

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Využití 3D modelování při konstrukci hydraulických strojů

diplomová práce

Autor práce: Bc. David Sitte

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

PRAHA 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. David Sitte

Technologická zařízení staveb

Název práce

Využití 3D modelování při konstrukci hydraulických strojů

Název anglicky

Use of 3D modeling in the designing of hydraulic machines

Cíle práce

Popis možností a metod modelování a 3D tisku při konstrukci strojních součástí. Rozbor vlastností součástí vyrobených pomocí 3D tisku a jejich aplikovatelnost ve zkušebnictví hydraulických strojů. Tvorba a ověření vlastností 3D modelu vybrané součásti.

Metodika

- literární rešerše
- návrh a tvorba 3D modelu vybrané strojní součásti
- ověření vlastností součásti vyrobené pomocí 3D tisku

Pozn.:

- práce by měla být strukturována do těchto oddílů: Úvod, Materiál a metody, Výsledky, Diskuse, Závěr. V pracích rešeršního charakteru lze sloučit kapitulu Materiál a metody s kapitolou Výsledky a stejně tak Diskusi se Závěrem.
- jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je Obsah, Abstrakt, Seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a Seznam použité literatury.
- je nezbytné respektovat citační pravidla dle ČSN ISO 690:2011
- vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu

Doporučený rozsah práce

60 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

3D modelování, 3D tisk, čerpadlo, turbína

Doporučené zdroje informací

- Bednář, J.: Turbíny [malé vodní elektrárny], Nakladatelství Marcela Bednářová, Blansko, ISBN 978-80-905437-0-6
- Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M.: Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development, ICTP Science Dissemination Unit, 2013, ISBN 92-95003-48-9
- Horová, I.: 3D modelování a vizualizace v AutoCADu, Computer Press, 2008, ISBN 978-80-251-2194-8
- Kloski, L.W., Kloski, N.: Začínáme s 3D tiskem, Computer Press, 2017, ISBN 978-80-251-4876-1
- Melichar, J., Bláha, J., Brada, K.: Hydraulické stroje – konstrukce a provoz, ČVUT Praha 2002, ISBN 80-01-02657-4
- Melichar, J., Vojtek, J., Bláha, J.: Malé vodní turbíny – konstrukce a provoz, ČVUT Praha 1998, ISBN 80-01-01808-0
- Varchola, M., Hlbočan, P.: Hydraulický návrh axiálního stroja, STU Bratislava, 2016, ISBN 978-80-8106-069-4
- Varchola, M., Hlbočan, P.: Hydraulický návrh odstředivých čerpadel, STU Bratislava, 2016, ISBN 978-80-8106-070-0

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 16. 2. 2018

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 11. 02. 2019

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Využití 3D modelování při konstrukci hydraulických strojů vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 1. 3. 2019



.....
podpis

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Martinu Polákovi Ph.D. za věnovaný čas a informace, které mi během konzultací ochotně poskytl. Firmě Beznoska s.r.o. za zapůjčení strojního vybavení, laboratorních přístrojů a vřelou vstřícnost. Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkým za morální podporu při psaní této práce i během celého studia.

Abstrakt: Tato práce se zabývá tvorbou 3D prototypů oběžných kol hydraulických strojů vytištěných z ABS plastu a ověřováním provozních charakteristik oproti konvenčně vyráběným oběžným kolům v čerpadlovém a také v turbínovém režimu. V úvodu práce jsou popsány používané metody modelování a současné trendy 3D tisku strojních součástí. Práce dále obsahuje vlastnosti, složení a ověření mechanických vlastností ABS pro různé způsoby tisku. Popsána jsou zejména praktická měření konkrétní geometrie různých variant 3D tisku radiálního jednostupňového odstředivého oběžného kola z ABS oproti kolům kovovým v reálném hydraulickém okruhu. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření a posouzení přínosů technologie Rapid Prototypingu pro praktická využití.

Klíčová slova: 3D modelování, 3D tisk, čerpadlo, turbína

Use of 3D modeling in the designing of hydraulic machines

Summary: This thesis describes the production of 3D prototypes of hydraulic machine impellers printed from ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) plastic, and examination of their operating characteristics in comparison with conventionally produced pump and turbine impellers. The methods of modelling which were used are described in the introduction of this thesis, and include the current trends in 3D printing of machine parts. This thesis further contains the properties, composition and verification of the mechanical properties of ABS plastic for various methods of printing. Of notable interest are the descriptions of the practical measurements of the different ways of 3D printing of radial single-stage centrifugal impeller made from ABS plastic in comparison with metal wheel of identical geometry in a real hydraulic circuit. The conclusion of the thesis evaluates the results of the measurements and assessment of the benefits of Rapid Prototyping technology for use in practical applications.

Key words: 3D modelling, 3D printing, pump, turbine.

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Cíl a metodika práce	4
3. Teoretická část.....	5
3.1. Moderní metody modelování a výroby strojních součástí.....	5
3.2. Metody 3D tisku strojních součástí	6
3.2.1. BJ – Binder Jetting.....	6
3.2.2. SLS – Selective Laser Sintering	8
3.2.3. SL – Stereolithography (SLA).....	10
3.2.4. FDM – Fused Deposition Modeling	11
3.2.5. Přehled technologií 3D tisku.....	14
3.3. Vlastnosti tiskového materiálu.....	15
3.4. Metodika materiálových zkoušek ABS plastu	15
3.5. Hydraulický zkušební okruh.....	17
3.6. Hydraulické zkoušky turbín a čerpadel.....	18
3.7. Rapid Prototyping oběžných kol hydraulických strojů.....	22
3.7.1. Příprava 3D modelu	22
3.7.2. Tvorba STL.....	23
3.7.3. Nastavení tiskového projektu PRINT.....	24
4. Praktická část	28
4.1.1. 3D Tisk prototypů oběžných kol	28
4.1.1. Finální dokončení prototypu	29
4.2. Mechanické zkoušky ABS-P430 plastu	32
4.3. Hydraulické zkušebnictví.....	33
4.3.1. Varianty oběžných kol	33
4.3.2. Testování oběžných kol.....	35
4.3.3. Čerpadlový režim při 1450 ot. min ⁻¹	37

4.3.4. Čerpadlový režim při 2950 ot. min⁻¹	39
4.3.5. Turbínový režim	40
5. Diskuse.....	42
6. Závěr.....	43
Seznam obrázků.....	44
Seznam tabulek.....	46
Seznam příloh	47
Použitá literatura	48

1. Úvod

Současná doba je svědkem obdivuhodného technologického rozvoje. Výpočetní a grafické kapacity běžně dostupných počítačů umožňují tvorbu virtuální reality našeho i budoucího světa, modelujeme celé sestavy součástí s vysokou přesností, dokážeme tvořit virtuální výpočty a simulace.

Možnosti 3D tisku jsou široké. Dají se tisknout součásti běžnými technologiemi nevyrobitelné. Také odpadají různá technologická omezení jako jsou povinné úkosity a dělicí roviny u odlitků a vylisků. Lze tisknout z obtížně obrobitelných materiálů. Rychlost a efektivita jsou stěžejními výhodami této technologie. Výroba různých variant prototypů a funkčních vzorků nebyla nikdy jednodušší. Příkladem rozmachu současného trendu může být fakt, že 3D tiskárny dokáží tisknout samy sebe.

Předkládaná práce se zaměřuje na tvorbu a ověřování plastových 3D tištěných prototypů hydraulických strojů. Především na geometrie oběžných kol, která dokáží pracovat v čerpadlovém a také turbínovém režimu. Ukazuje výhody aplikovatelnosti této high-tech technologie prototypování na nově navržené geometrie oběžných kol k dosažení vyšších účinností a lepších užitných vlastností, než mají současně vyráběná čerpadla, turbíny a čerpadlové turbíny.

2. Cíl a metodika práce

Cílem práce je ověření funkčních parametrů a užitných vlastností konkrétní geometrie 3D tisku prototypů plastových oběžných kol hydraulických strojů v porovnání s parametry kovových oběžných kol vyrobených konvenčními technologiemi, jako je například odlévání do forem.

Jsou popsány způsoby tvorby a modelování strojních součástí, používané tiskové technologie, vlastnosti tiskového materiálu. Na základě vlastních zkušeností s 3D tiskem jsou metodou komparace, respektive analogie porovnány tradiční a nové metody prototypování strojních součástí.

3. Teoretická část

3.1. Moderní metody modelování a výroby strojních součástí

Experimentální, výzkumná a výrobní činnost ve strojírenství se dnes neobejde bez použití 3D-CAD výkonných grafických systémů. Základem je parametricky vytvořený grafický trojdimenzionální model v CAD softwaru. V praxi nejpoužívanější jsou CATIA V5, CREO, INVENTOR, SOLIDWORKS, SOLID EDGE a AUTOCAD. Trh nabízí nepřehledné množství těchto programů s bohatou škálou specializovaných nadstaveb pro řešení konkrétních disciplín a oborů. (1)

Jednodušší tělesa jsou zpravidla tvořena za pomoci 2D jednoduchých skic v definovaných rovinách. Užitím prvků tažení, rotace či offsetu získáme trojrozměrný virtuální model. Ten se dále upravuje prvky pole, zaoblení, zkosení a zrcadlení... Složitější součásti jsou modelovány 3D skicami a prvky umožňujícími například tažení tvaru po křivce a šablonováním s proměnlivou geometrií. Pro tvarově složitá tělesa, jakou jsou například lopatky a oběžných kol hydraulických strojů, se používají automatické návrhové aplikace, například systém GUI. Dále lze použít 3D skenování reálné součásti s následným importem geometrie. Nebo modelování pomocí tvořících křivek a pokročilých geometrických ploch. Ty dokáží pružně reagovat na potřeby tečností, křivosti, tolerancí a spojitosti. Jednotlivé a ořezané plochy se spojují v těleso. Tělesu se přiřazují různé řídicí parametry, fyzikální atributy jako jsou materiál, barva a struktura. Virtuální modely se vkládají do sestav, ve kterých se řeší vzájemné uložení. Dále se používají pro vytváření CFD analýz kinematiky i dynamiky pohybů nebo prostředí, či MKP pevnostní výpočty. Díly a sestavy se dají virtuálně řezat, skrývat a zprůhledňovat. Výstupem jsou pak parametricky řízené virtuální modely, výrobní výkresy a vizualizace. Čím dál častěji se v praxi setkáváme s CAD/CAM a nově i Rapid Prototyping systémy, jedná se o High-tech technologie. Podkladem pro sériovou výrobu CAD/CAM jsou virtuálně namodelovaná tělesa. Veškeré výrobní a kontrolní činnosti dokáží obstarat průmysloví roboti a naprogramované stroje, často na jedno upnutí. Rapid Prototyping, který bude podrobně popsán v praktické části, jsou systémy tvorby rychlých a dnes finančně dostupných prototypů z 3D tiskáren. A nejen to, kvalita, možnosti a rychlost 3D tištěných součástí začíná nahrazovat konvenční způsoby samotné výroby. Aditivní výroba známá jako 3D tisk je tedy efektivním způsobem výroby standardních dílů a dílů zavedenými způsoby naprosto nedostupnými. Příkladem aditivní výroby mohou být oblasti tisku z kovových nebo keramických směsí prášků, užití vrstvených kompozitů anebo

skořepinové výrobky s voštinovou výztuží. Výrobní výkresy zůstávají pouze v digitální podobě a slouží pro potřeby komunikace technologů a projektantů. (1), (2), (3), (4), (5), (6)

Budoucnost patří už dalšímu stupni – 4D tisku. Tato technologie vychází z principů 3D tisku a přidává rozměr času, a to hned ve více smyslech. Hlavními přínosy oproti původním metodám jsou možnosti použití nové generace takzvaně inteligentních materiálů a tisk více druhů materiálů ve stejném čase... Vytiskovaná součást má účelně nastavené schopnosti samostatně reagovat na fyzikální nebo chemické podmínky prostředí ve kterém pracuje. Umí například podle teploty dynamicky měnit svoji délku, tuhost a náklon jednotlivých částí v dimenzi času. Příklady použitých aplikací jsou inteligentní kleště pro chirurgii, samo skládací balení nebo adaptivní větrné turbíny. (7)

3.2. Metody 3D tisku strojních součástí

Výrobci nabízejí pestrou škálu amatérských a průmyslových 3D tiskáren. V této kapitole budou stručně popsány principy, výhody a nevýhody nejpoužívanějších technologií ve strojírenství. Základní dělení principů 3D tisku a v praxi zažitá názvosloví technologií tisku se odvíjí podle typu materiálu pro tisk:

- Práškové
 - BJ – Binder Jetting
 - SLS – Laser Sintering
- Kapalné
 - SL – Stereolitography (SLA)
- Tuhé
 - FDM – Fused Deposition Modeling

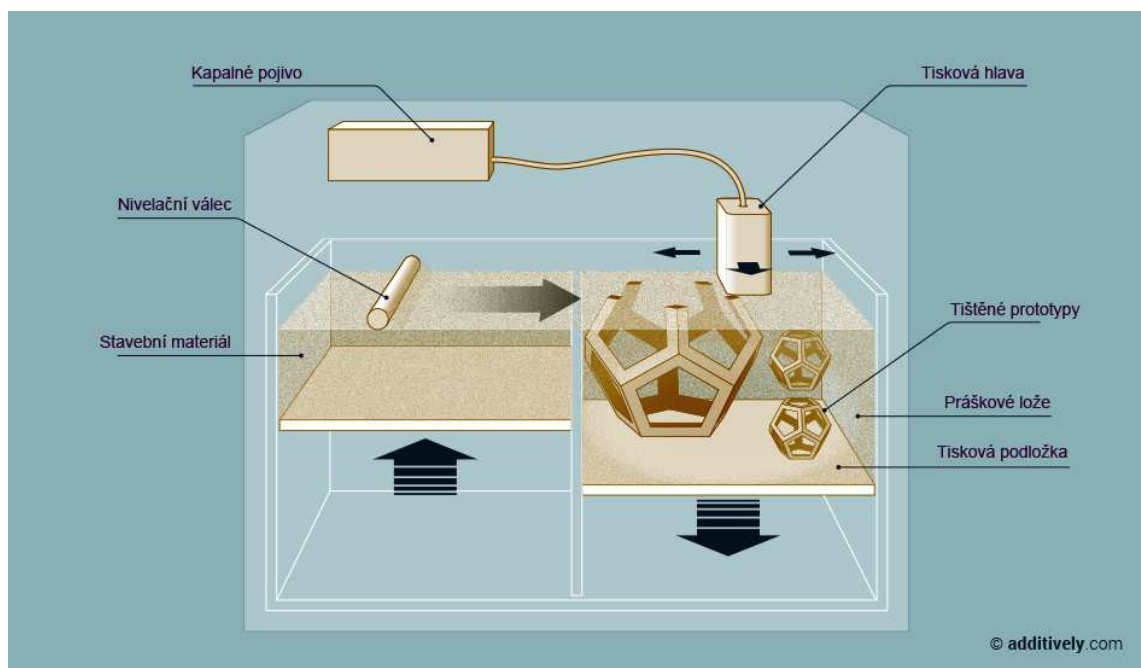
Společným principem výroby součásti 3D tiskem je postupné přidávání materiálu po jednotlivých vrstvách, oproti klasickému obrábění, kdy se materiál ubírá. Umožňuje tak vytvořit komplikované struktury nejrůznějších tvarů.

Uváděné charakteristiky jednotlivých technologií 3D tisku jsou pouze orientační a vždy závisejí na možnostech konkrétního typu tiskárny. (8)

3.2.1. BJ – Binder Jetting

Tiskárna precizně rozmístí tenkou vrstvičku prášku na tiskovou platformu a tisková hlava přesně aplikuje kapalné pojivo, kterým spojuje částice prášku dohromady. V dalším

kroku se podložka posune o tloušťku vrstvy směrem dolů a je nanášena nová vrstva prášku. Proces nanášení prášku a lepení se tímto postupem neustále opakuje do vytištění všech naplánovaných součástí v práškovém loži. Celý postup je schematicky zobrazen na *Obr. 1*.



Obr. 1 Technologie 3D tisku Binder Jetting (9)

Vytištěné díly leží v loži nespojeného prášku, a tudíž nepotřebují žádné další tiskové podpory dutých prostor. Celý tiskový objem může být naplněn více díly a vytištěn společně v jedné tiskové úloze. (9)

Výhody a nevýhody:

Binder Jetting je poměrně rychlá a levná technologie výroby prototypů a součástí, ve srovnání např. s tavením materiálu laserovými paprsky v ochranné plynné atmosféře – viz dále. Binder Jetting je schopen pracovat se širokým portfoliem materiálů jako je například sádra, keramika anebo prášky kovů. Výtisky mají precizní detaily a hodí se pro testování jednotlivých součástí v sestavách.

Vytištěné díly jsou vytvořeny slepením prášku a pojiva a mohou být křehké, pokud nejsou dále zpracovávány. Z tohoto důvodu nejsou příliš vhodné pro zatěžované funkční součástky. Nevýhodou může být obtížně odhadnutelná deformace výrobku při samotném tisku a při následném sušení a slinování. (10)

Charakteristika:

- Maximální stavební prostor: 4000x2000x1000 mm³
- Minimální velikost součásti: 0,1mm
- Rozměrová tolerance: ±0,13mm
- Minimální tloušťka vrstvy: 0,09mm

Následné zpracování:

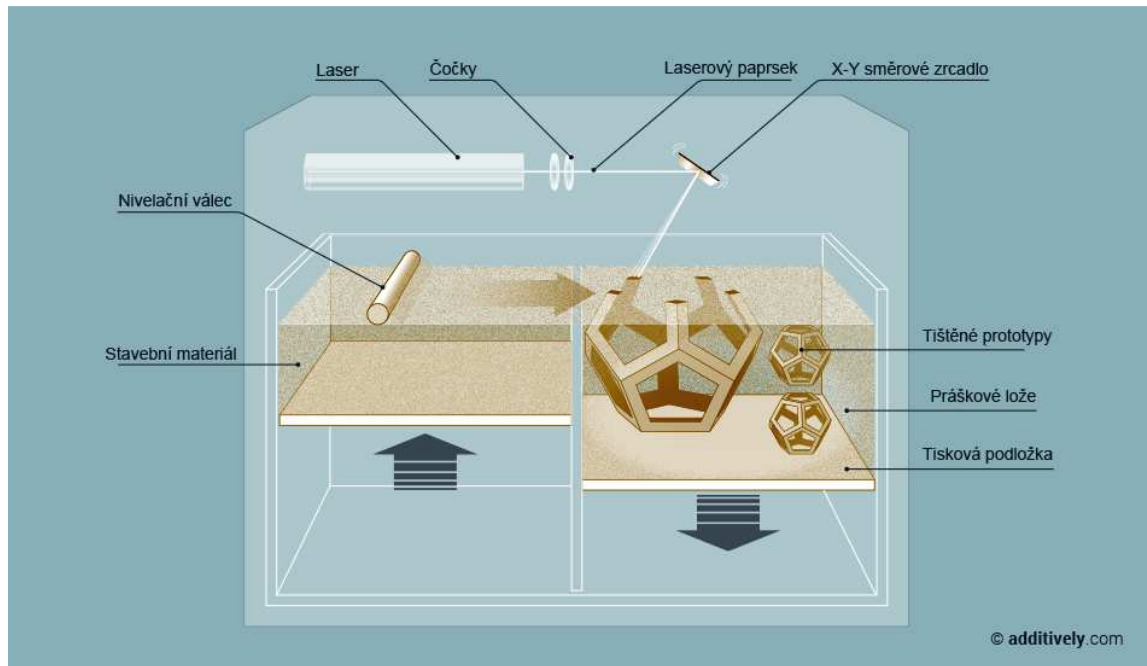
- Prvním krokem bývá odstranění přebytečného prášku, někdy může být spojen s potřebou většího úsilí. Prášek je po přesetí recyklovatelný.
- Pro zvýšení pevnosti, zlepšení povrchových vlastností a trvanlivosti můžou být součásti infiltrovány pryskyřicí.
- Kovové prototypy mohou být spékány procesem slinování.
- Vytištěné komponenty jsou často používány jako modely a jádra při výrobě forem pro odlévání.

Oblasti použití:

- Prototypy jsou vytištěny v plných barvách a mohou sloužit k prezentačním účelům.
- Často bývají základem pro další zpracování například slinováním a infiltrací.
- Jádra a formy pro odlévání mohou být vyrobeny ve speciálním odlévacím písku. (9), (11)

3.2.2. SLS – Selective Laser Sintering

Selektivní laserové spékání je technologie vycházející z výše popsané metody. Nivelačním válečkem se na tiskovou platformu rozmístí tenká vrstvička plastového prášku. Poté je plastový prášek v určených místech spojován slinováním pomocí laserového paprsku. Pracovní komora je předehřívána na teplotu blízkou teplotě tání zpracovávaného plastu a pracuje v ochranné atmosféře inertního plynu, například argonu nebo ve vakuu. V dalším kroku se podložka posune o tloušťku vrstvy směrem dolů a je nanášena nová vrstva plastového prášku. Proces nanášení prášku a spékání se tímto postupem neustále opakuje do vytištění všech naplánovaných součástí v práškovém loži. Celý postup je schématicky zobrazen na *Obr. 2*. Vytištěné díly, stejně jako u předchozí technologie leží v loži nespojeného plastového prášku, a tudíž nepotřebují žádné další tiskové podpory dutých prostorů. Celý tiskový objem může být naplněn více díly a vytištěn společně v jedné tiskové úloze.



Obr. 2 Technologie 3D tisku SLS – Selective Laser Sintering (12)

Výhody a nevýhody:

Touto metodou se dají vyrábět díly s dobrými mechanickými a chemicky odolnými vlastnostmi. Nabídka tiskových materiálů se neustále rozšiřuje, dají se použít kovy, vosky, termoplasty nebo směsi více materiálů například kompozit kovu a plastu. Pro malé funkční díly bývá tato technologie levnější než výroba vstřikováním plastu do forem.

Vytištěné výrobky mívají nižší kvalitu povrchových struktur než výrobky vstřikované a orientace rovin tisku může mít vliv na mechanické vlastnosti. V praxi je potřeba brát zřetel na vliv vnitřního pnutí způsobené chladnutím součástí a na smrštění.

Charakteristika:

- Maximální stavební prostor: 550x550x750mm³
- Minimální velikost součásti: 0,15mm
- Rozměrová tolerance: $\pm 0,25$ mm (může být vylepšena dodatečným zpracováním)
- Minimální tloušťka vrstvy: 0,1mm

Následné zpracování:

- Prvním krokem bývá vylopání komponent z plastového koláče a odstranění přebytečného prášku tryskáním. Prášek je po přesetí recyklovatelný.
- Vytištěné díly lze obrábět pro kalibraci požadovaného povrchu a rozměrů.

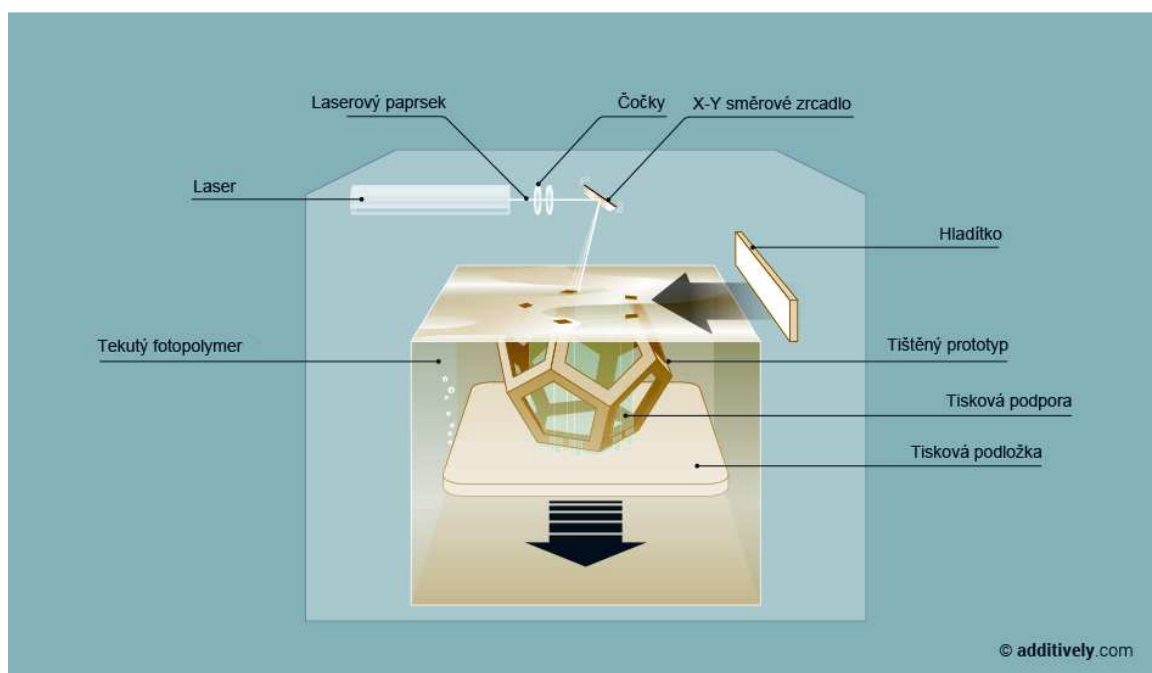
- Povrchové vlastnosti mohou být vylepšeny leštěním, broušením anebo opékáním. Lze je také lakovat anebo povlakovat například antibakteriálními povrchy.

Oblasti použití:

- Výrobky jsou standardně používány pro přípravky, pomůcky a podpůrné díly.
- Na plnohodnotné komponenty s vyššími nároky na pevnost
- Technologie je vhodná pro malosériovou výrobu součástí (10), (12), (13), (14), (15)

3.2.3. SL – Stereolitography (SLA)

Tiskárny pracující se stereolitografickou metodou tisku tvoří prototypy přímo z kapalného fotopolymery, který je aktivován paprsky UV laseru. Tisková platforma je ponořena v přesně dané hloubce kapaliny v nádobě, paprsek laseru zaměřovaný optikou vytvrzuje fotopolymer v definovaných oblastech. V následujícím kroku se platforma ponoří o tloušťku tištěné vrstvy do větší hloubky a celý proces se opakuje do vytištění všech vrstev dané úlohy. Pro visuté části jsou automaticky tvořeny voštinové podpory ze stejného fotopolymery jako je finální výrobek. Postup je schématicky zobrazen na *Obr. 3*.



Obr. 3 Technologie 3D tisku SL – Stereolitography (16)

Výhody a nevýhody:

Výraznou výhodou je možnost tisku rozměrných dílů s dobrou přesností, kvalitním povrchem a velice přesnými detaily. Rozsáhlý sortiment tiskových materiálů umožňuje vyrábět součásti s různými vlastnostmi. Některé materiály vykazují po úplném vytvrzení vysokou pevnost.

Nevýhodou technologie je omezení pouze na kapalné fotopolymery, které nejsou příliš stabilní a časem degradují. Také nemají přesně definovatelné mechanické vlastnosti. Fotopolymery bývají poměrně nákladné a tisk je ve srovnání s popisovanými technologiemi pomalejší.

Charakteristika:

- Maximální stavební prostor: 2100x700x800 mm³
- Minimální velikost prvku: 0,1mm
- Rozměrová tolerance: $\pm 0,15$ mm
- Minimální tloušťka vrstvy: 0,016mm

Následné zpracování:

- Vytištěné prototypy lze dále vytvrzovat v UV peci.
- Podpůrné konstrukce je potřeba mechanickým způsobem odloupat.
- Povrchy součástí je možno brousit, leštit anebo lakovat.

Oblasti použití:

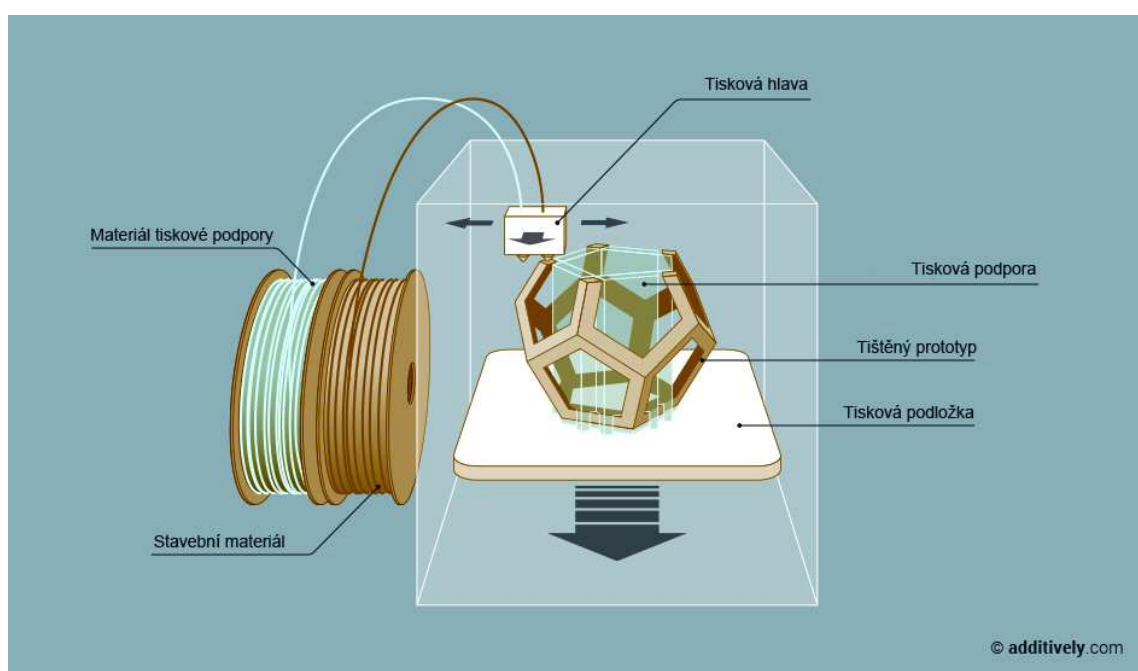
- Vytištěné součásti vykazují velkou přesnost rozměrů a dokonalou věrnost detailů, proto jsou vhodné pro tvarové a funkční testování v sestavách.
- Prototypy se často používají pro prezentační účely
- Materiály fotopolymerů jsou vyvinuty se srovnatelnými mechanickými vlastnostmi s běžně používanými plasty v krátkodobém horizontu testování.
- Hojně se používají na modely pro odlévání
- Na aplikace vyžadující přesné rozměry s minimálním smrštěním, kvalitními detaily a jemnými povrchy. (16)

3.2.4. FDM – Fused Deposition Modeling

Tato technologie byla vyvinuta firmou Stratasys a je nejpoužívanější metodou 3D tisku plastových komponent ve strojírenství. Pro její kladné vlastnosti byla použita k tisku

funkčních prototypů oběžných kol hydraulických strojů. Detailní popis a možnosti použití této technologie jsou uvedeny v praktické části předkládané práce.

FDM tiskárna je vybavena pohyblivou tiskovou hlavou, která pracuje střídavě se dvěma materiály. První z nich je tzv. podpora. Slouží jako upevňovací základna na tiskové podložce a také jako nosná konstrukce pro převislé a duté součásti. Je křehká a dobře rozpustná v louhu pro pozdější snadné odstranění z vytištěných součástí. Druhý materiál slouží pro stavbu samotných prototypů. Nejčastěji se jedná o mechanicky velice odolný ABS plast, jehož popis a ověřování vlastností je uvedeno v kapitolách níže. Oba materiály jsou v tiskové hlavě zahřáty nad teploty tavení. Pohybem hlavy a vytlačováním roztaveného materiálu v přesně definovaných souřadnicích je vytvořena tenká vrstvička, která okamžitě ztuhne. Obvod součásti bývá uzavřen a výplň je různě volitelná, viz dále. V následujícím kroku se trysky tiskové hlavy očistí o kartáček a tisková platforma se posune o tloušťku vrstvy směrem dolů. Proces tisku se tímto způsobem neustále opakuje až do vytištění všech vrstev požadované tiskové úlohy. Celý postup je schématicky zobrazen na *Obr. 4*.



Obr. 4 Technologie 3D tisku FDM – Fused Deposition Modeling (17)

Výhody a nevýhody:

Nejvýraznějšími klady této technologie jsou velká produktivita v malosériové výrobě a tvorba plně funkčních součástí s dlouhou dobou trvanlivosti, přesnými rozměry, precizně zpracovanými detaily a dobrým povrchem. Tiskárna zpracovává standardně používané

materiály jako jsou například ABS. Komponenty mohou být v podstatě libovolně dále zpracovávány jako plastové díly vyráběné konvenčními metodami.

Nevýhodou u funkčních součástí může být určité procento smrštění, kterému lze předcházet a nižší mechanická pevnost součástí ve směru kolmém na tištěné vrstvy oproti vrstvám podélným.

Charakteristika:

- Maximální stavební prostor: 914x610x914 mm³
- Minimální velikost prvku: 0,178mm
- Rozměrová tolerance: $\pm 0,178\text{mm}$ (může být vylepšena dodatečným zpracováním)
- Minimální tloušťka vrstvy: 0,178mm

Následné zpracování:

- Prvním krokem po vytištění bývá odstranění podpůrného materiálu odloupaním anebo rozpuštěním v lázni ohřátého louhu, která je součástí příslušenství tiskárny.
- Výtisky je možné dále obrábět konvenčními metodami jako je soustružení nebo frézování například pro kalibraci rozměrů. Z praktické zkušenosti lze doporučit strojní obrábění a volit ostré nástroje, jemnou třísku a vysoké otáčky. Výsledky jsou pak nadstandardní.
- Pro úpravu povrchu součástí lze použít broušení, leštění anebo lakování. Po nástřiku součásti plnicím tmelem a lakem je ryze originální výrobek perfektní. Jako příklad lze uvést držák navigace pro hárleyáře, kde výrobek musí být plnit vysoké estetické a funkční požadavky.
- Dalšími v praxi hojně používanými způsoby výrazného vylepšení povrchu a jeho drsnosti jsou krátkodobé namáčení anebo vystavení účinkům par acetonu nebo 1, 2 dichlorethanu. Firmy zabývající se průmyslovým tiskem tyto služby nabízejí. (18), (19)

Oblasti použití:

- Metoda je velice vhodná pro tvorbu funkčních prototypů
- Lze realizovat malosériovou výrobu reálných součástí
- Vytištěné součásti vykazují poměrně velkou přesnost rozměrů a věrnost detailů, proto jsou vhodné pro tvarové a funkční testování v sestavách.
- Stavební materiály mají srovnatelné mechanické vlastnosti jako běžně používané plasty i v dlouhodobém horizontu.

- Používají se na modely pro odlévání
- Prototypy se také často používají pro prezentační účely (8), (17), (20)

3.2.5. Přehled technologií 3D tisku

V následující *Tab. 1* je přehledně uvedeno porovnání nejpoužívanějších technologií Rapid Prototypingu ve strojírenství.

Tab. 1 Porovnání technologií Rapid Prototypingu – upraveno autorem (21)

Metoda RP	BJ	SLS	SL	FDM
Tloušťka vrstvy [mm]	0,09	0,1	0,016	0,178
Rozměrová tolerance [mm]	±0,13	±0,25	±0,15	±0,178
Kvalita povrchu	výborná	dobrá	velmi dobrá	méně dobrá
Tiskové materiály	<ul style="list-style-type: none"> • sádra • keramika • ABS, PA, PC 	<ul style="list-style-type: none"> • kovy a jejich slitiny • PA, PE, PS • kompozity 	<ul style="list-style-type: none"> • akrylátové pryskyřice • ABS, PA 	<ul style="list-style-type: none"> • ABS, PC, PLA • kompozity • elastomery
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> • přesnost • výsledná kvalita • nižší nákladnost 	<ul style="list-style-type: none"> • přesnost • široká škála materiálů • mechanické vlastnosti 	<ul style="list-style-type: none"> • velké rozměry • přesnost • kvalitní povrch 	<ul style="list-style-type: none"> • nízká nákladnost • široká škála materiálů • mechanické vlastnosti
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • rychlost • mechanické vlastnosti • smršťivost 	<ul style="list-style-type: none"> • povrch součásti • cena a rozměry tiskárny • pnutí v materiálu 	<ul style="list-style-type: none"> • nutné další zpracování • odpadový materiál • mechanické vlastnosti 	<ul style="list-style-type: none"> • rychlost • povrch dílu • anizotropní mechanické vlastnosti
Použití	<ul style="list-style-type: none"> • formy pro vstřikování, odlévání • velmi detailní součásti 	<ul style="list-style-type: none"> • modely pro výrobu forem • funkční prototypy • formy pro vstřikování 	<ul style="list-style-type: none"> • součásti s drobnými detaily • prezentační modely • modely pro výrobu forem 	<ul style="list-style-type: none"> • funkční modely • speciální nástroje • přímá výroba menších součástí

3.3. Vlastnosti tiskového materiálu

Akrylonitrilbutadienstyren neboli ABS je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer se značně širokým využitím pro jeho univerzální vlastnosti. Je velice dobře odolný proti mechanickému poškození, nárazu a namáhání při nízkých i vysokých teplotách. ABS disponuje značnou houževnatostí a velmi dobrou obrobiteľnosťou. Je dlhodobě stabilní a odolný vůči UV záření. Také je málo nasákový, zdravotně nezávadný a snadno odolává kyselinám, uhlovodíkům, hydroxidům, olejům a tukům. Naopak je velice dobře rozpustný v acetonu nebo v 1, 2 dichlorethanu, této vlastnosti se hojně využívá při zlepšování kvality povrchu anebo k lepení součástí.

V praktické části této práce používaná varianta běžně známá pod obchodním názvem jako ABSplus (ABS-P430 Model) má o 40% vyšší pevnost než standardní ABS. Produktové a bezpečnostní listy tohoto materiálu jsou uvedeny v Příloze I. (22)

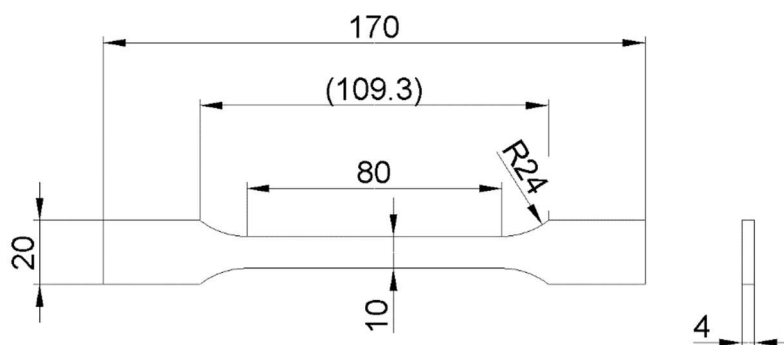
Materiál je velice vhodný pro tisk prototypů, funkčních vzorků a malosériovou výrobu reálných součástí pro běžné použití. Vytisknuté součásti mají poměrně velkou přesnost rozměrů a věrnost detailů. Proto jsou vhodné pro tvarové a funkční testování v sestavách. Dodává se v odstínech slonovině bílé, černé, červené, olivově zelené, nektarinkové, fluorescenční žluté, modré nebo šedé. (18), (19), (22), (23)

3.4. Metodika materiálových zkoušek ABS plastu

Z praxe je známo, že 3D tištěný ABS materiál metodou FDM má rozdílné mechanické vlastnosti při zatížení vzhledem ke směru tištěných vláken, popsáno dále.

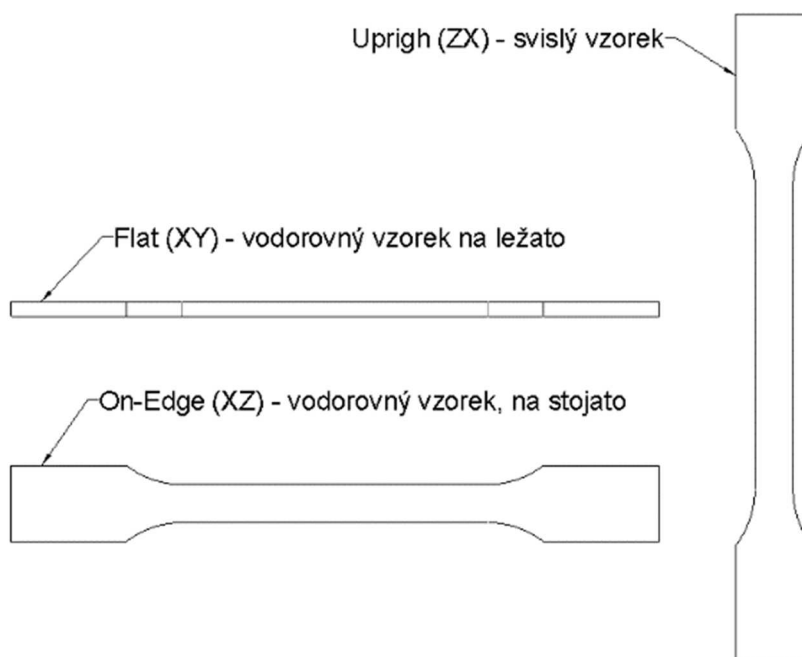
Pro ověření mechanických vlastností tištěného ABS-P430 plastu byly stanoveny tahové zkoušky na statické zatížení dle ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2.

Citovaná norma stanoví tvar a rozměry zkušebních vzorků pro zkoušky tahem, uvedeno na *Obr. 5*.



Obr. 5 Zkušební těleso typu 1A

Zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji Instron 3382 a předmětem testování byly vzorky s rozdílnými směry tištěných vláken. Volba směrů byla zvolena dle zkušební metodiky uváděné výrobcem v produktovém listě tohoto materiálu viz *Obr. 6* a Příloha I.



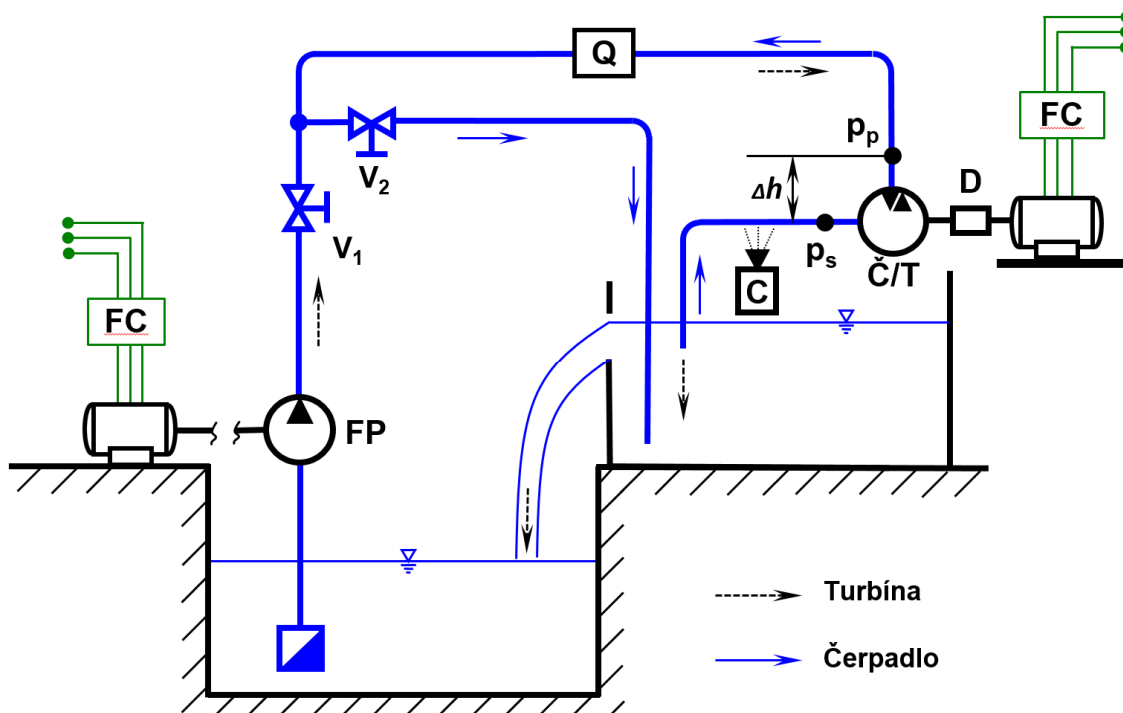
Obr. 6 Zkušební vzorky A1 – směry tištěných vláken

Zkušební vzorky ve všech třech variantách byly tištěny při důsledném dodržení shodnosti všech vstupních parametrů nastavení jako byly tištěny dále popisovaná oběžná kola hydraulických strojů.

Test byl řízen posuvem rychlostí 1 mm/min. Zkouška byla ukončena v momentě porušení vzorku. (22), (24), (25)

3.5. Hydraulický zkušební okruh

Pro testování funkčních parametrů radiálních jednostupňových odstředivých oběžných kol v čerpadlovém a v turbínovém režimu byl k dispozici hydraulický zkušební okruh v laboratoři mechaniky tekutin TF ČZU v Praze. Schéma okruhu pro testování čerpadel a turbín je uvedeno na Obr. 7.



Obr. 7 Schéma hydraulického okruhu (26)

Q – průtokoměr, FP - napájecí čerpadlo, PAT - testované čerpadlo, resp. čerpadlo v turbínovém režimu, V_1 , V_2 - regulační ventily, P_p , P_s – tlakové snímače, D - dynamometr, FC - frekvenční měnič, C – videokamera.

Hydraulický zkušební okruh se skládal ze dvou nádrží, propojovacích potrubí, řídicích a měřicích prvků a zkoušeného čerpadla (Č/T). Uzavřením ventilu V_1 a regulací ventilu V_2 proudí voda ve směru plných šipek a tvoří uzavřený okruh pro testované čerpadlo. Čerpadlo bylo poháněno třífázovým asynchronním elektromotorem s plynulou regulací otáček hřídele pomocí frekvenčního měniče LSLV0055s100-4EOFNS. Točivý moment na hřídeli čerpadla měřil snímač točivého momentu (D) Magtrol TMB 307/41 (přesnost 0,1%). Průtok vody byl měřen pomocí elektromagnetického průtokoměru (Q) SITRANS F M MAG 5100 W (přesnost 0,5%). Tlaky ve výtlačném (p_p) a sacím potrubí (p_s) byly měřeny tlakovými snímači HEIM 3340 (přesnost 0,5%) instalovanými dle požadavku pro měření 1. třídy přesnosti (ČSN EN ISO 9906).

Měření probíhalo při konstantních otáčkách (1450 nebo 2950 ot/min.) nastavených frekvenčním měničem. Postupným uzavíráním ventilu V_2 byl zvyšován odpor výtlačného potrubí. Při měření byly zaznamenávány hodnoty průtoku, otáček motoru, točivého momentu na hřídeli motoru, tlaky kapaliny na vstupu a výstupu čerpadla. (26), (27)

Turbínový provoz čerpadla probíhal na stejné zkušební trati následujícím způsobem: uzavřením ventilu V_2 při otevřeném ventilu V_1 proudila voda ve směru přerušovaných šipek a napájecí čerpadlo (FP) vytvářelo hydrotechnický potenciál pro turbínu.

Měření probíhalo při nastavení napájecího čerpadla (FP) frekvenčním měničem na požadovaný hydrotechnický potenciál. Při tomto nastavení byla turbína postupně brzděna pomocí třífázového elektromotoru s frekvenčním měničem a brzdnými odpory. Měřeny a zaznamenávány byly hodnoty průtoku, otáček motoru, točivého momentu na hřídeli motoru, tlaky kapaliny na vstupu a výstupu čerpadla. Klesající hydrotechnický spád s rostoucími otáčkami turbíny byl dán konstantními otáčkami napájecího čerpadla. Pro dodržení konstantního spádu by bylo potřeba otáčky napájecího čerpadla řídit například frekvenčním měničem. Klesající spád byl pro všechny varianty turbín shodný a neovlivňoval výsledky měření. Pro měření byly použity stejné přístroje jako při čerpadlovém provozu. (26), (27)

3.6. Hydraulické zkoušky turbín a čerpadel

Testována byla oběžná kola radiálního jednostupňového odstředivého čerpadla vyrobená konvenčními metodami odléváním (litina, korozivzdorná ocel) a pomocí 3D tisku (technologie FDM). Tato kola byla zkoušena v čerpadlovém a také v turbínovém režimu.

Výkonové parametry čerpadlového i turbínového provozu všech zkoušených variant oběžných kol byly z naměřených hodnoty vypočteny pomocí Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity.

Čerpadlový režim:

- Bernoulliho rovnice mezi sáním (p_s) a výtlačkem (p_p) čerpadla:

$$0 + \frac{p_s}{\rho} + \frac{v_s^2}{2} + Y_{\zeta} = g \cdot h + \frac{p_p}{\rho} + \frac{v_p^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (1)$$

- Rychlost kapaliny v sacím potrubí z rovnice kontinuity:

$$Q = v_s \cdot S_s \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

Průřez sacího potrubí:

$$S_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \quad [m^2] \quad (3)$$

$$\text{Rychlost kapaliny v sacím potrubí: } v_s = Q \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_s^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

○ Rychlost kapaliny ve výtlačném potrubí:

$$Q = v_p \cdot S_p \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

Průřez výtlačného potrubí:

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad [m^2] \quad (6)$$

$$\text{Rychlost kapaliny ve výtlačném potrubí: } v_p = Q \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_p^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (7)$$

○ Měrná energie čerpadla:

$$Y_{\check{c}} = \frac{p_p - p_s}{\rho} + \frac{v_p^2 - v_s^2}{2} + g \cdot h \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (8)$$

○ Dopravní výška čerpadla:

$$H_{\check{c}} = \frac{Y_{\check{c}}}{g} \quad [m] \quad (9)$$

○ Příkon čerpadla:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad [W] \quad (10)$$

○ Hydraulický výkon čerpadla:

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot Y_{\check{c}} \quad [W] \quad (11)$$

- Celková účinnost čerpadla:

$$\eta_{\zeta} = \frac{P_h}{P} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

Turbínový režim:

- Bernoulliho rovnice mezi sáním a výtlakem turbíny:

$$0 + \frac{p_{st}}{\rho} + \frac{v_{st}^2}{2} + Y_t = g \cdot h + \frac{p_{pt}}{\rho} + \frac{v_{pt}^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (13)$$

- Rychlost kapaliny v sacím potrubí:

$$Q_t = v_{st} \cdot S_s \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (14)$$

Průřez sacího potrubí:

$$S_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \quad [m^2] \quad (15)$$

$$\text{Rychlost kapaliny v sacím potrubí: } v_{st} = Q_t \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_s^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (16)$$

- Rychlost kapaliny ve výtlačném potrubí:

$$Q_t = v_{pt} \cdot S_p \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (17)$$

Průřez výtlačného potrubí:

$$S_p = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad [m^2] \quad (18)$$

$$\text{Rychlost kapaliny ve výtlačném potrubí: } v_{pt} = Q_t \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_p^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (19)$$

- Měrná energie turbíny:

$$Y_t = \frac{p_{pt} - p_{st}}{\rho} + \frac{v_{pt}^2 - v_{st}^2}{2} + g \cdot h \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (20)$$

- Spád turbíny:

$$H_t = \frac{Y_t}{g} \quad [m] \quad (21)$$

- Mechanický výkon turbíny:

$$P_t = 2 \cdot \pi \cdot n_t \cdot M_t \quad [W] \quad (22)$$

- Hydraulický příkon turbíny:

$$P_{ht} = \rho \cdot Q_t \cdot Y_t \quad [W] \quad (23)$$

- Celková účinnost turbíny:

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_{ht}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (24)$$

kde:

p – tlak kapaliny v daném místě	$[Pa]$
ρ – měrná hmotnost kapaliny	$[kg \cdot m^{-3}]$
v – střední rychlost kapaliny v daném místě	$[m \cdot s^{-1}]$
Y_{ζ} – měrná energie čerpadla	$[J \cdot kg^{-1}]$
Y_t – měrná energie turbíny	$[J \cdot kg^{-1}]$
g – tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h – svislá odlehlost odběru tlaků	$[m]$
Q – objemový průtok	$[l \cdot s^{-1}]$
S – průtočný průřez v daném místě	$[m^2]$
d – světlost potrubí v daném místě	$[m]$
n – otáčky hřídele	$[s^{-1}]$
M – krouticí moment na hřídeli	$[N \cdot m]$

Oběžné kolo ve spirálové skříní spolu s parametry čerpadla udávané výrobcem jsou na Obr. 8. (28), (29)

Guaranteed

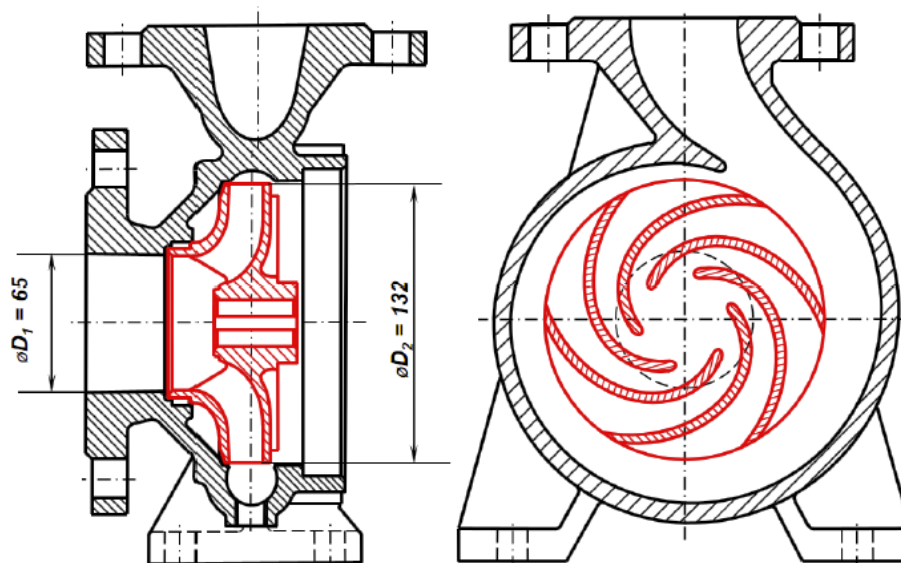
Shaft speed:
 $n_p = 1,450 \text{ min}^{-1}$

Flowrate:
 $Q_p = 3.54 \text{ l/s}$

Total head:
 $H_p = 5.85 \text{ m}$

Power input:
 $P_p = 0.33 \text{ kW}$

Efficiency:
 $\eta_e = 62.5 \%$



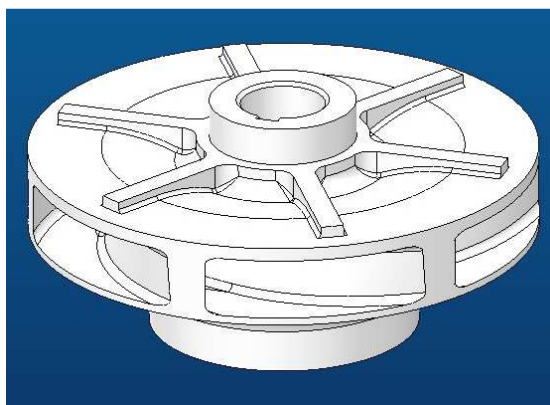
Obr. 8 Kovové oběžné kolo ve spirální skříní a parametry čerpadla (30)

3.7. Rapid Prototyping oběžných kol hydraulických strojů

3.7.1. Příprava 3D modelu

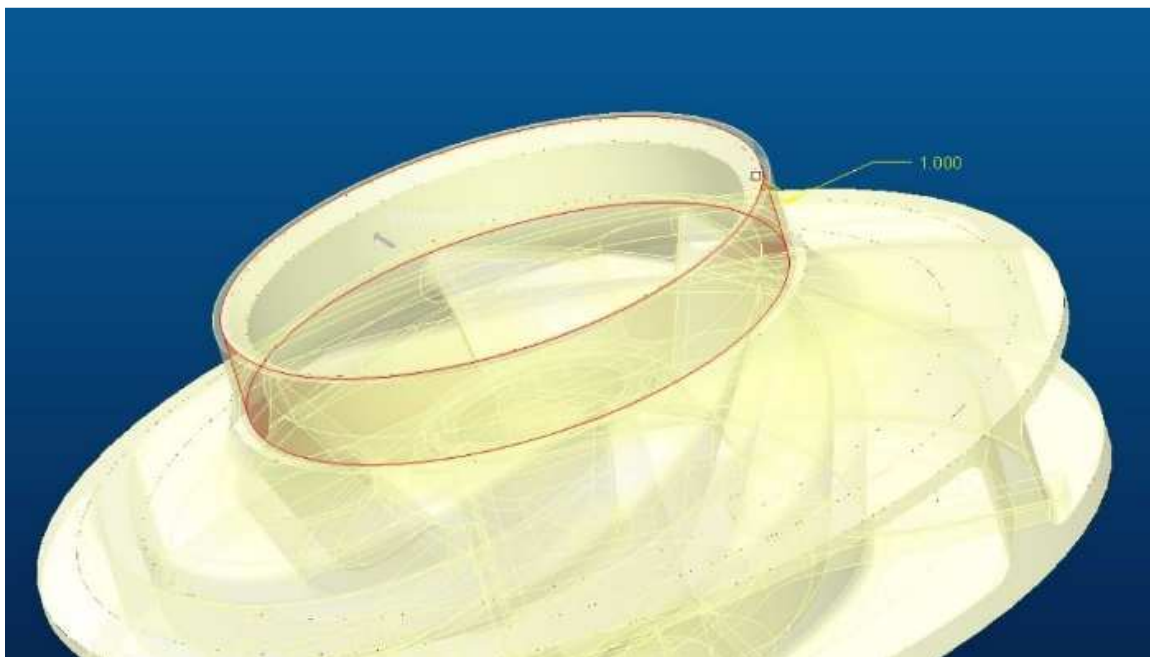
Proces rychlé výroby prototypů neboli Rapid Prototyping začíná tvorbou 3D digitálního modelu. Postupy a možnosti modelování byly podrobně popsány v teoretické části této práce.

Ideu, kterou pomocí CAD modelovacích programů, jako jsou Catia, Creo, Inventor anebo Solidworks, přetvoříme v 3D digitální model. Model může být tvořen soustavou pokročilých geometrických ploch, ale ve finále musí být všechny plochy pro 3D tisk spojeny v jednodité těleso neboli v SOLID. V případě této diplomové práce se jedná o oběžné kolo odstředivého čerpadla, viz Obr. 9.



Obr. 9 Oběžné kolo – 3D CAD virtuální model

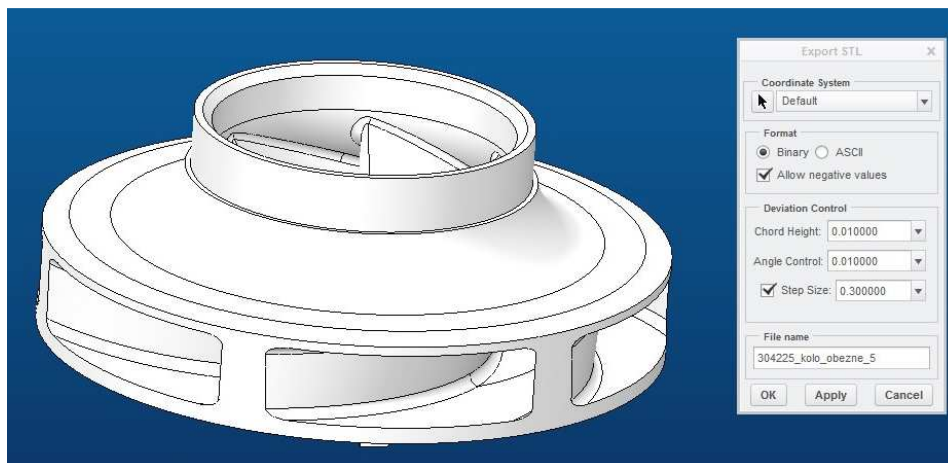
Příprava 3D modelu pro tisk začíná kontrolou a úpravou geometrie na základě zkušeností s určitým procentem smrštění požadovaných rozměrů výtisku. To může být dáno velikostí a složitostí součásti nebo poměrem tloušťek stěn součásti. Dále volbou správných vůlí pro potřeby sestavení více vytištěných součástí dohromady anebo montáže prototypu do sestavy netištěných komponent. Rovněž je potřeba počítat s namodelováním potřebných technologických přídaveků na upnutí a obrábění viz *Obr. 10*.



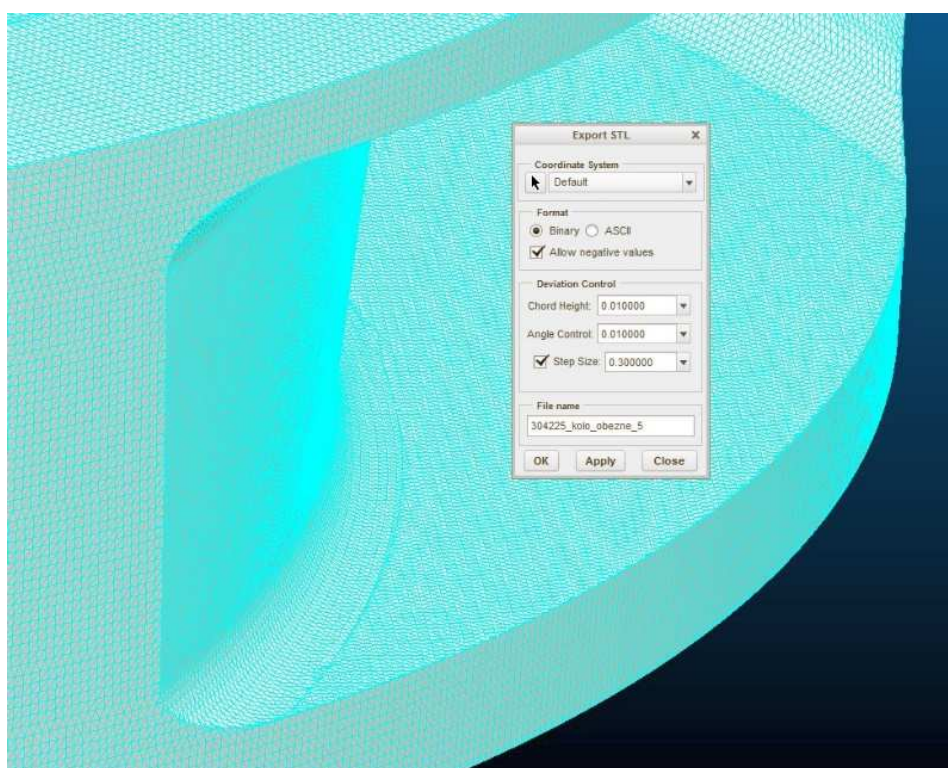
Obr. 10 Oběžné kolo – offset ploch

3.7.2. Tvorba STL

STL (Standard Tessellation Language) - jedná se o univerzální formát potřebný pro vytvoření segmentace celého povrchu prototypu. Většinou postačuje zadat požadované parametry, ale v některých případech se požadovaná síť nevytvoří a je potřeba optimalizovat zadávané hodnoty nebo určitý model. Různé velikosti a složitosti modelů mají rozdílné nároky na nastavované parametry a záleží především na zkušenostech projektanta. Účelem tohoto kroku je vytvořit dostatečně jemnou triangulační síť, která určuje výslednou jakost tištěného prototypu. Ovlivňovány jsou především mechanické vlastnosti, jakost povrchu a přesnost rozměrů. Parametry nastavení tisku oběžného kola je možno vidět na *Obr. 11* a *Obr. 12*.



Obr. 11 Nastavení parametrů STL exportu



Obr. 12 Tvorba STL sítě

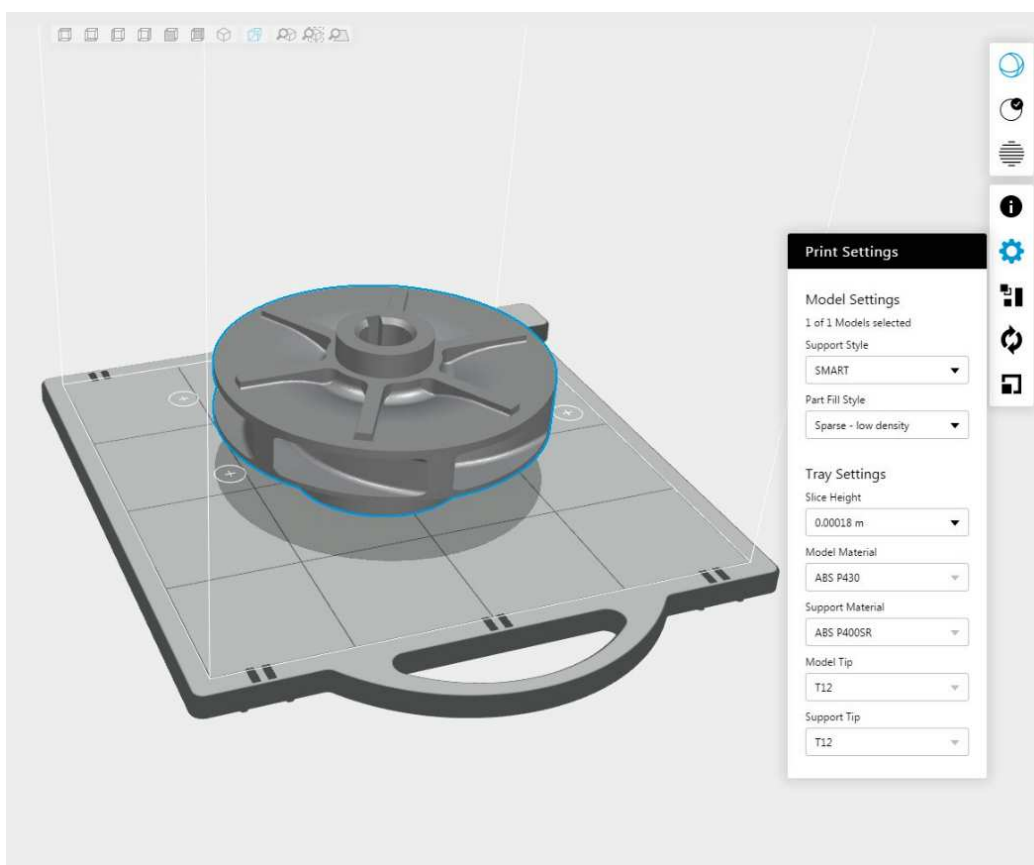
3.7.3. Nastavení tiskového projektu PRINT

3D model ve formátu STL se načte do programu GrabCad Print. V této aplikaci se nastavují veškeré parametry tisku a celý projekt se posílá síťovým rozhraním do tiskárny, která zadanou úlohu vytiskne.

První a zcela zásadní nastavení tiskové úlohy je volba orientace součástí na podložce. Použitá technologie FDM je založena na tisku od spodní vrstvy nahoru. Z čehož vyplývá, že

např. podlouhlé součásti je mnohdy vhodné tisknout ve vodorovné poloze. Důvodem je, že pevnost kolmá ke směru vrstev bývá nižší oproti pevnosti ve směru vrstev. Vždy je také vhodné zohlednit polohu vzhledem ke složitosti výstavby materiálu podpory, s ohledem na orientaci dutin a otvorů součástí a také s ohledem na následné odstraňování nutných tiskových podpor. Je výhodné prototyp umisťovat tak aby podpora byla na nepohledových stranách součástí, zatímco pohledové strany zůstávají čisté, bez potřeby dalšího opracování.

Další volbou ovládacího SW je poloha součástí na podložce. Zde hraje důležitou roli teplota tisku, protože vnější strany součástí jsou tisknuty za jiných teplot oproti vnitřním stranám, nebo součástem v zákrytu. To může způsobit rozdílné mechanické vlastnosti, například u zkušebních vzorků. Pokud jsou součásti optimálně rozmístěny na podložce, lze tímto způsobem i zkrátit potřebný čas tisku. Aplikace je vybavena automatickým uspořádáním součástí na podložce při zachování zvolené orientace viz *Obr. 13*. Tato volba je velice užitečná pro větší množství součástí. Dá se tak efektivně tisknout maximální množství součástí na jedné podložce.



Obr. 13 Orientace dílu na podložce a volba tiskových parametrů

Následuje volba parametrů tisku na *Obr. 13*. První volba určuje vlastnosti výstavby podpůrného materiálu. Volí se mezi podporou, která je pouze na spodní straně prototypu

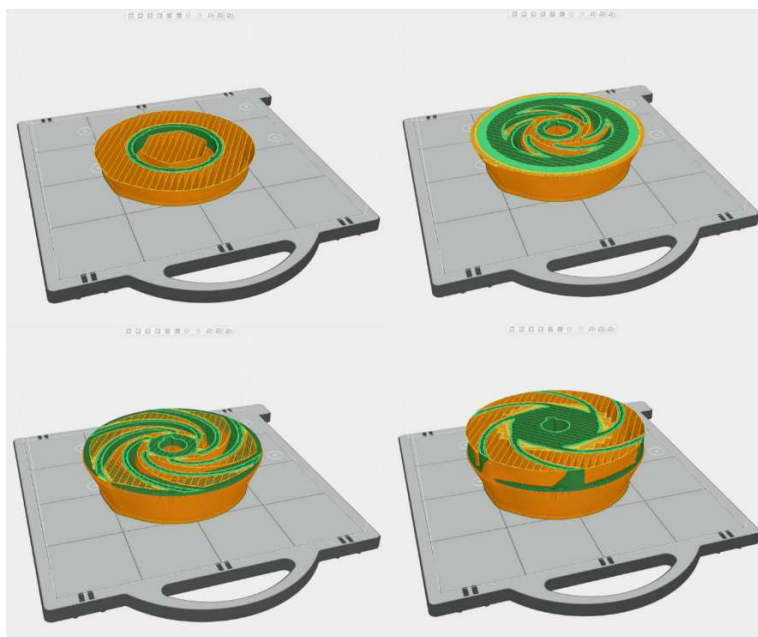
nebo volbou SMART, která vytvoří podporu na spodní straně a v místech kde je potřeba. Podpora je vždy tištěna jako konstrukce v podobě voštiny pro snadné čištění a nízkou spotřebu materiálu.

Druhá volba určuje, zda prototyp bude z plného materiálu (SOLID) nebo skořepinová konstrukce s hrubou nebo jemnou voštinovou výplní uvnitř. Tato volba má zásadní vliv především na dobu tisku, pevnost a spotřebu tiskového materiálu. Pro dále obráběné součásti je vhodné volit variantu SOLID.

Třetí volba je vyhrazena pro určení tloušťky tištěných vrstev. Hrubší tisk 254 mikrometrů a jemnější, preciznější tisk 178 mikrometrů. Jemnější tisk sice podstatně déle trvá, ale zato vykazuje podstatně vyšší pevnost a povrch je výrazně kvalitnější. Pro potřeby této práce byla vždy použita volba jemnějších tlouštěk tiskových vrstev.

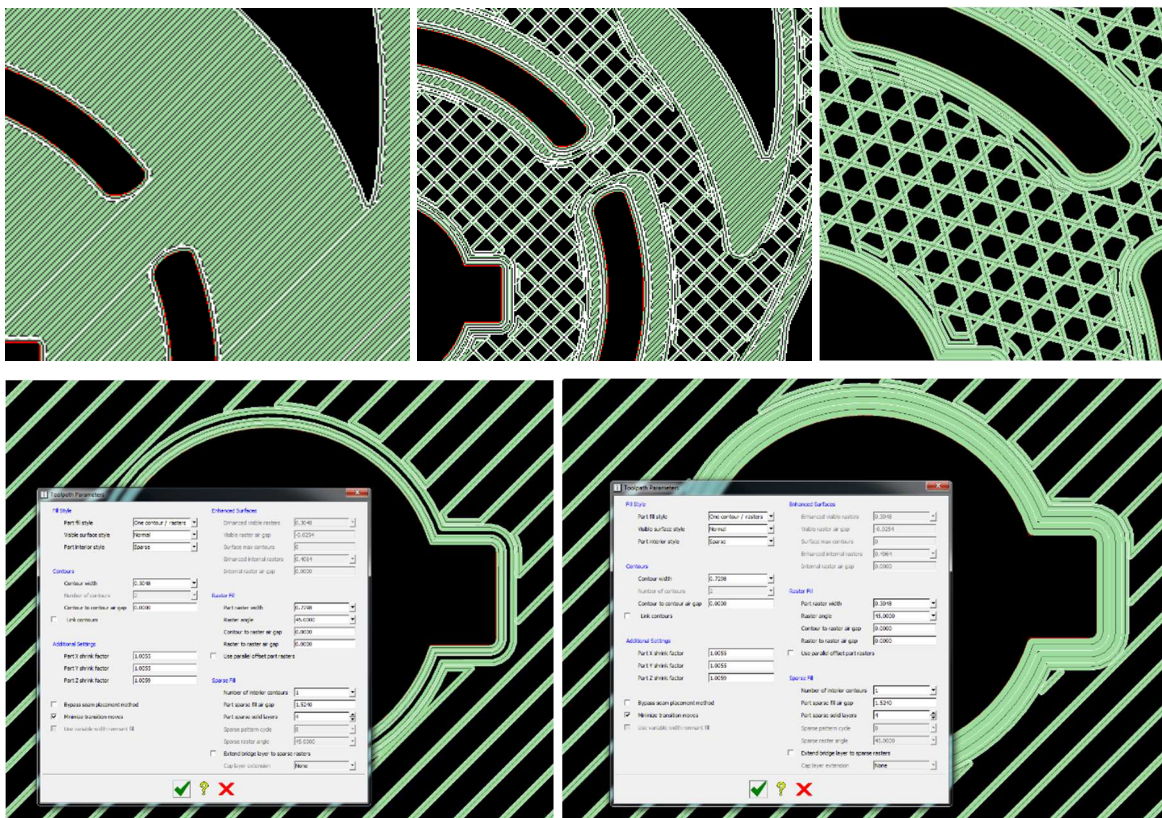
Pro zdárný tisk je doporučováno zadání stejné úrovně tloušťky tištěných vrstev pro všechny součásti na podložce.

Následuje pokyn pro automatickou tvorbu trasování 3D modelu a výstavbu podpůrného materiálu. Program zcela samostatně vytvoří veškeré potřebné konstrukce pro všechny tištěné vrstvy. Na *Obr. 14* je znázorněna konečná podoba 3D modelu oběžného kola (zeleně), včetně navržených tiskových podpor (oranžově). Tyto náhledy slouží pro vizuální kontrolu postupu po jednotlivých vrstvách. Jestliže náhled splňuje očekávání, lze úlohu poslat na tiskárnu.



Obr. 14 Tvorba automatického trasování tiskové úlohy

V případě optimalizace lze snadno upravit výše popsané parametry a nechat vytvořit vyhovující trasování. Pokud je potřeba specifických předvoleb tisku, pak je k dispozici Insight, obslužná aplikace tiskáren Stratasys, která byla použita pro tisk oběžných kol. Zde se řeší pokročilá nastavení rozstupů tras, počtu obrysových tras, charakteristiky a vzory textur výplní. Na *Obr. 15* jsou uvedeny ukázky z celé řady možných kombinací předvoleb pro tvorbu vnitřní struktury součástí.



Obr. 15 Možnosti pokročilých nastavení vnitřní struktury součástí

4. Praktická část

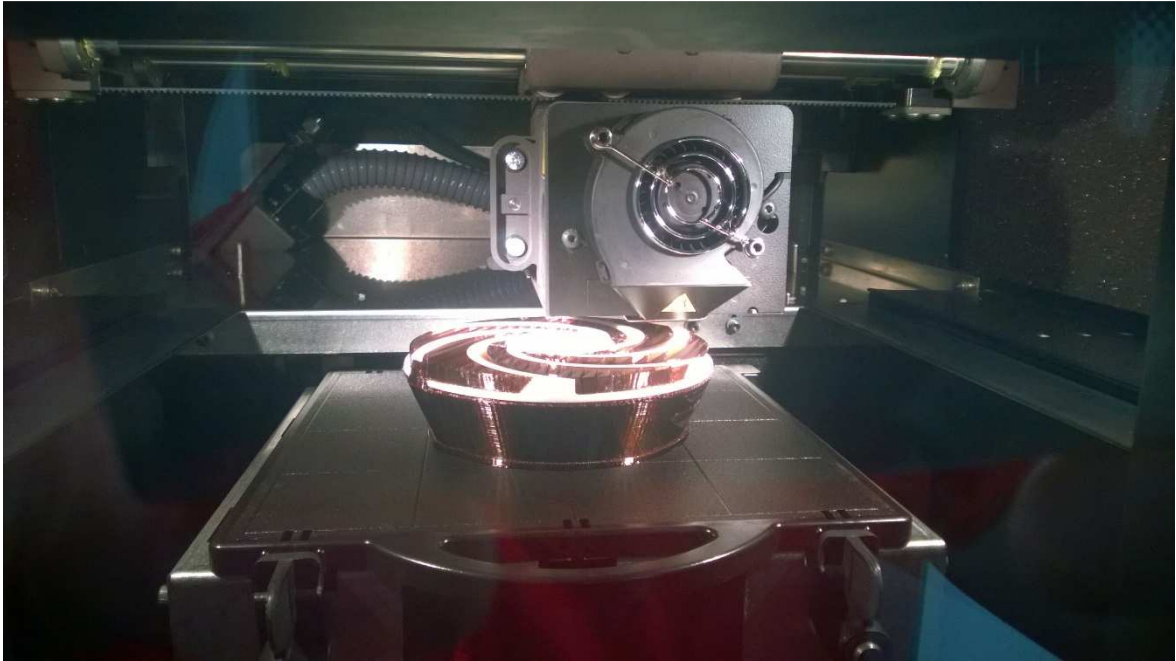
4.1.1. 3D Tisk prototypů oběžných kol

Tisk prototypů oběžných kol byl proveden na tiskárně Dimension Elite 3D Printer 180-00105 od firmy Stratasys. Jedná se o profesionální průmyslovou 3D tiskárnu. Tato tiskárna umí tisknout metodou FDM složité a plně funkční součásti namodelované v CAD grafických programech. Komponenty se také vyznačují velice dobrou rozměrovou stálostí. Tisková hlava tiskne střídavě ze dvou základních materiálů. Vyráběný objekt je z termoplastu ABS-P430 Model (ABSplus), produktové a bezpečnostní listy jsou uvedeny v Příloze I (22) a druhým materiálem je rozpustná podpora P400 SR bezpečnostní listy jsou uvedeny v Příloze II (31). Šarže použitých materiálů jsou uvedeny v *Tab. 2*. A detailní specifikace tiskárny je v Příloze III (32).

Tab. 2 Šarže tiskového materiálu

Materiál	Výrobce	Vyrobena dne	Lot
ABS-P430 Model (Ivory)	Stratasys	21. 3. 2018	104830
P400SR Soluble Support	Stratasys	7. 3. 2018	104761

Tisk takto rozměrné součásti s nejjemnějším nastavením je v řádu desítek hodin. A tiskárna pracuje zcela samostatně bez obsluhy. *Obr. 16* znázorňuje pohled do tiskárny v průběhu tisku oběžného kola. Stav tiskové úlohy lze sledovat a spravovat online prostřednictvím aplikace GrabCad Print na internetu. Spotřeby materiálů a časů tisku pro různé varianty později zkoušených oběžných kol jsou uvedeny v *Tab. 3*. Na první pohled je zřejmé, že tisk skořepinové varianty s voštinovou výplní je podstatně rychlejší oproti tisku ve variantě solidu a také spotřeba tiskového materiálu je téměř poloviční. Kompozitové oběžné kolo bylo tištěno bez zadního krycího disku, který byl vyroben z kovu a na kolo přilepen, podrobný popis dále v kapitole hydraulického zkušebnictví. (33)



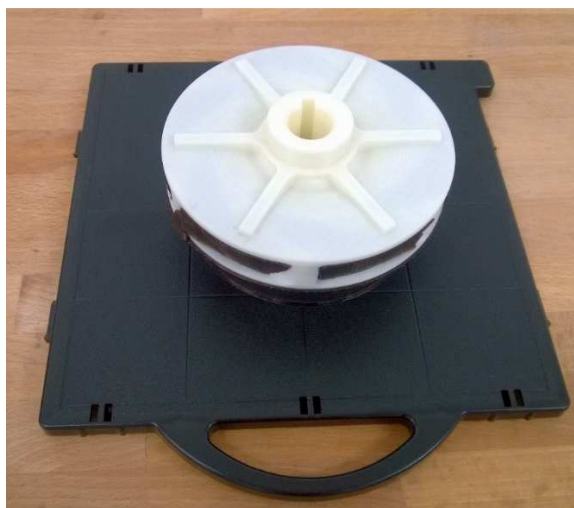
Obr. 16 3D tisk oběžného kola

Tab. 3 Tiskové úlohy a spotřeby materiálů (33)

Tisková úloha	Doba tisku (h:min:s)	Jednotky	Název materiálu modelu	Spotřeba mat. modelu	Název materiálu podpory	Spotřeba mat. podpory
Oběžné_kolo_solid_1	32:29:00	cm ³	P430_NAT	187,5	P400SR	69,9
Oběžné_kolo_solid_2	32:29:11	cm ³	P430_NAT	187,5	P400SR	69,9
Oběžné_kolo_kompozit	30:57:01	cm ³	P430_NAT	159,4	P400SR	72,7
Oběžné_kolo_skořepina	23:21:52	cm ³	P430_NAT	87,9	P400SR	69,9

4.1.1. Finální dokončení prototypu

Vytištěná součást se po vyjmutí z tiskárny nechá vychladnout ze 75°C na pokojovou teplotu, viz *Obr. 17*. Pak následuje první stupeň čištění podpurného materiálu, který se nechá snadno odlamovat nebo odloupat dlátky.



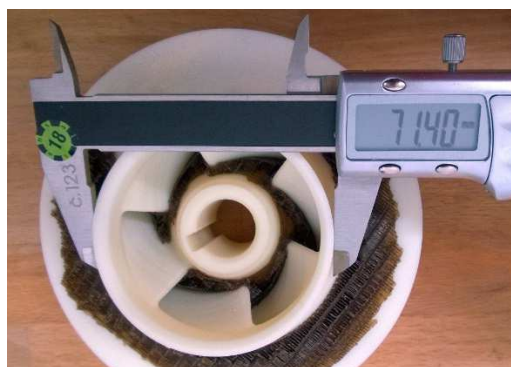
Obr. 17 Vytištěné oběžné kolo

Vyplatí se postupovat obezřetně, aby nedošlo k porušení povrchu nebo rozlomení součásti. Podporu, kterou se nedaří odstranit mechanickým způsobem je lepší ponechat, viz *Obr. 18*.



Obr. 18 První krok čištění materiálu podpory

Dalším krokem je vizuální a rozměrová kontrola měřidly, zda nedošlo ke smrštění některých rozměrů. Tomu se dá předcházet volbou přísadků na obrábění, viz *Obr. 19*.



Obr. 19 Vytištěné oběžné kolo – kontrola rozměrů

Jestliže se nepodaří podpůrný materiál zcela odstranit, pak lze využít příslušenství tiskárny SCA-1200 viz *Obr. 20*. To pracuje na principu řízeného propírání zahřátým louhem, který dokonale rozpouští podpůrný materiál. Vyprané prototypy je třeba osprchovat teplou vodou, popřípadě umýt v ultrazvukové lázni. Poté je třeba nechat je vyschnout. Sušení by mělo být přirozené a nedoporučuje se sušení urychlovat anebo zanedbat, jestliže záleží na dodržení tvarové a rozměrové přesnosti.



Obr. 20 Zařízení na rozpouštění materiálu podpory

Nyní máme prototyp, co se týče tisku zcela hotový a můžeme přistoupit k obrábění přídavek. Cílem je obrobit povrchy na požadované povrchové, tvarové a rozměrové hodnoty. Obráběním lze zkalibrovat sousostí, obvodové házení a rovnoběžnosti povrchů viz *Obr. 21*.



Obr. 21 Oběžné kolo – obrábění přídavek

Po obrobení je součást finálně hotová a zbývá ověřit požadované rozměry a vzhled viz *Obr. 22*. Nyní můžeme začít s funkčním testováním v reálném provozu zkušebního hydraulického okruhu.



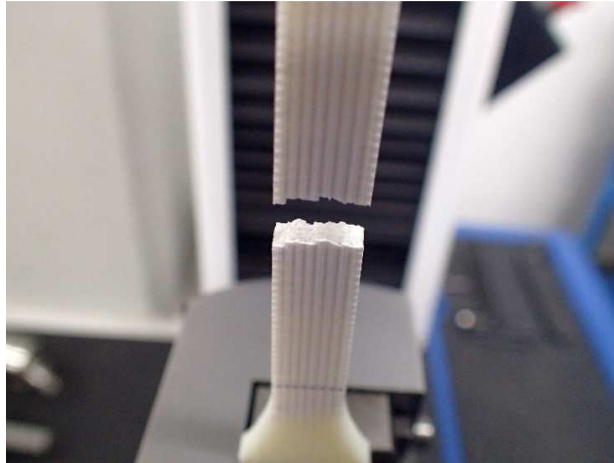
Obr. 22 Oběžné kolo – finální rozměrová kontrola

4.2. Mechanické zkoušky ABS-P430 plastu

Součástí praktické části této práce bylo také ověření materiálových vlastností ABS-P430 plastu vytištěného na 3D tiskárně Dimension Elite. Statickým zatížením v tahu byly zkoušeny vzorky vytištěné s různými směry vláken (tiskových vrstev) na stroji Instron 3382, který je na *Obr. 23*. Dle normy ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2. Zkušební protokoly včetně vyfiltrovaných souborů dat naměřených hodnot a grafů závislosti zatížení a poměrného prodloužení jsou uvedeny v Příloha IV. Na *Obr. 24* je zachycen zkušební vzorek v detailu při porušení. (24), (25)



Obr. 23 Instron 3382



Obr. 24 Zkušební vzorek – detail

4.3. Hydraulické zkušebnictví

Hlavním záměrem této práce je ověření funkčních parametrů a užitných vlastností konkrétní geometrie 3D tisku prototypů plastových oběžných kol hydraulických strojů v porovnání s parametry kovových oběžných kol vyrobených konvenčními technologiemi, jako je například odlévání do forem. V čerpadlovém a také turbínovém režimu při dynamickém zatěžování v hydraulickém okruhu.

4.3.1. Varianty oběžných kol

První zkoušenou variantou bylo ocelové oběžné kolo, *Obr. 25*.



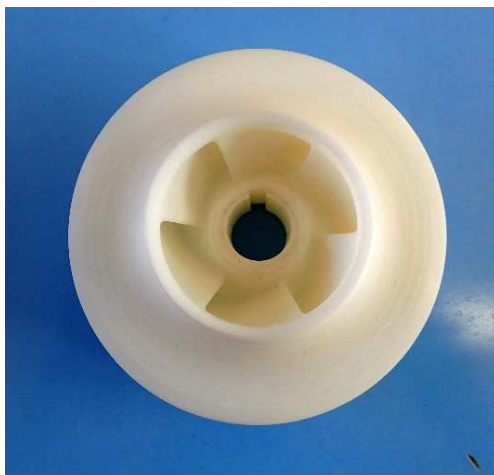
Obr. 25 Ocelové oběžné kolo

Druhou zkoušenou variantou bylo litinové oběžné kolo, *Obr. 26*.



Obr. 26 Litinové oběžné kolo

Třetí zkoušenou variantou bylo ABS plné oběžné kolo, *Obr. 27*.



Obr. 27 ABS plné oběžné kolo

Čtvrtou zkoušenou variantou bylo ABS skořepinové oběžné kolo, *Obr. 28*



Obr. 28 ABS skořepinové oběžné kolo

Pátou zkoušenou variantou bylo kompozitové oběžné kolo, *Obr. 29*.



Obr. 29 Kompozitové oběžné kolo

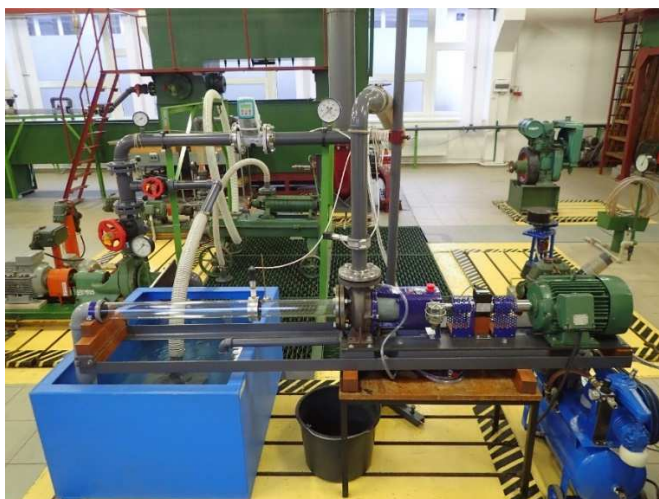
4.3.2. Testování oběžných kol

Oběžná kola vyrobená technologií Rapid Prototyping byla tištěna ve třech variantách tisku při důsledném zachování shodnosti všech vstupních parametrů tvorby STL, orientace, umístění, tloušťky vrstev a tvorby podpory... Varianta ABS plné je z plného materiálu (solid). Varianta ABS skořepina je tištěna s pevným povrchem a porézním (voštinovým) vnitřkem. A poslední zkoušená varianta byla kompozit, která je typem solid v kombinaci s nalepeným zadním krycím kovovým diskem.

Fotografie hydraulického zkušební okruhu laboratoře mechaniky tekutin TF ČZU v Praze jsou na *Obr. 30* a *Obr. 31*.



Obr. 30 Hydraulický zkušební okruh



Obr. 31 Hydraulický okruh – detail

Prvním krokem při testování byla montáž oběžného kola na hřídel a do spirální skříně, *Obr. 32*. Následovalo sestavení hydraulického okruhu. Přestavení ventilů a napuštění okruhu vodou z nádrží, odvzdušnění okruhu. V následném kroku byly zapojeny měřicí snímače a přestaveny ventily pro daný typ provozu. Dalším krokem bylo nastavení požadovaného testu na počítači a ovládání motorů. Nyní bylo zahájeno testování dle výše popsané metodiky. Měřené hodnoty byly sledovány na monitoru počítače a po ustálení nastaveného stavu zaznamenány vždy tři body pro každou veličinu. Po ukončení všech testů zkoušené varianty oběžného kola byl okruh vypuštěn a obdobným způsobem pokračováno v dalších testech.



Obr. 32 Montáž kompozitového oběžného kola

Záznamy sledovaných parametrů včetně vypočtených hodnot z níže uvedených vstupních parametrů jsou v Příloze V.

Vstupní parametry hydraulického zkušebního pro čerpadlový režim:

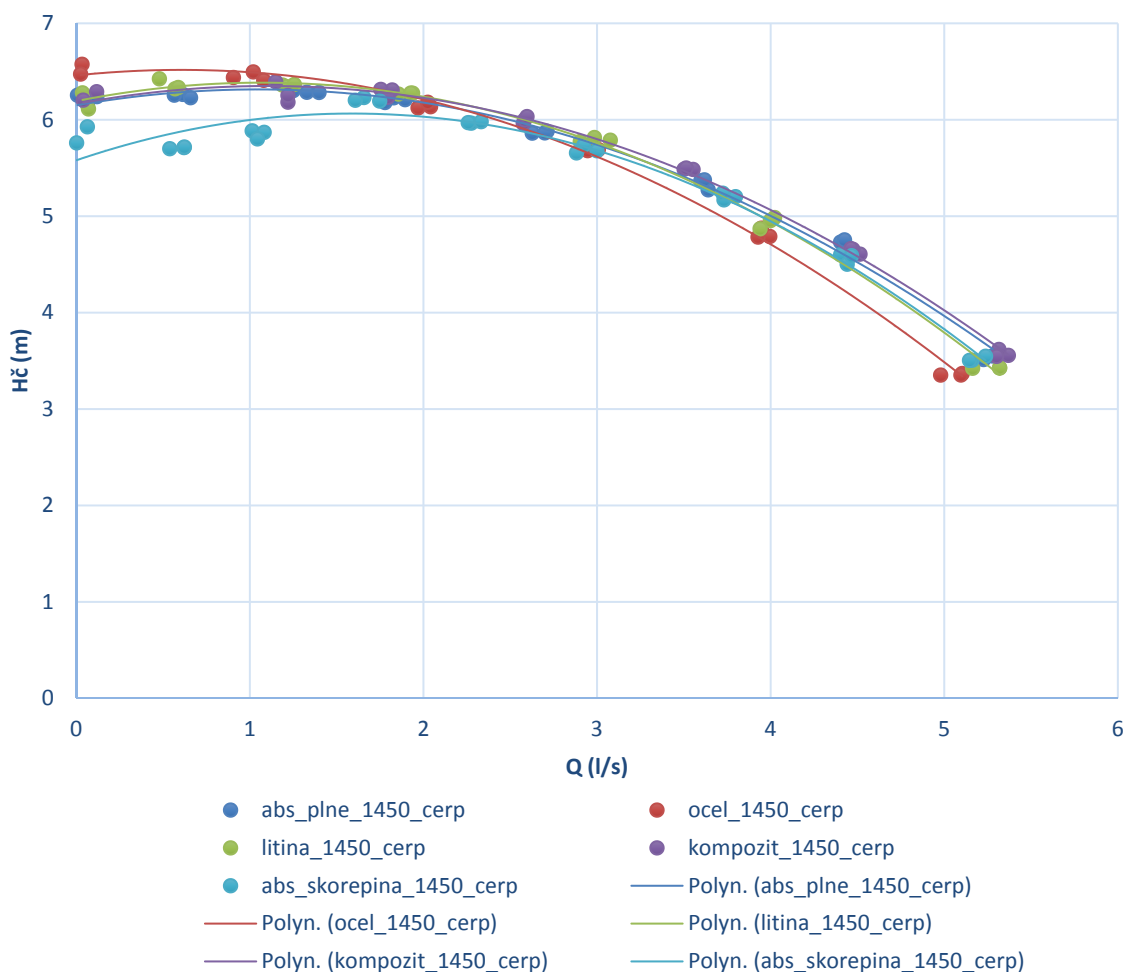
- Světlost sacího potrubí: $d_s = 65\text{mm}$
- Světlost výtlačného potrubí: $d_p = 50\text{mm}$
- Svislá odlehlost odběru tlaků: $h = 290\text{mm}$

Vstupní parametry hydraulického zkušebního pro turbínový režim:

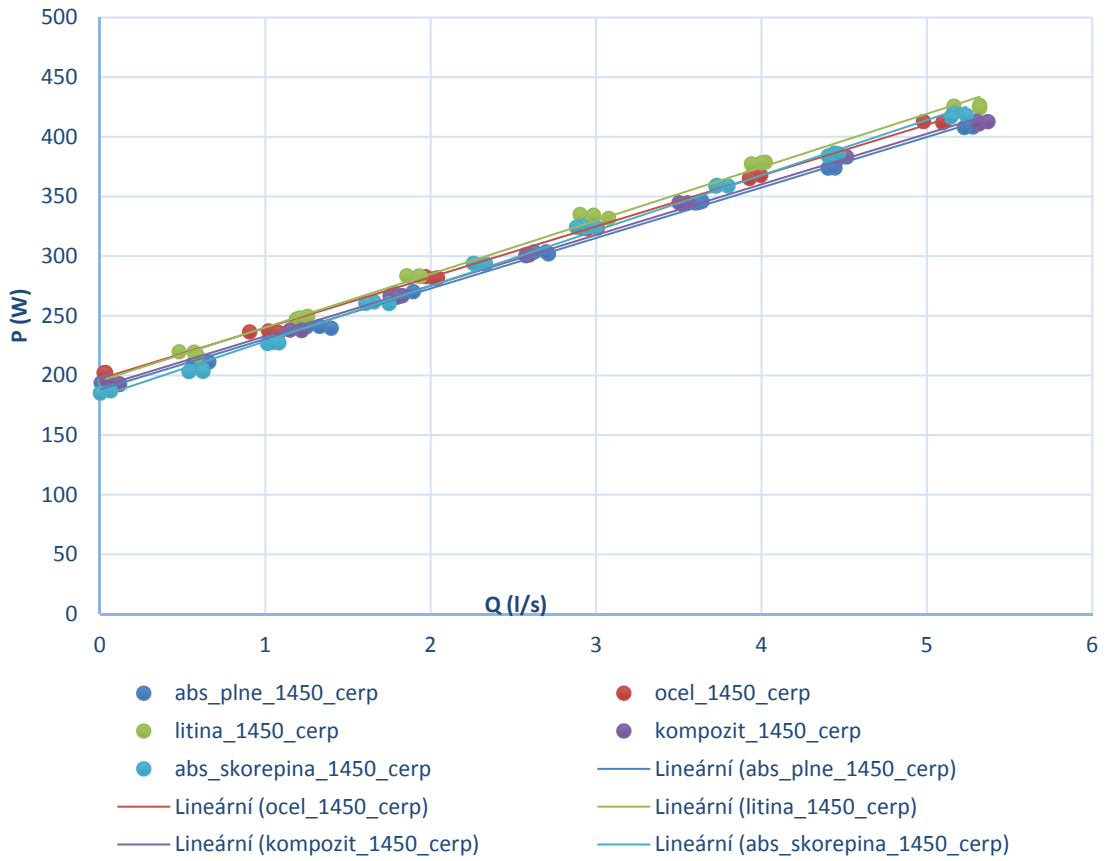
- Světlost sacího potrubí: $d_s = 50\text{mm}$
- Světlost výtlačného potrubí: $d_p = 65\text{mm}$
- Svislá odlehlost odběru tlaků: $h = 290\text{mm}$

Z naměřených a vypočtených hodnot byly sestaveny níže zobrazené závislosti parametrů výkonových chytristik všech variant oběžných kol pro tři typy zkoušených provozů, *Obr. 33, Obr. 34, Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38, Obr. 39 a Obr. 40*:

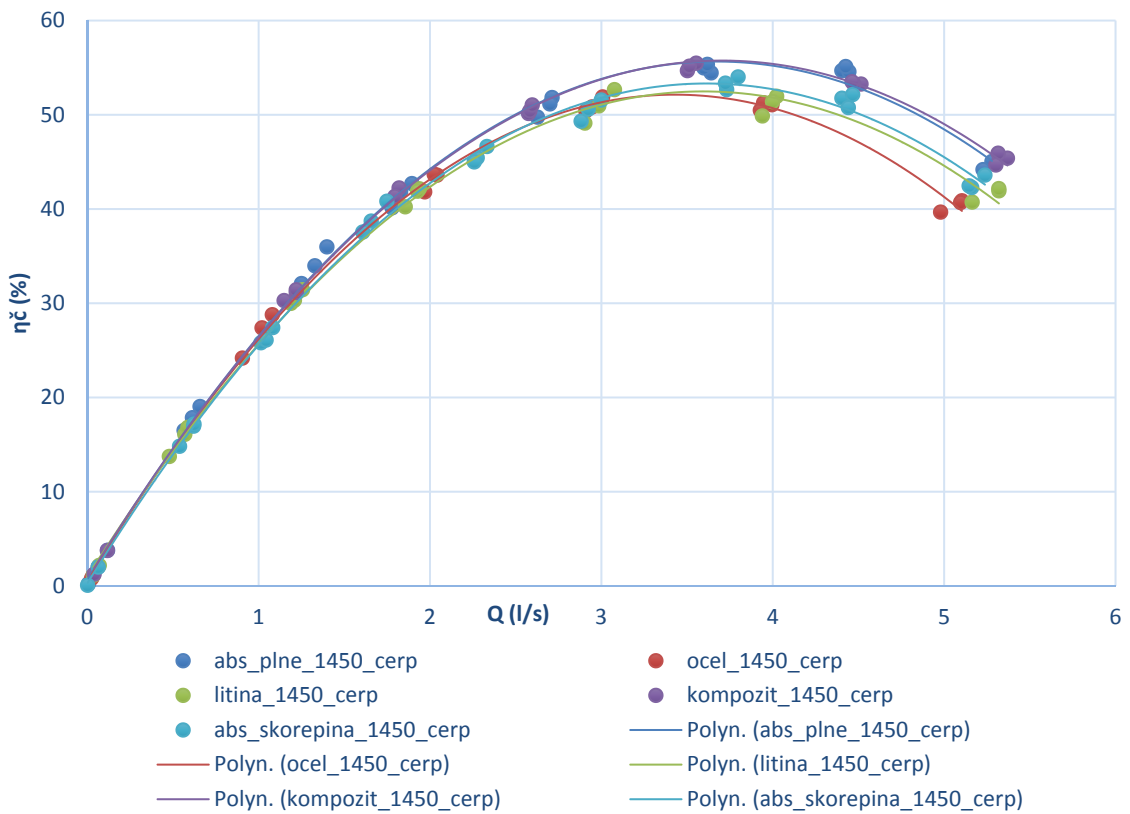
4.3.3. Čerpadlový režim při 1450 ot. min^{-1}



Obr. 33 Dopravní výška čerpadla – průtok (1450 ot. min^{-1})

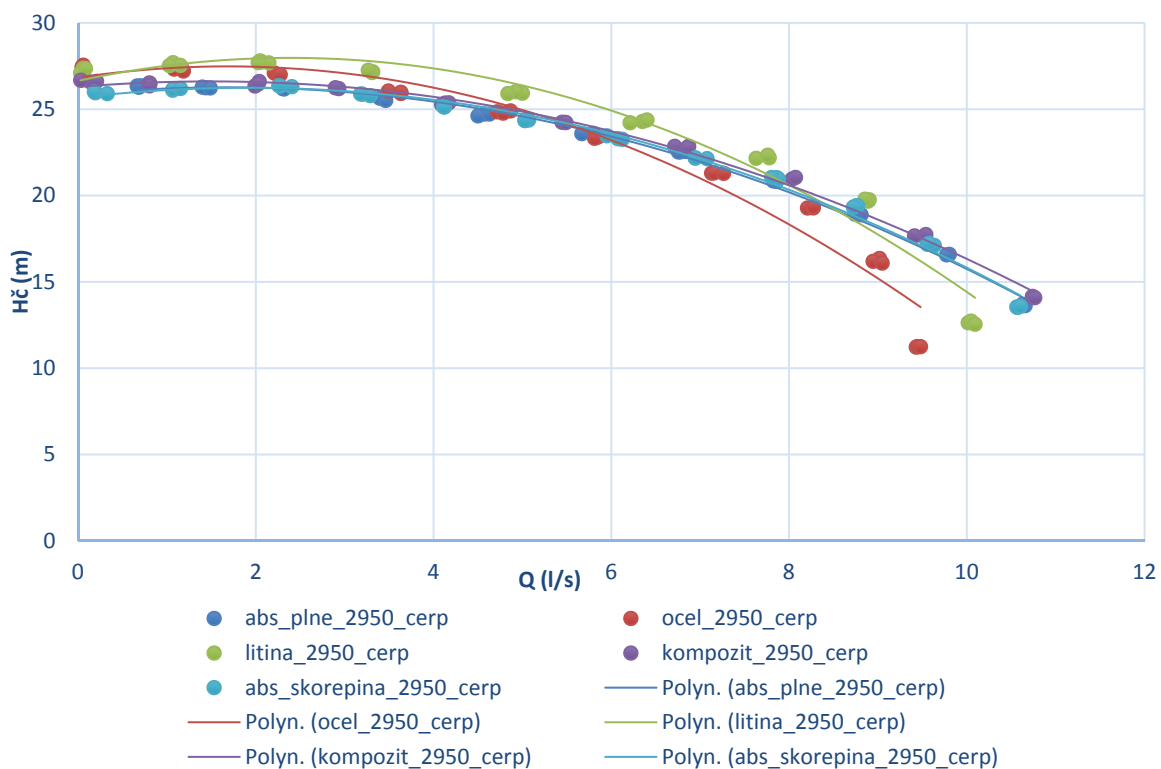


Obr. 34 Příkon čerpadla – průtok ($1450 \text{ ot. min}^{-1}$)

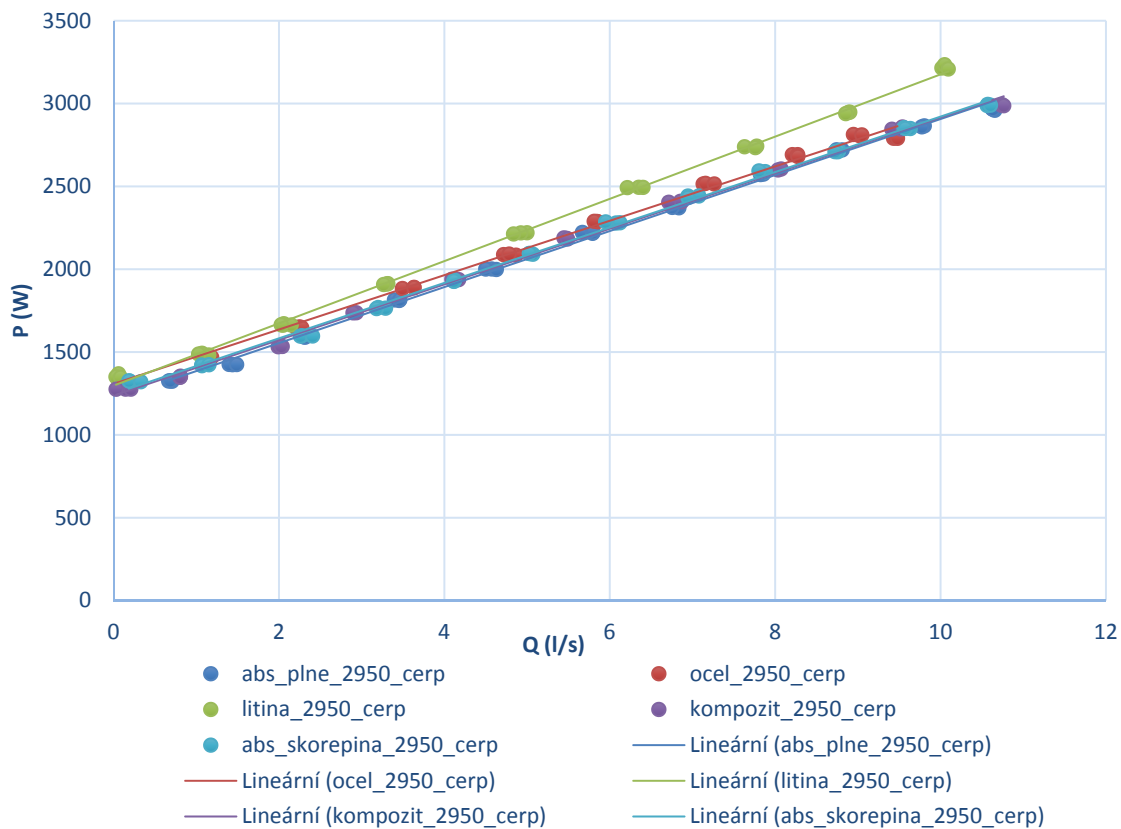


Obr. 35 Účinnost čerpadla – průtok ($1450 \text{ ot. min}^{-1}$)

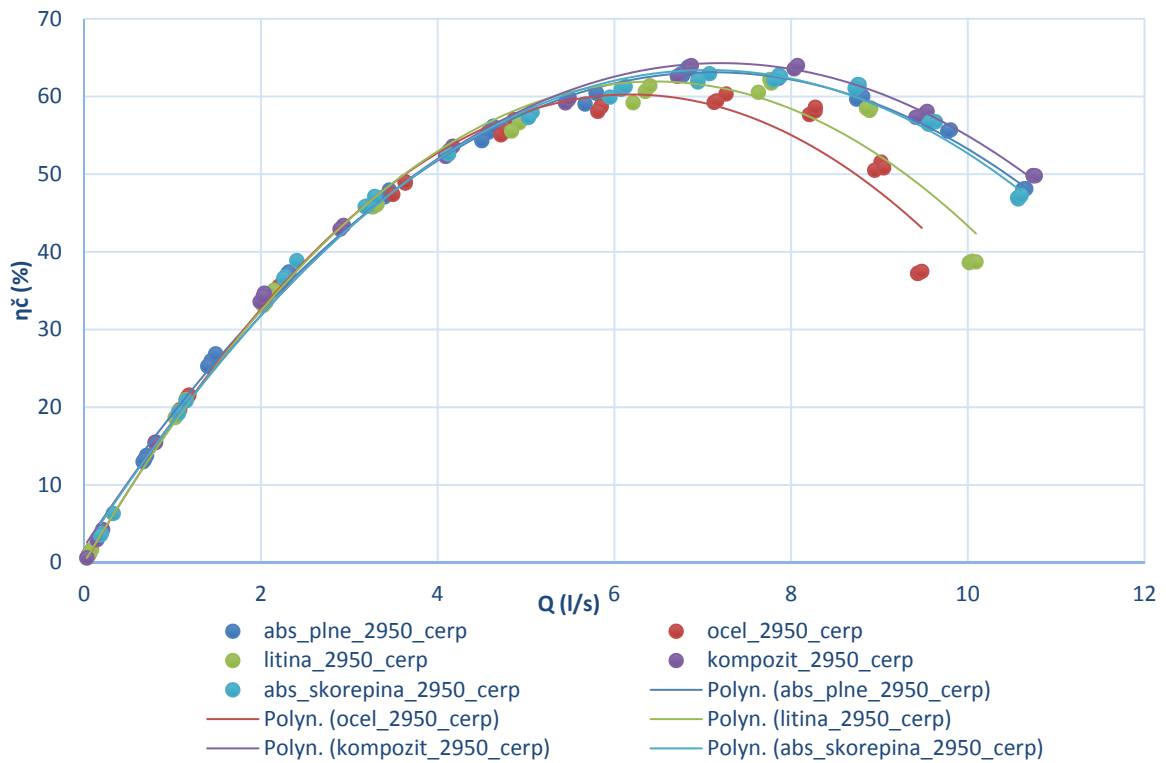
4.3.4. Čerpadlový režim při 2950 ot. min⁻¹



Obr. 36 Dopravní výška čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)

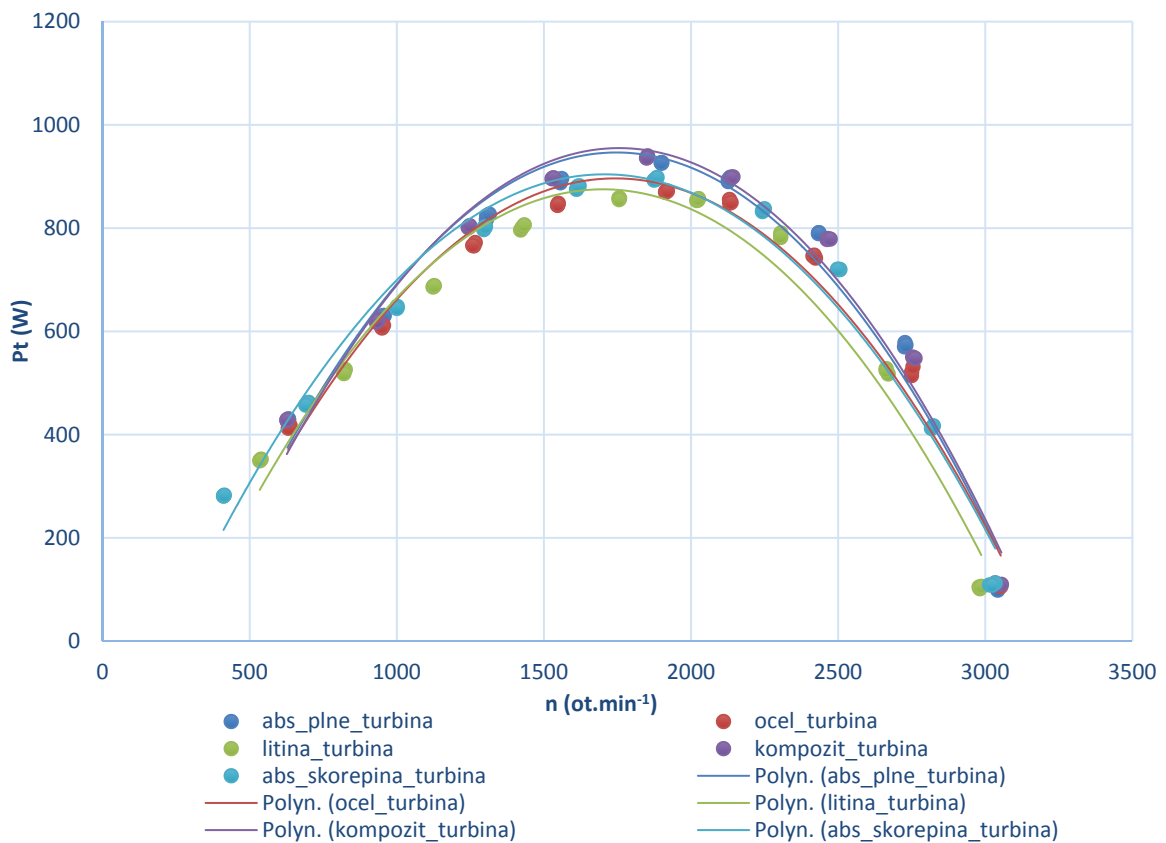


Obr. 37 Příkon čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)

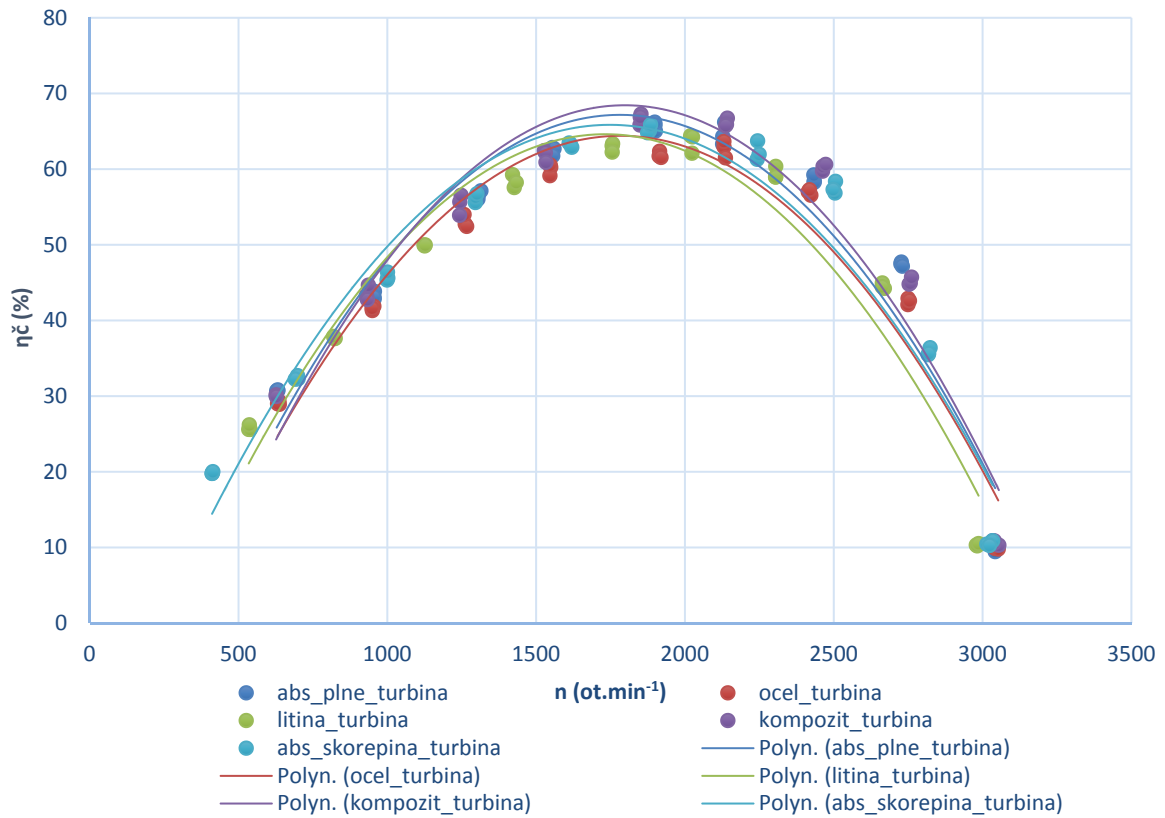


Obr. 38 Účinnost čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)

4.3.5. Turbínový režim



Obr. 39 Mechanický výkon turbíny – otáčky



Obr. 40 Účinnost turbíny – otáčky

Doplňkové charakteristiky závislostí hydraulického spádu na otáčkách a průtoku na otáčkách turbíny jsou uvedeny viz Příloha V.

5. Diskuse

V odborné literatuře autoři popisují dobré zkušenosti s dosažením vyšší jakosti (sklovitého) povrchu prototypů při krátkodobém namáčení anebo vystavení účinkům par acetonu nebo 1, 2 dichlorethanu. To se často děje za cenu snížení pevnosti součásti anebo ztráty tvarové a rozměrové přesnosti. Původním záměrem byla snaha také úpravu zakomponovat při výrobě oběžných kol, ale vzhledem k tvarově náročné geometrii, značně rozdílným tloušťkám stěn součásti a značném zatížení při ověřovacích zkouškách v hydraulickém okruhu (2950 ot/min), jsem po několika pokusech od záměru ustoupil. Jedná se o problematiku na další samostatnou práci a pro opakovatelné použití těchto metod je potřeba mít proces řádně odladěn. Pozitivním přínosem této úpravy by mohlo být možné zabránění nasákavosti do dutin kol kapalinou a tím zamezení vzniku případného hmotového nevyvážku. Při zátěžových zkouškách bylo totiž prokázáno, že kola jsou sice schopna částečně kapalinou nasáknout, ale zkoušky jsou krátkodobého charakteru a drobná nasákavost neměla žádný vliv na průběh a výsledky zkoušek. Všechny varianty zkoušených kol vysoké namáhání při plném zatížení vždy vydržely.

Mechanické zátěžové zkoušky materiálu tištěného ABS ověřované při statickém zatížení na trhacím stroji dle příslušných ČSN norem ukazují na značně rozdílné mechanické vlastnosti vzorků vytištěných různými směry tiskových vláken. Hodnoty tahových zkoušek vzorků ve směru tiskových vláken jsou v porovnání s daty uváděné výrobcem v příloženém materiálovém listě dle norem ASTM zhruba o 10% nižší. Tyto rozdíly mohou být způsobeny použitím rozdílných typů FDM 3D tiskáren.

6. Závěr

Hlavním úkolem předkládané práce bylo ověřování provozních charakteristik různých variant 3D tisku radiálního jednostupňového odstředivého oběžného kola hydraulického stroje z ABS plastu, oproti konvenčně odlévaným kovovým oběžným kolům v čerpadlovém a také v turbínovém režimu.

Výkonové charakteristiky testovaných oběžných kol naměřené na hydraulickém okruhu pro čerpadlový režim ukazují, že všechny varianty mají navzájem velice podobné funkční hodnoty. A také velice shodné trendy funkčních křivek doprání výšky, příkonu a celkové mechanické účinnosti v závislosti na průtoku v porovnání dvou provozních stavů při 1450 a 2950 ot./min. Tvary jednotlivých křivek jsou takřka shodné a hodnoty dopravní výšky a příkonu korespondují s násobkem otáček provozu. Hodnoty celkových účinností čerpadel v provozu při otáčkách 1450 min^{-1} se pohybují okolo 52% a v provozu při otáčkách 2950 min^{-1} jsou okolo 62%.

Výkonové charakteristiky oběžných kol pro turbínový režim ukazují, že všechny varianty mají také navzájem velice podobné funkční hodnoty a velice shodné trendy funkčních křivek mechanického výkonu a celkové mechanické účinnosti v závislosti na otáčkách. Hodnoty celkových mechanických účinností turbín se pohybují okolo 62%, což odpovídá typu provozu. V přílohách jsou doplňkově uvedeny charakteristiky závislosti hydraulického spádu na otáčkách a průtoku na otáčkách turbíny. Z naměřených hodnot lze vyčíst charakteristické vlastnosti této turbíny, kdy při stoupajících otáčkách průtok a celková účinnost rostou až do maxima výkonu a s dalším navyšováním otáček průtok i účinnost klesají. Neboli, turbína při optimálních otáčkách dosahuje nejvyššího výkonu a účinnosti.

Celkově lze zhodnotit, že prototypy vyrobené technologií Rapid Prototyping dosahují v hydraulickém zkušebnictví optimálních hodnot ve srovnání s konvenčně vyráběnými oběžnými koly v čerpadlovém i turbínovém režimu. Přičemž nezanedbatelnou roli hraje volba parametrů při zpracování virtuálního modelu, jakost použitého materiálu, a především kvalita 3D tisku. Při dodržení těchto okrajových podmínek je možné tuto progresivní technologii úspěšně použít při ověřování nově vyvíjených čerpadel, turbín a čerpadlových turbín.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Technologie 3D tisku Binder Jetting (9)</i>	7
<i>Obr. 2 Technologie 3D tisku SLS – Selective Laser Sintering (12)</i>	9
<i>Obr. 3 Technologie 3D tisku SL – Stereolitography (16)</i>	10
<i>Obr. 4 Technologie 3D tisku FDM – Fused Deposition Modeling (17)</i>	12
<i>Obr. 5 Zkušební těleso typu 1A</i>	16
<i>Obr. 6 Zkušební vzorky A1 – směry tiskových vláken</i>	16
<i>Obr. 7 Schéma hydraulického okruhu (26)</i>	17
<i>Obr. 8 Kovové oběžné kolo ve spirální skříní a parametry čerpadla (30)</i>	22
<i>Obr. 9 Oběžné kolo – 3D CAD virtuální model</i>	22
<i>Obr. 10 Oběžné kolo – offset ploch</i>	23
<i>Obr. 11 Nastavení parametrů STL exportu</i>	24
<i>Obr. 12 Tvorba STL sítě</i>	24
<i>Obr. 13 Orientace dílu na podložce a volba tiskových parametrů</i>	25
<i>Obr. 14 Tvorba automatického trasování tiskové úlohy</i>	26
<i>Obr. 15 Možnosti pokročilých nastavení vnitřní struktury součástí</i>	27
<i>Obr. 16 3D tisk oběžného kola</i>	29
<i>Obr. 17 Vytištěné oběžné kolo</i>	30
<i>Obr. 18 První krok čištění materiálu podpory</i>	30
<i>Obr. 19 Vytištěné oběžné kolo – kontrola rozměrů</i>	30
<i>Obr. 20 Zařízení na rozpouštění materiálu podpory</i>	31
<i>Obr. 21 Oběžné kolo – obrábění přídavek</i>	31
<i>Obr. 22 Oběžné kolo – finální rozměrová kontrola</i>	32
<i>Obr. 23 Instron 3382</i>	32
<i>Obr. 24 Zkušební vzorek – detail</i>	33
<i>Obr. 25 Ocelové oběžné kolo</i>	33
<i>Obr. 26 Litinové oběžné kolo</i>	34
<i>Obr. 27 ABS plné oběžné kolo</i>	34
<i>Obr. 28 ABS skořepinové oběžné kolo</i>	34
<i>Obr. 29 Kompozitové oběžné kolo</i>	35
<i>Obr. 30 Hydraulický zkušební okruh</i>	35
<i>Obr. 31 Hydraulický okruh – detail</i>	36

<i>Obr. 32 Montáž kompozitového oběžného kola</i>	36
<i>Obr. 33 Dopravní výška čerpadla – průtok (1450 ot.min⁻¹)</i>	37
<i>Obr. 34 Příkon čerpadla – průtok (1450 ot.min⁻¹)</i>	38
<i>Obr. 35 Účinnost čerpadla – průtok (1450 ot.min⁻¹)</i>	38
<i>Obr. 36 Dopravní výška čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)</i>	39
<i>Obr. 37 Příkon čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)</i>	39
<i>Obr. 38 Účinnost čerpadla – průtok (2950 ot.min⁻¹)</i>	40
<i>Obr. 39 Mechanický výkon turbíny – otáčky</i>	40
<i>Obr. 40 Účinnost turbíny – otáčky</i>	41

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Porovnání technologií Rapid Prototypingu – upraveno autorem (21)</i>	14
<i>Tab. 2 Šarže tiskového materiálu</i>	28
<i>Tab. 3 Tiskové úlohy a spotřeby materiálů (33)</i>	29

Seznam příloh

Příloha I. – Produktový a bezpečnostní list materiálu ABS (22)

Příloha II. – Bezpečnostní list materiálu podpory (31)

Příloha III. – Produktový list 3D tiskárny Dimension Elite (32)

Příloha IV. – Materiálové zkoušky ABS-P430 plastu

Příloha V. – Hydraulické zkušebnictví

Použitá literatura

- (1) MELICHAR, Jan a Jaroslav BLÁHA. *Problematika soudobé čerpací techniky: vybrané partie*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03719-5.
- (2) HOROVÁ, Iva. *3D modelování a vizualizace v AutoCADu pro verze 2009, 2008 a 2007*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2008. ISBN 978-80-251-2194-8.
- (3) VARCHOLA, Michal. *Hydraulický návrh axiálního stroja*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. ISBN 978-80-8106-069-4.
- (4) VARCHOLA, Michal. *Hydraulický návrh odstředivých čerpadel*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. ISBN 978-80-8106-070-0.
- (5) GÜLICH, Johann. *Centrifugal pumps*. 3rd edition. Heidelberg: Springer, 2014. ISBN 978-3-642-40113-8.
- (6) MOHAN, N., P. SENTHIL, S. VINODH a N. JAYANTH. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2017, **12**(1), 47-59 [cit. 2019-01-26]. DOI: 10.1080/17452759.2016.1274490. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1274490>
- (7) ZHANG, Zhizhou, Kahraman DEMIR a Grace GU. Developments in 4D-printing: a review on current smart materials, technologies, and applications. *International Journal of Smart and Nano Materials* [online]. 2019, , 1-20 [cit. 2019-01-26]. DOI: 10.1080/19475411.2019.1591541. ISSN 1947-5411. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475411.2019.1591541>
- (8) SEIDL, Martin, Jiri SAFKA, Jiri BOBEK, Lubos BEHALEK a Jiri HABR. MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS MADE OF ABS WITH RESPECT TO INDIVIDUALITY OF FDM PRODUCTION PROCESSES. *MM Science Journal* [online]. 2017, **2017**(01), 1748-1751 [cit. 2019-01-23]. DOI:

10.17973/MMSJ.2017_02_2016188. ISSN 18031269. Dostupné z:
<http://www.mmscience.eu/february-2017.html#2016188>

- (9) Binder Jetting (BJ). *Additively* [online]. Curych, Switzerland: Additively, 2017 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- (10) Scale factor and shrinkage in additive ma-nufacturing using binder jetting. *Diva-portal* [online]. Stockholm, Švédsko: KTH Royal Institute of Technology, 2016 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:950841/FULLTEXT01.pdf>
- (11) Introduction to Binder Jetting 3D printing. *3D Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: 3D Hubs, 2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
- (12) Selective Laser Sintering (SLS). *Additively* [online]. Curych, Švýcarsko, 2017 [cit. 2019-01-3]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>
- (13) A Review on Selective Laser Sintering: A Rapid Prototyping Technology. *Iosrjournals* [online]. Pune, Indie: M.E.S. College of Engineering, 2016 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/Conf15008/Vol-4/53-57.pdf>
- (14) Introduction to SLA 3D Printing: Manufacturing Processes Explained. *3D Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: 3D Hubs, 2019 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- (15) Introduction to SLS 3D Printing: Manufacturing Processes Explained. *3D Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: 3D Hubs, 2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- (16) Stereolithography (SL). *Additively* [online]. Curych, Switzerland: Additively, 2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>

- (17) Fused Deposition Modeling (FDM). *Additively* [online]. Curych, Switzerland: Additively, 2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>
- (18) JAYANTH, N., P. SENTHIL a C. PRAKASH. Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2018, **13**(3), 155-163 [cit. 2019-01-23]. DOI: 10.1080/17452759.2018.1449565. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2018.1449565>
- (19) GARG, Ashu, Anirban BHATTACHARYA a Ajay BATISH. On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2015, **31**(4), 522-529 [cit. 2019-01-26]. DOI: 10.1080/10426914.2015.1070425. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1070425>
- (20) Introduction to FDM 3D printing: Manufacturing Processes Explained. *3D Hubs* [online]. Amsterdam, Nizozemsko: 3D Hubs, 2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>
- (21) KOZEL, Jan. *Návrh výrobní součásti vyráběné technologií 3D tisku*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 75 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/42351>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Maňas, Lukáš.
- (22) ABS Plus: Materials & Service Consumables. *Stratasys* [online]. United States: Stratasys, 2019 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://store.stratasys.com/stratasysstorefront/stratasys/en/Materials-%26-Service-Consumables/NA/Flavors/ABS-Plus/p/P006>
- (23) ABS. *Materialpro3d* [online]. Brno: Solidify 3D, s.r.o., 2019 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>

- (24) ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- (25) *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- (26) POLÁK, Martin. *The influence of changing hydrotechnical potential on performance parameters of pump in turbine mode* [online]. (v tisku). Agronomy Research: Agronomy Research, 2019 [cit. 2019-02-09].
- (27) ČSN EN ISO 9906. *Hydrodynamická čerpadla - Přejímací zkoušky hydraulických výkonových parametrů - Stupně přesnosti 1, 2 a 3*. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- (28) POLÁK, Martin. *Energetické stroje a zařízení*. 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2013. ISBN 978-80-213-2366-7.
- (29) MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05056-9.
- (30) POLÁK, Martin. Experimental evaluation of hydraulic design modifications of radial centrifugal pumps. *Agronomy Research* [online]. Agronomy Research, 2017, **2017**(151, 1189-1197 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317744300_Experimental_evaluation_of_hydraulic_design_modifications_of_radial_centrifugal_pumps
- (31) P400-SR: Materials & Service Consumables. *Stratasys* [online]. United States: Stratasys, 2019 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://store.stratasys.com/stratasysstorefront/stratasys/en/Materials-%26-Service-Consumables/NA/Flavors/P400-SR/p/P046>
- (32) Dimension Elite: THINK IN 3D AND GIVE YOUR IDEAS NEW DIMENSION. *Stratasys* [online]. United States: Stratasys, 2019 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Machine_Spec_Sheets/PSS_FDM_DimElite.pdf

- (33) GrabCad Print: Stratasys 3D printing made easy and accessible. *Stratasys* [online].
Izrael: Stratasys, 2019 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://grabcad.com/print>