení byl zaznamenán mírný pokles v rychlostech dopadajících částic

Tab. 1 Přehled výsledků simulací a srovnání s referenčními přímými lopatkami (\* nejlepší výsledek)

Konfigurace	Natočení lopatky [°]	Natočení rozdělovníku [°]	Efektivní plocha dopadu [mm]	Změna dopadové plochy [%]	Průměrná rychlost částic [m/s]	Změna průměrné rychlosti [%]
Přímé lopatky	–	$0^\circ$	50–500	–	73	–
Zakřivené $6^\circ/0^\circ$	$6^\circ$	$0^\circ$	0–420	–7	100	+37
Zakřivené $6^\circ/10^\circ$	$6^\circ$	$10^\circ$	0–380	–16	103	+41
Zakřivené $6^\circ/20^\circ$	$6^\circ$	$20^\circ$	0–430	–4	107	+47
Zakřivené $6^\circ/30^\circ$	$6^\circ$	$30^\circ$	0–500	+11	106	+45
Zakřivené $7^\circ/10^\circ$	$7^\circ$	$10^\circ$	0–500	+11	96	+32
Zakřivené $7^\circ/20^\circ$	$7^\circ$	$20^\circ$	0–520	+16	94	+22
Zakřivené $7^\circ/30^\circ$	$7^\circ$	$30^\circ$	0–650	+44	95	+30
Zakřivené $8^\circ/10^\circ$	$8^\circ$	$10^\circ$	0–500	+11	95	+30
Zakřivené $8^\circ/20^\circ$	$8^\circ$	$20^\circ$	0–620	+38	92	+26
Zakřivené $8^\circ/30^\circ$ *	$8^\circ$	$30^\circ$	0–700	+56	94	+29

Lopatky s natočením  $8^\circ/30^\circ$  vykazují nejlepší výsledky v dopadové ploše a jsou tak universální volbou tam, kde je potřeba největší efektivita stroje.

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout inovované lopatky tryskacího kola s odlišnou geometrií oproti stávajícímu řešení s přímými lopatkami a posoudit vliv navržené geometrie na efektivitu celého procesu tryskání. Pro práci byl výchozí model poskytnut firmou Kovo Staněk s.r.o. V úvodu konstrukční části byl proveden numerický výpočet pro stanovení rádiusu zakřivené lopatky, který zohledňoval tvar křivky nejrychlejšího spádu, kterou rádius co nejlépe kopíruje. V další fázi by vytvořen model zakřivené lopatky pomocí vypočteného radiusu, který byl určen na hodnotu 103 mm. Po vytvoření základního modelu a tvaru lopatky bylo provedeno 14 simulací jak přímých, tak zakřivených lopatek s natočením  $6^\circ$ ,  $7^\circ$  a  $8^\circ$  při různém nastavení natočení rozdělovníku pro získání dostatek dat k porovnání a stanovení, zda zakřivený tvar lopatek byl přínosem pro zlepšení efektivitu tryskacího kola. Po dokončení simulací, vyhodnocení výsledků a stanovení nejlepšího nastavení pro zakřivené lopatky byl dokončen a upraven 3D model stávající turbíny tak, aby bylo možné implementovat zakřivené lopatky do zařízení. Byl vytvořen čep se závitem, který byl využit pro uchycení lopatky, a pro tento čep byl vytvořen pevnostní výpočet. Dalším krokem byla úprava bočních unašečů tryskacího kola tak, aby bylo možno uchytit navržené řešení zakřivených lopatek s čepem. Tyto unašeče byly upraveny odstraněním starého rozvrtání pro šrouby a drážek pro tvarový styk přímých lopatek. Současně byly přidány průchozí otvory do jednoho unašeče a závity do druhého unašeče. Na unašeč se závity byly přidány dodatečné výstupky pro prodloužení efektivní délky závitu a vyvážení obou stran unašečů o velikost hlavy čepu tak, aby bylo zamezeno nadměrným vibracím. Uchycení lopatek bylo navrženo přes čep se závitem, který je zajištěn proti povolení pomocí Nord-Lock podložky a lepidla na závity se střední pevností Loctite 243. Tímto řešením bylo zajištěno, aby nedošlo k nežádoucímu povolení při chodu stroje, a zároveň zůstala zachována možnost výměny pomocí ručního nářadí. V závěrečné části byly vyobrazeny výsledky jednotlivých simulací a nastavení metacího kola se zakřivenými lopatkami.

Výsledkem práce je návrh zakřivených lopatek s nastavením v metacím kole tak, aby bylo dosaženo zlepšení v efektivitě, které v případě natočení lopatek o  $8^\circ$  a rozdělovače o  $30^\circ$  představuje 56 % zlepšení v rozložení dopadové plochy a 29 % v průměrné rychlosti dopadajících částic abraziva.

## Literatura

- [1] MM Průmyslové spektrum: Základní principy tryskacích strojů. 12. 5. 2002. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zakladni-principy-tryskacich-stroju>.
- [2] Trytech: O tryskání. 28. 12. 2017. [Online]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/>.
- [3] KOVO STANĚK, s.r.o.: Tryskací zařízení nová závěsná TZNZ. [Online]. Dostupné z: <https://www.kovostanek.cz/>.
- [4] SAF Praha spol. s r.o.: Metací jednotky (kola) SAF. [Online]. Dostupné z: <https://saf.cz/katalog/tryskani/metaci-kola-saf/>.
- [5] Wikipedia: Brachistochrona. [Online]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Brachistochrona>.
- [6] J. Reichl: Úloha o brachistochroně. Encyklopedie fyziky. [Online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>.