



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA FUNKČNÍHO PROTOTYPU ÚCHYTU SEDLA KOLA METODOU FDM 3D TISKU

PRODUCTION OF FUNCTIONAL PROTOTYPE OF BICYCLE SEAT CLAMP WITH FDM 3D PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Zemánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Patrik Zemánek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba funkčního prototypu úchytu sedla kola metodou FDM 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vyroba funkčního prototypu úchytu části sedla na kole. Práce obsahuje jak rešerši problematiky, tak návrh modelu, volbu materiálu a výrobu zvoleného dílu metodou FDM. Součástí bude rovněž a srovnání s konvenční technologií a technicko ekonomické vyhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky
- konstrukční řešení
- výroba prototypu
- technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam literatury:

GEBHARDT, Andreas. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. Munich: Hanser, c2012, ix, 164 s. ISBN 978-1-56990-507-4.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve. Vyd. 1. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010, 207 s. ISBN 978-80-5-3-0548-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje výrobu prototypu metodou FDM tisku. Cílem této práce bylo se obeznámit s tématem a projít si výrobním procesem prototypu. Na závěr je součást otestována a zhodnocena z ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Rapid prototyping, FDM, úchyt, ABS, PC, PLA, Autodesk Inventor

ABSTRACT

This bachelor's thesis describes production of prototype by FDM printing. The aim of this thesis was to acquire knowledge about the topic and undergo the production process of the prototype. Finally the component was tested and evaluated from an economic point of view.

Key words

Rapid prototyping, FDM, handle, ABS, PC, PLA, Autodesk Inventor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMÁNEK, P. *Výroba funkčního prototypu úchytu sedla kola metodou FDM 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba funkčního prototypu úchyty sedla kola metodou FDM 3D tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19.5.2016

Datum

Patrik Zemánek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady a také za jeho čas při vypracování mé bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
ÚVOD.....	8
1 METODY RAPID PROTOTYPING	9
1.1 Proces vzniku reálné součásti.....	9
1.2 Rozdělení systémů Rapid prototyping.....	10
1.3 Fused Deposition Modeling - FDM.....	11
1.3.1 Materiály používané v FDM	13
1.4 Další základní metody RP	17
1.4.1 Selective laser sintering - SLS.....	17
1.4.2 Stereolitografie - SLA	18
1.5 Konstrukce tiskárny	19
1.6 Parametry RepRap tiskárny.....	21
2 POPIS SOUČÁSTI.....	22
2.1 Funkce držáku	22
2.2 Materiál držáku.....	22
3 NÁVRH MODELU	23
3.1 Autodesk Inventor Professional	23
3.2 Technologičnost součásti	23
3.3 Volba materiálu	24
3.4 Simulace vybraných materiálů	25
3.5 Výsledky simulace.....	27
4 VÝROBA PROTOTYPU	29
4.1 KISSlicer.....	29
4.2 Umístění a volba parametrů	29
4.3 Tisk součásti.....	30
4.4 Zhodnocení tisku	31
5 TESTOVÁNÍ PROTOTYPU V PRAXI.....	32
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	34
ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	40
SEZNAM PŘÍLOH.....	42

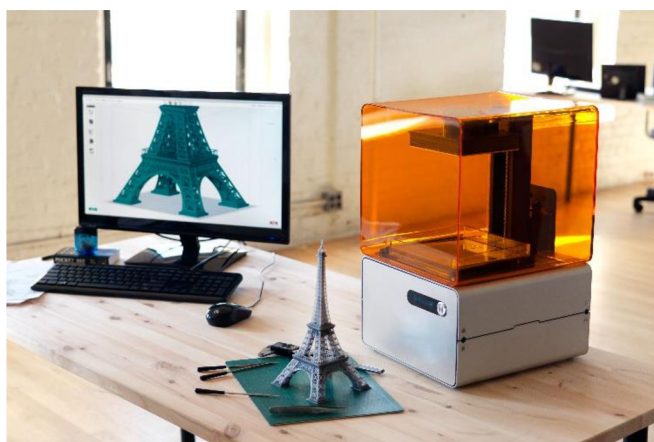
ÚVOD

V době, kdy plasty jsou téměř nenahraditelným materiálem se vývoj technologií vyrábějící z tohoto materiálu posunuje neustále dopředu, aby se splnily požadavky zákazníků. V odvětvích jako jsou strojírenství či stavebnictví se technologie Rapid Prototyping (dále jen RP) během posledního desetiletí rozrostla natolik, že již nikoho nepřekvapí výroba funkčních součástí v 3D tiskárnách v poměrně krátkém časovém intervalu.

Současná doba vyžaduje rychlý vývoj technologií. Zadané úkoly musí být plněny rychle a poté prezentování nových nápadů je nejlepší, když si je může člověk fyzicky vyzkoušet. Konstruktorům, designerům a dalším nejlépe napoví zpětná vazba, jestli je model navržen podle zadaných kritérií. Kontrola funkčnosti, designu, ergonomie jsou jedním z těchto kritérií. Proces výroby těchto prototypů je na rozdíl od konvenčních technologií poněkud odlišný.

Na začátku stála ruční výroba, která díky své nepřesnosti vyrobeného modelu nebyla tou pravou cestou k výrobě. Nevýhoda byla také v tom, kdy v případě přílišného odebraného materiálu, tedy více než bylo třeba, se model znehodnotil. Využití technologií jako jsou soustružení, frézování, vrtání a další konvenční technologie se přesnost modelu určuje podle zručnosti obsluhy stroje a přesností výrobního zařízení. Tato možnost má výhodu v automatizaci celého procesu a maximalizaci dosáhnuté přesnosti. Bohužel u tohoto způsobu je potřeba upnutí do přípravku nebo sklíčidla, což znemožňuje vyrobení na jedno uchycení [1].

Další možností jsou metody RP (viz obr. 1). Myšlenka vymodelovat něco na počítači a poté jen čekat na vytisknutí 3D modelu mě nadchla natolik, abych se o toto téma začal zajímat. Práce nejprve rozebírá metody technologií RP a 3D tiskáren, přípravu modelu a poté samotné řešení zadání. Nakonec popisuje ekonomické srovnání s konvenční výrobou.



Obr. 1 Jedna z metod Rapid Prototyping [7].

1 METODY RAPID PROTOTYPING

Ve všech technologiích RP je princip výroby prototypu stejný. Spočívá v opakovaném nanášení materiálu v tenkých vrstvách, až se postupně sestaví finální model (viz obr. 1.1). Různé metody se liší ve způsobu, jakými jsou na sebe nanášeny a jak jsou spojeny. Na rozdíl v konvenčním obrábění je tomu jinak. Materiál je odebírán ve formě třísky. Princip tisku probíhá obdobně jako u laserových nebo inkoustových tiskáren s tím rozdílem, že vznikají prostorové objekty. U tisku hraje důležitou roli tloušťka vrstvy nanášeného materiálu, která má vliv na podobu originálu. Pokud máme k dispozici CAD program a je zapotřebí vyrobit součást fyzickou součástí, tak jednou z cest výroby můžou být metody RP. Nejčastějším materiálem používaný v RP je plast. Díky zkrácení doby vývoje produktu se metody RP stávají více používanými než kdy dříve [3,9].



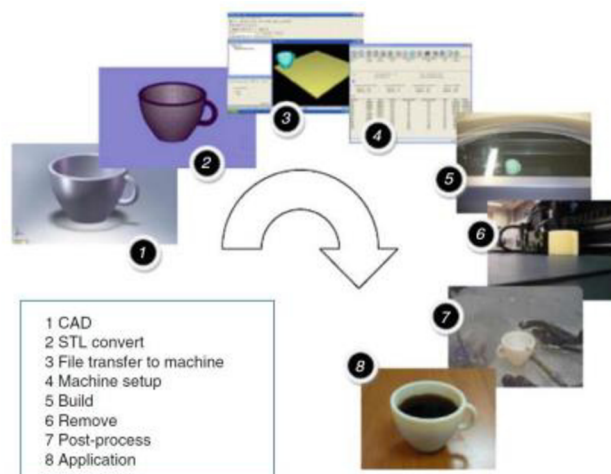
Obr. 1.1 Obecný proces vzniku součásti [8].

1.1 Proces vzniku reálné součásti

Sled operací jak jdou za sebou:

- pokud máme k dispozici reálnou součást, pak je tato součást naskenována některou metodou Reverse Engineering. Výsledkem skenování je mrak bodů, který je převeden na trojúhelníkovou síť a poté vyhlazen. Tato data můžou být uložena v různých formátech k dalšímu zpracování [3.9],
- CAD – Druhým zdrojem je virtuální model, který lze vytvořit v jakémkoliv CAD softwaru. Podmínkou je, že povrchy modelu musí být uzavřené [3.9],
- vymodelovaná součást je vygenerovaná nejčastěji do STL formátu [3.9],
- takto převedený soubor je importován do AM (aditivní modelování) zařízení [3.9],
- nadále lze nastavit proces tisku (teploty, rychlosti, množství materiálu)[3.9],
- po nastavení následuje samotný tisk součásti. Tento proces probíhá automaticky a není zde potřeba obsluh [3.9],

- post-processing – Nakonec je potřeba díl upravit, odstranit podpůrný materiál pokud byl použit, případně můžeme součást nastříkat speciálním nátřikem, podle požadavků zákazníka [3.9]. Tento proces je graficky ukázán na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Proces vzniku reálné součásti [9].

1.2 Rozdělení systémů Rapid prototyping

Dle báze materiálu modelu [1]:

1) Pevná

Materiály jsou ve formě drátů navinutých na cívkách, granulí nebo listů. Patří sem:

- FDM – Fused Deposition Modeling – modelování tavným nanášením,
- LOM – Laminated Object Manufacturing – výroba modelů laminováním,
- PLT – Paper Lamination Technology – laminování s použitím papíru.

2) Prášková

Jedná se o pevný materiál ale má speciální rozdělení. V této kategorii se nachází:

- SLS – Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání,
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering – přímé spékání kovů,
- EBM – Electron Beam Melting – natavování elektronickým paprskem,
- LENS – Laser Engineered Net Shaping,
- MJS – Multiphase Jet Solidification,
- 3DP – Three-Dimensional Printing.

3) Tekutá

Jde o materiály s tekutou fází. Proces vytváření spočívá ve vytvrzování modelu.

- SLA – Stereolithography,
- SCS – Solid Creation System,

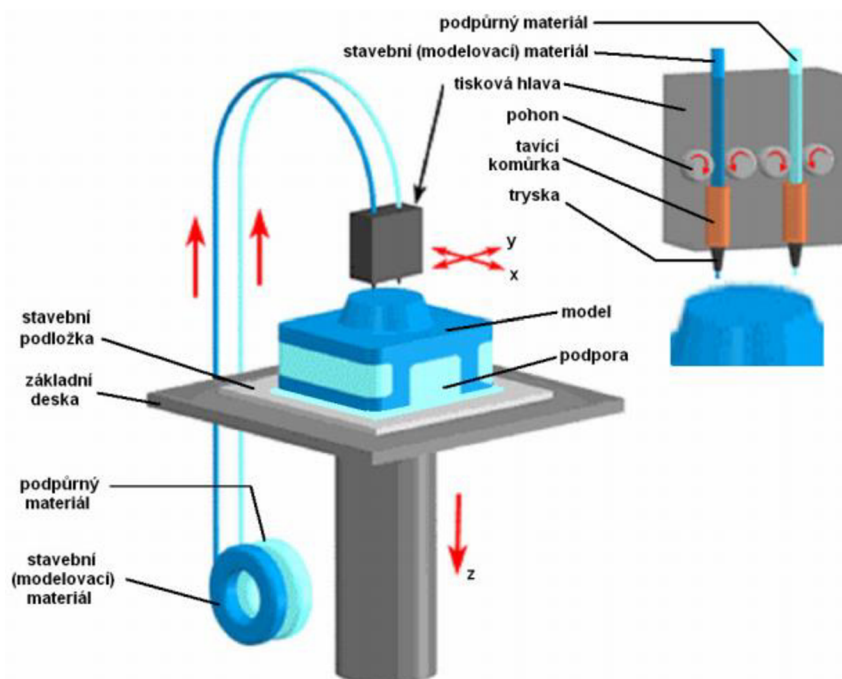
- SGC – Solid Ground Curing,
- MJM – Multi-Jet Modeling,
- BPM – Ballistic Particle Manufacturing.

1.3 Fused Deposition Modeling - FDM

Tato technologie vznikla v roce 1989 pod rukama Scotta Crumpa a poté byla patentována firmou Stratsys, která je jednou z nejvýznamnějších firem na poli 3D tiskáren [1].

Jak již bylo řečeno výše, tato metoda pracuje na bázi pevného materiálu. V této době jde o nejrozšířenější metodu v rámci RP. Jedním z důvodů proč se stala oblíbenou je jednoduchost. Není zapotřebí speciálních systémů na výrobu FDM zařízení. Z hlediska výrobních nákladů je FDM také výbornou volbou. Jsou relativně nízké a rok od roku se snižují [1].

V této metodě se využívají dva druhy materiálů (viz obr. 1.3). Hlavní stavební materiál je označován jako modelovací a slouží k samotné výrobě tělesa. Druhý materiál se jmenuje podpůrný. Jak už z názvu vyplývá, jde o materiál, který vytváří oporu při stavbě součástí. Jedná se o plochy, které nejsou ničím podpírány a při nanášení vrstev a tuhnutí by se mohly deformovat. Tato podpůrná hmota se také nanáší pod každý model a vytvoří adhezni vrstvu. Díky této ochraně se model po nanesení vrstev ochlazuje pomaleji a nedochází k nechtěným deformacím [1].



Obr. 1.3 Princip výroby součásti metodou FDM [10].

Podpůrný materiál se dělí podle struktury a podle funkce jakou plní [1]:

- základní – plní jen podpůrnou funkci,
- obklopující – vytváří podpůrnou funkci a také obklopí celý model materiálem. Vhodnost aplikace by mohla být při stavbě jemné struktury, kde by mohlo dojít snadno k narušení modelu při kontaktu s pracovní hlavicí,
- strukturovaný – hlavní vlastností této podpory je její malá hustota. Spotřeba materiálu je díky tomu menší a rychlost výroby součásti se urychluje,
- odlamující – úlohu plní při odstraňování z modelu, kdy je lehce odlamován.

Modelovací i podpůrný materiál je navinutý na cívkách. Z cívek je vtlačován pomocí kladek do vyhřívané trysky. Tento pohyb vykonává krokový motor, který přesně dávkuje množství látky potřebnou na stavbu. Teplota vyhřívacích trysek je závislá na použitém materiálu. Pro modelování například materiálu PC-ABS je teplota tavení 280 °C. Podpůrnému materiálu P400 stačí jen 102 °C, aby se začal tavit. Po vypuštění z trysky se hmota vzduchem ochladí a ztuhne. Hlava se pohybuje v rovině X, Y dokud není dokončena celá vrstva. Následně je celá hlava posunuta nahoru o tloušťku vrstvy v ose Z a tiskne se další vrstva. Takto se operace opakují, dokud není celá součást hotova. Po vytisknutí se model vyjme z pracovního prostoru zařízení. Pokud v tisku byly použity stavební podpory, lze je odstranit chemicky nebo mechanicky. Záleží zase na typu materiálu [1.3].

Výhody [1.3]:

- výroba funkčních součástí – pomocí metody FDM lze vyrobit prototypy s vlastnostmi, které se podobají finálním produktům,
- minimální odpad – všechny stavební materiál je využit v součásti a odpadem je pouze nerecyklovatelný podpůrný materiál,
- odstranění podpory – každý typ podpůrné struktury je snadno odstranitelný. Pokud je lehce přístupná lze ji odebrat odlomením. V druhém případě v těžce přístupných místech je lepší odstranění v koupeli, kde se struktura rozpustí,
- rychlá výměna materiálu – v průběhu výroby součástky je možné vyměnit kazetu za novou a poté pokračovat v tisknutí.

Nevýhody [1.3]:

- omezená přesnost – přesnost zaleží na druhu použitého materiálu a na průměru výstupní trysky. Trysky mají pevně definovaný výstupní otvor, což limituje tloušťku stěn modelu,
- pomalý proces tisku – díky principu metody a vlastnostem materiálu nelze tento proces urychlit. Rychlost výstavby modelu závisí na rychlosti vytlačení materiálu,
- smršťování modelu – po vytlačení se stavební materiál ochlazuje, což způsobuje zvyšování napětí v modelu. Nakonec se to projeví smrštěním a zkroucením součástí. Lze to eliminovat vyhřívanou stavební podložkou (viz obr.1.4). Některé FDM tiskárny mají vyhřívaný celý interiér pro stavbu modelu a tisk nezačne, dokud nebude tento interiér předeřhřátý na požadovanou teplotu.



Obr. 1.4 Vyhřívaná podložka eliminující smršťení modelu [2].

1.3.1 Materiály používané v FDM

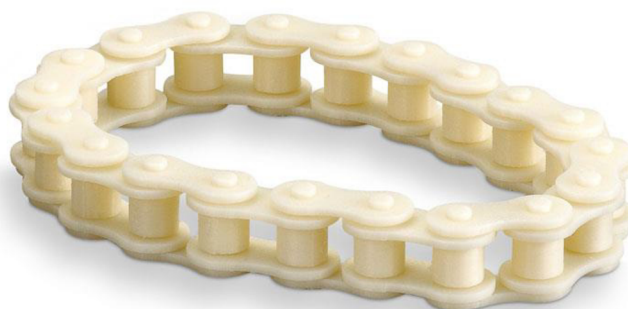
V této podkapitole budou rozebrány materiály z hlediska složení a použití:

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

Základní termoplastický materiál dosahuje 80 % pevnosti plastů ABS vstříkovaných do formy. Je tedy vhodný na výrobu prototypů [38].

ABSplus

ABSplus doposud nabízel z FDM technologií nejširší škálu barev (bílá, černá, modrá, oranžová, atd). 3D součásti jsou pevné a dlouhodobě stabilní. Vhodné jsou například k ověření konstrukce a designu. Podpurný materiál je zde rozpouštěn [1]. Výrobek z toho materiálu je zachycen na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Funkční součást vytisknutá z materiálu ABSplus [13].

ABS-EDS7 (ABS – electrostatic dissipative)

ABS-EDS se vyznačuje elektrostaticky disipativní odolností. Našel uplatnění v elektronických výrobcích, kde je potřeba ochrana před elektrostatickými jevy [1].

ABSi (Methyl methacrylate-acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer)

Materiál s vysokou odolností proti nárazu, částečně průsvitný a použitelný v automobilovém designu nebo v lékařství [38].

ABS-M30

Tento plast má až o 70 % větší pevnost než klasické ABS. Je vhodný pro výrobu prototypů, funkčních modelů [38].

ABS-M30i (Biocompatible ABS)

Biokompatibilní materiál využívaný v tisku lékařských, potravinářských, farmaceutických funkčních prototypů, které mohou být sterilizovány pomocí gamma záření nebo EtO (splňuje normu ISO 10933) [38].

PC (Polycarbonate)

Součásti vyrobené z polykarbonátu disponují lepšími mechanickými vlastnostmi než ABS. Modely dosahují vysoké přesnosti a stability. Využití nachází v lékařství, automatizačním průmyslu. Podpurný materiál může být jak rozpustný, tak odlamující [1,11].

PC-ISO (Polycarbonate-ISO)

PC-ISO je také biokompatibilní termoplast splňující normu ISO 10993. V technologiích FDM jde o nejvíce tepelně biokompatibilní materiál, který může být sterilizován. Hojně používaný k výrobě obalů potravin a léků [1,11].

PC-ABS

Spojení polykarbonátu (PC) a kopolymeru ABS získaly výborné vlastnosti: pevnost a tepelná odolnost PC a pružnost ABS. Je stabilní na denním světle. Běžně se používá v automobilovém, elektronickém, telekomunikačním průmyslu. Metoda pracuje s rozpustným podpurným materiálem. [11].

ULTERM 9085

Důležitou vlastností je jeho snížená schopnost hoření. Tento skvělý materiál s mnoha certifikacemi ho činí vysoce komerčně využívaným hlavně v letecké, lodní a pozemní dopravě. Lze jej využít pro aplikace, kde je potřeba vysoký poměr pevnost/hmotnost [1].

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate)

Vlastnostmi velmi blízký ABS. ASA nabízí nejvíce barevných variací ze všech FDM materiálů. Pochlubit se také může nejkvalitnějšími povrchovými a estetickými vlastnostmi. Dalším významným znakem je odolnost vůči UV záření a povětrnostním podmínkám, což je vhodné pro venkovní použití. Výhodou je také dobrá rozměrová stabilita a nízká hladina žloutnutí, což ocení hlavně v odvětvích, kde je kladen důraz na vzhled. Používá se na výrobu strojírenských nástrojů i koncových výrobků [39,40].

PPSF (polyphenyl sulfone)

Disponuje vynikající odolností proti vysokým teplotám (nejvyšší v FDM materiálech až 189 °C [37]) a proti chemickým látkám. Proto je vhodný do leteckého, kosmického nebo zdravotnického průmyslu [11].

PLA (Polylactic Acid)

Materiál je vyroben z přírodních zdrojů jako kukuřice, brambor nebo cukrová řepa. Mechanické vlastnosti jsou lepší než u ABS. Nevýhodou je, že materiál ve vlhkém prostředí absorbuje vlhkost a nesnese vyšší teploty. Přírodní PLA je zdravotně neškodný a lze jej ekologicky likvidovat bez jakékoliv zátěže životního prostředí. Tisk součástí může být nepříjemný, protože PLA zapáchá. Finální modely mají mnohem lepší povrch než ABS. Stal se univerzálním a používá se většinou v domácích tiskárnách [12].

NYLON 12

Součásti vyrobené z nylonu 12 vynikají svým poměrným prodloužením při přerušení (dosahuje 30 % [35]) a vysokou únavovou odolností včetně cyklického namáhání všemožných součástí ve tvaru západek a vložek. Použití nalézá v automobilovém a leteckém průmyslu [11].

PETG (polyetylén tereftalát –glykol)

PETG vyniká svou odolností vůči mechanickému poškození a chemikáliím. Zvládá vysoké i nízké teploty a je zdravotně nezávadný [42].

POM (polyoxymethylen)

Materiál je využíván v odvětvích, pokud je potřeba vysoká tuhost, nízké tření a výborná rozměrová stabilita. Vhodný na strojírenské komponenty (menší ozubená kola, ložiska) [41].

PP (polypropylen)

Snáší vyšší provozní teploty ve srovnání s ABS nebo PLA a odolává řadě chemikálií. Používá se v potravinářském a textilním průmyslu [43].

Podrobnější specifikace materiálů jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Specifikace materiálů FDM [30,35,36,38,40,45,46,48,49, příloha 1].

	ABS plus	ABSi	ABS M30	PC ABS	PC	ULTEM 1010	PPSF PPSU
Pevnost v tahu [MPa]¹	33	37	36	34	68	81	55
Pevnost v ohybu [MPa]²	58	62	61	59	104	144	110
Poměrné prodloužení [%]¹	6	4,4	7	5	4,3	3,3	3
Teplota deformace [°C]³	96	87	96	110	138	216	189
Teplota tisku [°C]	200-230	200-230	200-230	220-240	240-270	350-400	360-400
Tvrdość Rockwell⁴	R109	R108	R109,5	R110	R115	R109	R86

	PLA	ASA	NYLON 12	HIPS	PETG	POM	PP
Pevnost v tahu [MPa]¹	53	33	46	16	26	65	25
Pevnost v ohybu [MPa]²	80	60	67	50	64	82	31
Poměrné prodloužení [%]¹	6	9	30	50	58	30	12
Teplota deformace [°C]³	65	98	97	88	69	104	100
Teplota tisku [°C]	195- 210	250- 255	180	220- 250	220- 250	220- 230	250- 270
Tvrdość Rockwell⁴	R90	R82	R108	R55	R108	R120	R120

Teploty tisku jsou doporučeny přímo danými výrobci.

1 – dle normy ASTM D638

2 – dle normy ASTM D790

3 – dle normy ASTM D648

4 – dle normy ASTM D785

Rozpusťné podpůrné materiály [1]:

PVA (polyvinylalkohol)

Je rozpustný v horké vodě, díky tomu je práce na odstranění podpor urychlena. Teplota při tisku je 170 °C. Nevýhodou je, že absorbuje vlhkost z okolí a projeví se to bublinami na podpoře modelu. Je důležité ho skladovat v suchu při pokojové teplotě.

HIPS (High Impact Polystyrene)

Jedná se o levný plast, který je rozpustný v roztoku látky limonén. Používá se i jako stavební materiál. Disponuje výbornou rozměrovou stabilitou. Teplota hlavy pro vytlačení materiálu je přibližně 230 °C. Cenově je zhruba o 50 % levnější než PVA. Používá se například při balení potravin, protože je hygienicky nezávadný a bezpečný pro lidi.

Tabulka 1.2 srovnává orientačně ceny materiálů pro technologii FDM. Ceny jsou přepočteny na 1 kg. Průměr filamentu je 1,75 mm.

Tab. 1.2 Orientační cena vybraných materiálů přepočtené na 1 kg hmotnosti s průměrem filamentu Ø1,75 mm [48,49].

	ABS	ASA	PC- ABS	HIPS	PETG	POM	PLA	PC	PP
Cena [Kč]	Od 580	Od 770	Od 600	Od 500	Od 600	Od 1200	Od 550	Od 1550	Od 1200

1.4 Další základní metody RP

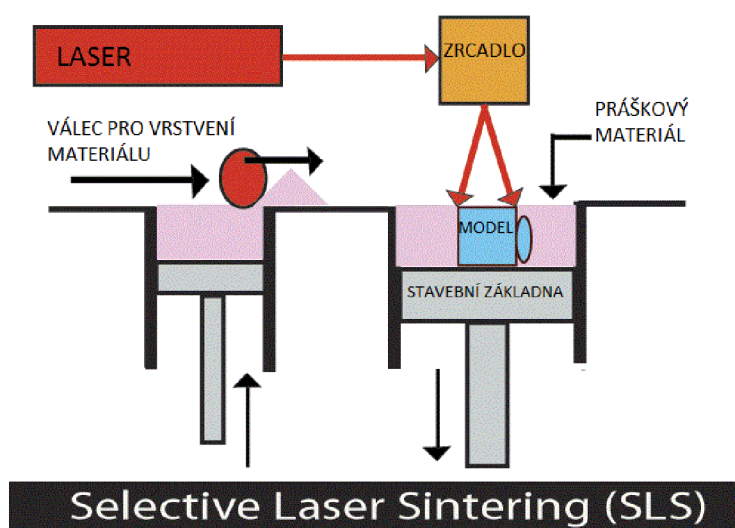
Vybrané další základní metody s rozdílným vstupním materiálem.

Nazývají se: **Selective laser sintering – SLS**

Stereolitografie – SLA

1.4.1 Selective laser sintering - SLS

Jedná se o technologii, která pracuje s práškovým materiálem. Tato metoda využívá laserový paprsek ke spékání slévárenského písku, plastového nebo kovového prášku. Výsledkem tisku je pevný model [1.9]. Princip metody je ukázán na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Schéma nanášení vrstev u SLS [15].

Zařízení se skládá většinou ze tří komor. První komora je zásobník materiálu, který se pohybuje ve směru osy Z. Posuvem nahoru dávkuje materiál, který je poté válcem rozprostřen na přesně definovanou tloušťku vrstvy prášku. Stavební základna se pohybuje také ve směru osy Z, pohyb ale je prováděn dolů. Tím se určuje výška nanesené vrstvy. Přebytečný prášek se válcem odsune do přebytečné komory. Po nanesení vrstvy se aktivuje laser a pomocí zrcadla se nasměruje na místa, která mají být spečené. Poté se celý proces opakuje [1].

V pracovní komoře je stálá teplota, díky které nedochází k deformacím při tisknutí. Spékání probíhá v prostředí plynného dusíku, což zabraňuje oxidaci modelu [1].

Materiály pro SLS [1]:

PA2200 - polyamid s vysokou pevností, tuhostí a dobrou odolností proti chemickým látkám.

ALUMID - je charakteristický svou vysokou tuhostí a kovovým vzhledem.

CarbonMide – materiál vyztužený vlákny s maximalizovaným poměrem hmotnost/pevnost.

Výhody [1.3]:

- vynikající svou pevností,
- široká škála použitelných materiálů,
- nepotřebují téměř žádné podpory a vyžadují jen malé práce s post-processingem.

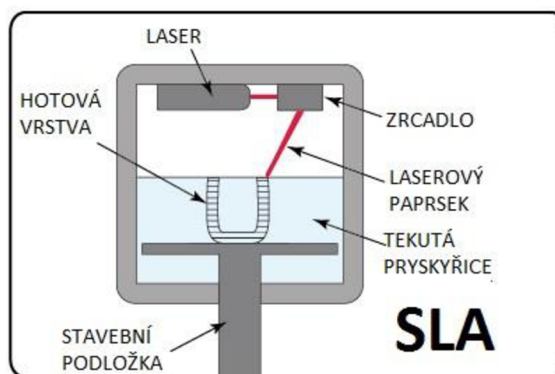
Nevýhody [1.3]:

- potřeba energeticky a prostorově náročné zařízení,
- horší kvalita povrchu v porovnání s ostatními metodami.

1.4.2 Stereolitografie - SLA

Tato technologie patří mezi nejstarší metodu, ale stále hojně používanou. Vyznačuje se velkou přesností modelu. Přesnost se pohybuje okolo 0,05 až 0,2 mm na 100 mm délky prototypu [3]. Vyjma přesnosti je tato metoda charakteristická i širokou škálou použitelných materiálů. Použití si našla ve výrobě forem pro lití a vstřikování nebo ve vytváření modelů s milimetrovými otvory a miniaturními prvky [3,9]. Výroba metodou SLA je naznačena na obr. 1.7.

Stavební podložka je celá ponořena v tekutém fotopolymeru, který je citlivý na UV záření. Podložka se pohybuje směrem v ose Z. Tloušťka vrstvy závisí na vzdálenosti polotovaru od hladiny. Hladina je vždy výš než model a zpravidla je to 0,05 až 0,2 mm [6]. UV záření je nasvíceno přesně na místo stavby modelu, což započne chemickou reakci a vytvrzování součástí. Nakonec nůž vytvrzenou vrstvu zarovná a celý cyklus se opakuje [6].



Obr. 1.7 Schéma výroby modelu metodou SLA [15].

Výhody [3,9]:

- vyšší přesnost prototypu ve srovnání s ostatními metodami (možnost výroby malých miniaturních otvorů a prvků),
- široká škála používaných materiálů,
- jakost povrchu,
- plynulý proces vytváření modelu – není třeba zasahovat do tisku obsluhou.

Nevýhody [3,9]:

- pomalý proces vytvrzování vrstev modelu,
- malá tepelná odolnost (jen u některých materiálů),
- potřeba úpravy povrchu modelu po dokončení tisku,
- nutnost budovat dočasné podpory.

Materiály pro SLA:

Jedná se o všechny polymery, které se dají laserovým paprskem vytvrdit. Cena těchto materiálů je vyšší než u ostatních metod a práce s nimi je náročnější, protože znečišťují pracoviště [1]. Vybrané z nich jsou [1]:

Accura Bluestone - vlastnostmi nejlepší materiál pro SLA. Předností je vysoká pevnost a odolnost modelu při vysokých teplotách (až do 250 °C [1]) a odolnosti vůči vlhkosti. Prototypy jsou často testovány v reálných podmínkách.

Somos NeXt – vlastnosti podobné Accura Bluestone. Používá se na konektory, kryty elektroniky, sportovní výrobky.

V tabulce 1.3 jsou shrnuty základní vlastnosti probraných metod.

Tab. 1.3 Shrnutí vybraných vlastností metod Rapid Prototyping [6,16,17,18,19].

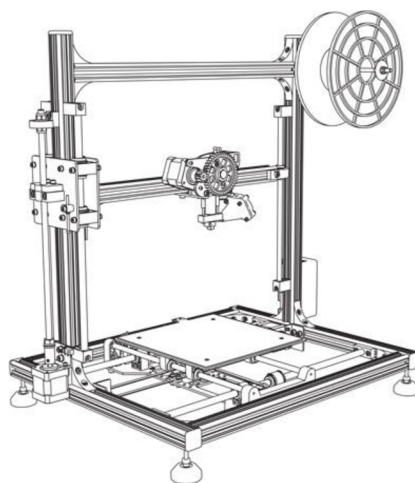
	Orientační velikost komory [mm]	Polotovar	Nutnost podpor	Tloušťka vrstvy [mm]	Princip metody
SLS	340 x 340 x 600 mm (EOS P 396)	Prášek	ne	0,06 ÷ 0,15	Laser
SLA	380 x 380 x 250 mm (ProJet 7000 HD)	Tekutý fotopolymer	ano	0,05 ÷ 0,15	Chemická reakce
FDM	254 x 254 x 305 mm (Dimension 1200es)	Drát	ano	0,01 ÷ 0,33	Tavení

1.5 Konstrukce tiskárny

Základní typy provedení tiskáren: **Portálové**
Mostové

Portálové provedení tiskárny

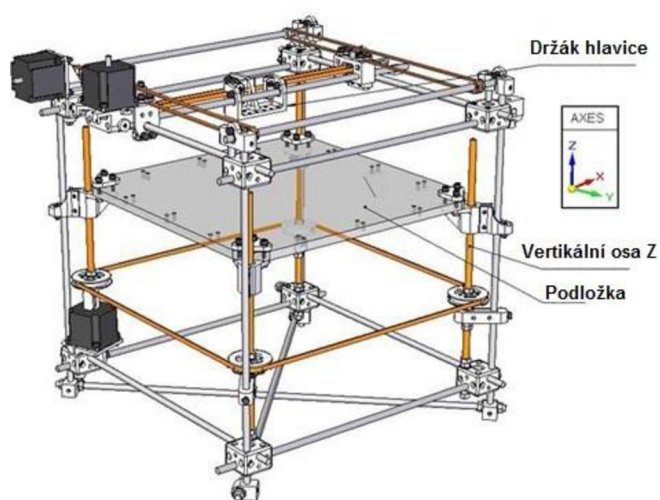
Portál se pohybuje ve svislém směru osy Z. Na portálu je umístěna vytlačovací hlavička, která koná horizontální pohyb ve směru X. Na stavební podložce se buduje model a pohybuje se v horizontálním směru osy Y [1]. Na obr. 1.8 je zobrazeno portálové provedení.



Obr. 1.8 Portálové provedení 3D tiskárny [20].

Mostové provedení tiskárny

U tohoto provedení je na podélném vedení konstrukce upevněný most s hlavicí. Hlavice koná stejný pohyb jako u portálového provedení, tedy horizontální pohyb ve směru X. Most koná pohyb v horizontálním směru osy Y. Změna nastává ve vertikálním pohybu v ose Z, zde vykonává pohyb stavební podložka [1].



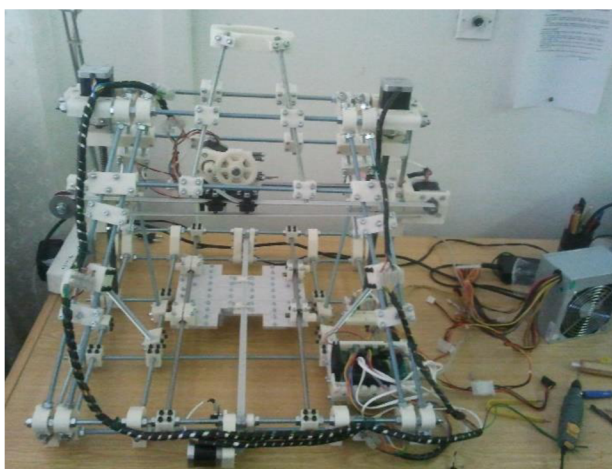
Obr. 1.9 Mostové provedení 3D tiskárny [21].

Výše uvedené provedení mají obdélníkovou nebo čtvercovou pracovní plochu pro budování modelu. O pohon se starají krokové motory, které přesně polohují jednotlivé osy [1].

1.6 Parametry RepRap tiskárny

RepRap je open-source projekt založený v roce 2005 doktorem Adrianem Bowyerem. Hlavním nápadem u tohoto projektu bylo vytvořit 3D tiskárnu, která bude moci vytisknout většinu vlastních součástí. Open-source znamená, že se do projektu můžou zapojit fanoušci z celého světa a vymýšlet nové nápady a inovace společně. V dnešní době patří RepRap tiskárny mezi nejrozšířenější druhy [2, 44].

RepRap je zkratkou replicating rapid prototyper. V překladu to znamená možnost se sebe sám vytisknout. Při mé práci bude použita tiskárna u pana Ing. Oskara Zemčíka, Ph.D, která se jmenuje Sinuhed (viz obr. 1.10).



Obr. 1.10 RepRap tiskárna Sinuhed [34].

Základní parametry tiskárny Sinuhed jsou uvedeny v tab 1.4.

Tab. 1.4 Základní informace Sinuhed tiskárny

Rozměry tiskárny (š x d x v)	700x600x700 mm
Max. velikost vytisknutelné součásti (velikost podložky) (X x Y x Z)	250x250x210 mm
Hmotnost	22 kg
Příkon	max. 350 W
Napájení	~230 V
Průměr struny	Ø3 mm
Rychlost tisku (běžná rychlost)	8-120 (24-60) mm/s
Rychloposuv XY	150 mm/s
Teploty tisku	do 300 °C
Teplota podložky	150 °C

Tiskárna se převážně skládá z plastových součástek, které byly vytisknuty. Další části jsou kovové tyče, šrouby, řemeny, krokové motory, hlavice, podložka. Podložka může být vyrobena z plastu nebo skla. Na tuto podložku je možné pokládat speciální povlaky, aby součást pevně držela na podložce. Mezi nejznámější patří ABS Juice, Kapton páska, lak na vlasy atd. [44].

2 POPIS SOUČÁSTI

Firma AZUB bike s.r.o. se zabývá hlavně výrobou lehokol a tříkolek. Je významnou ikonou na českém i světovém trhu v oblasti alternativní cyklistiky. Právě na těchto výrobcích se používá komponenta držák sedla.

2.1 Funkce držáku

Slouží k upevnění sedla na kole. Upevnění držáku zajišťují dva rychloupínače, které lze snadno uvolnit a tím libovolně posouvat držák do správné polohy. Součást je tlačena k protikusu pomocí speciálního šroubu, ve kterém je zasunut horní rychloupínač. Ten uvolňuje sedačku a spodní rychloupínač umožňuje pohyb po rámové trubce. Držák se nemůže otáčet různě na trubce. Tomu zabraňuje posuvná lišta, která brání posuvu do nesprávné polohy [23]. Systém IPS (Ideal Position System) je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Držák sedla vyvinutý firmou AZUB bike s.r.o. [22].

2.2 Materiál držáku

Držák je vyroben z materiálu PA66+GF30. Jedná se o polyamid typu PA6.6 s přísadou 30 % skleněných vláken. Díky tomuto přídavku nabízí vyšší tuhost, vyšší odolnost opotřebení a dobře odolává vodě a vlhkému prostředí. Je vysoce odolný v tlaku a má výbornou rozměrovou stabilitu [24]. Použití těchto polyamidů je velmi oblíbené ve strojírenství např. ozubená kola, řemenice, kluzná ložiska atd [25]. Držák je namáhaný v různých prostředích: UV záření, vlhkost, vysoké (nízké) teploty, prašnost, velká hmotnost zátěže. Proto je tento plast vhodný na tento výrobek.

3 NÁVRH MODELU

Při návrhu modelu byl poskytnut firmou AZUB bike s.r.o. výrobní výkres, který sloužil jako předloha při modelování.

Doba, kdy trh nabízí na výběr kvanta programů na modelování v 3D prostoru, nemusí být jednoduché se orientovat ve výběru. Mezi nejvýznamnější patří Autodesk Inventor Professional, Catia, NX 6, Solidworks, Pro/ENGINEER a další.

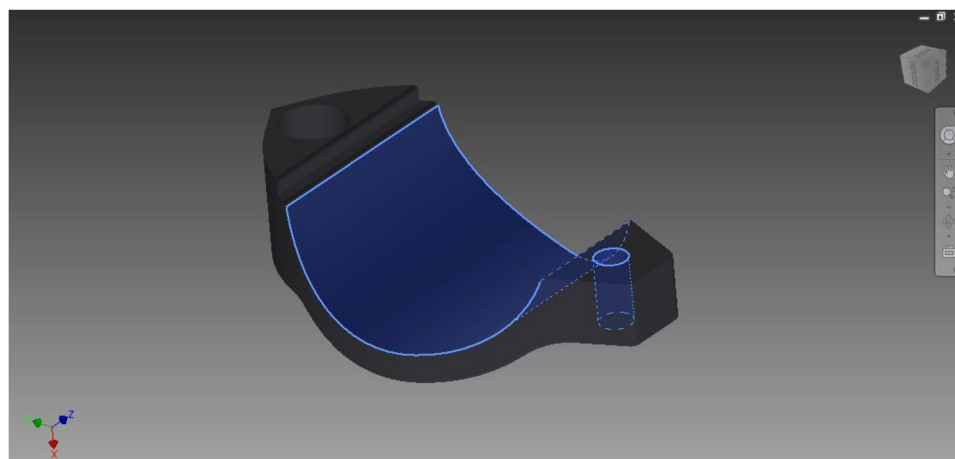
Pro návrh modelu byl zvolen Autodesk Inventor Professional 2015.

3.1 Autodesk Inventor Professional

V strojírenském provozu se používá Inventor při 3D navrhování, vizualizacích a simulacích. Inventor patří do skupiny parametrických programů. Objekty jsou definovány pomocí parametrů. Existuje asociativita mezi modelem a výkresem – pokud změním kótu u modelu, změní se i u výkresu. V programu se nachází historie modelu, což může přinášet výhody i nevýhody [26, 27].

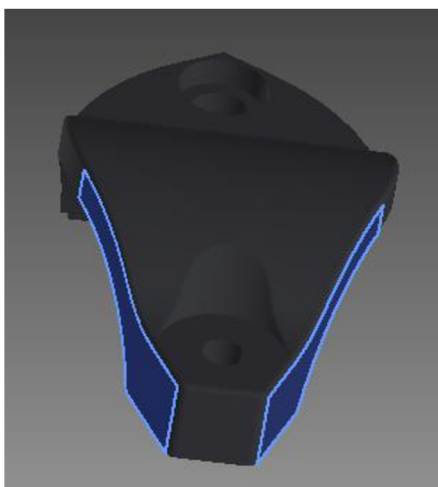
3.2 Technologičnost součástí

Nejdůležitější podmínkou při výrobě je dodržení rozměru největšího průměru oblouku. Plní zde zásadní funkci výrobku a to, aby se součást nepohybovala po lakované trubce. Další důležitý rozměr je malý otvor na rychloupínač, kde jeho osa musí být kolmá k ose trubky (vyobrazeno na obr. 3.1). Druhý otvor má dostatečnou vůli pro speciální šroub, jenž plní funkci tlačení součástek proti sobě.



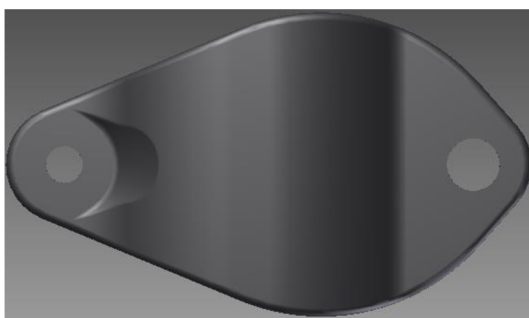
Obr. 3.1 Dva parametry plnící funkci součásti.

Ze zkušeností pana vedoucího mé práce, je potřeba zvětšit otvory o cca. 0,4 mm, kvůli smrštění modelu při chladnutí. K umístění modelu na podložku je nutné určit plochu, která bude v pevném a stabilním kontaktu s touto podložkou. Zásadní z hlediska pevnosti je volba směru vláken, tedy jak bude pokládat housenky tiskárna. Nejlepší varianta se nabízí položit součást na bok, tudíž budou vlákna pokládána kolmo na směr působící síly. Z těchto důvodů byly zkoseny plochy po stranách (naznačeno na obr. 3.2).

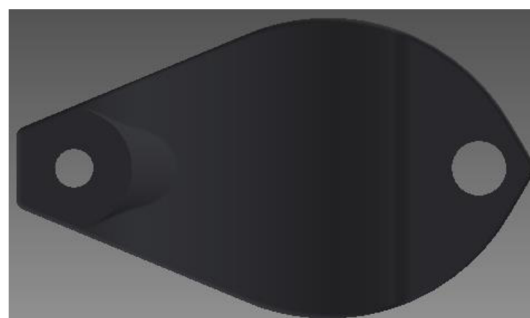


Obr. 3.2 Zkosené plochy upravené pro ustavení na podložku.

V této situaci nastává problém s vyrobením zaoblených hran. Obecně by neměl model obsahovat mnoho zaoblení na začátku a na konci housenky, neboť dochází k zhoršení kvality povrchu a může být ucpána tryska hlavice. Proto byla upravena vrchní i spodní část modelu. Z hlediska kvality materiálu hraje roli také vrstva nanášeného materiálu. Pokud to není nutné, nemá být volena menší drsnost povrchu než je potřeba (srovnání originálu a upraveného prototypu na obr. 3.3).



Obr. A



Obr. B

Obr. 3.3 Srovnání originálu (obr. A) a prototypu (obr. B).

Varianta s položením na čelo by nejenom snížila pevnost, ale i zvýšila spotřebu podpůrného materiálu, který by byl potřeba umístit pod oblouk.

3.3 Volba materiálu

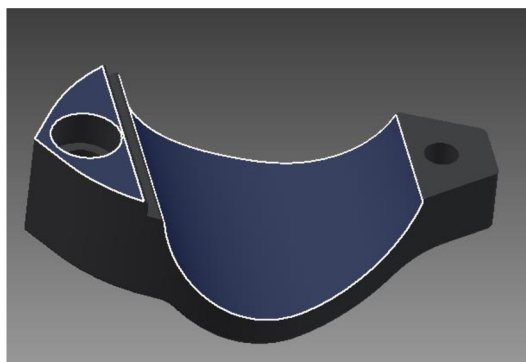
Významnou stránkou ovlivňující vlastnosti daného výrobku je jeho zvolený materiál. Tento výrobek je mechanicky namáhán, proto je především důležitá jeho pevnost a stálost mechanických vlastností ve venkovním počasí. Dalším aspektem je odolnost vůči UV-záření, jelikož se předpokládá používání v jakémkoliv venkovním prostředí, což může být i na silném slunečním záření nebo ve vlhkém a studeném prostředí. Také by měl být brán ohled na absorpci vlhkosti. Zvolen byl materiál polykarbonát (PC). Odolává všem výše

zmíněným venkovním vlivům. Kamenem úrazu by mohla být pevnost, která je na poměry FDM materiálů vysoká, ale nemusí být dostatečná v praxi.

3.4 Simulace vybraných materiálů

Ke správnému rozhodnutí, co se týče materiálu, pomohla simulace v Inventoru na mechanické zatížení. K součásti byly vymodelovány matice, které se používají v praxi a následně byly zatíženy silou.

V první řadě bylo nutné určit vazby k součásti. Zvoleny byly dvě ideální vazby (viz obr. 3.4) z důvodu, aby v těchto místech bylo zabráněno pohybu v kolmém směru na zvolenou plochu.



Obr. 3.4 Zvolené ideální vazby. Menší plocha je opřená o protikus. Větší plocha kopíruje tvar trubky.

Dále bylo potřeba definovat dotyky mezi podložkami (šrouby) a součásti, aby program byl informován, jaký úkol má plnit další sortiment při simulaci. Typ dotyku byl vybrán separace, neboť chceme při deformaci, aby šroub byl stále v kontaktu s vybranou plochou. Tento typ dotyku zakazuje průnik součástí.

Následně byly do simulace definovány zatěžující síly. Velikost sil, kdy je sedačka upevněna a držák se nepohybuje po trubce, byla zjištěna pomocí momentového klíče. Ke zjištění velikosti momentu musely být vyměněny rychloupínače za šrouby. Výsledné momenty byly zjištěny a jsou uvedeny v tab. 3.1. Poté přepočítání momentu na osovou sílu byl proveden podle rovnice 3.1[50].

$$M = \left[\left(\frac{d_2}{2d} \frac{\tan(\psi) + f \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}{1 - f \tan(\psi) \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \right) + 0,625f_0 \right] F_i d \quad (3.1)$$

Kde: M [Nm] - utahovací moment šroubu,
 d_2 [m] - střední průměr závitu šroubu,
 d [m] - velký průměr závitu šroubu,
 ψ [°] - úhel stoupání závitu,
 α [°] - vrcholový úhel závitu,
 f [-] - součinitel tření pod maticí,
 f_0 [-] - součinitel tření v závitu,
 F_i [N] - osová síla šroubu.

Úhel stoupání závitu se vypočítá dle rovnice 3.2 [50]:

$$\psi = \tan\left(\frac{P}{\pi \times d_2}\right) \quad (3.2)$$

kde: P [mm] - stoupání závitu šroubu,
 d_2 [mm] - střední průměr závitu šroubu,
 ψ [°] - úhel stoupání závitu.

Tab. 3.1. Utahovací momenty.

Utahovací moment pro spodní otvor (M6) M_1 [Nm]	7
Utahovací moment pro horní otvor (M10) M_2 [Nm]	22,5

Tab. 3.2 Hodnoty pro úhel stoupání závitu určeny pro závit M6 a M10 s hrubou roztečí [52]:

	Ψ_1 (M6)	Ψ_2 (M10)
Střední průměr závitu šroubu d_2 [mm]	5,350	9,026
Stoupání závitu šroubu P [mm]	1	1,5

$$\psi_1 = \tan\left(\frac{P}{\pi \times d_2}\right) = \tan\left(\frac{1}{\pi \times 5,350}\right) = 3^\circ 24' \quad (3.2)$$

$$\psi_2 = \tan\left(\frac{P}{\pi \times d_2}\right) = \tan\left(\frac{1,5}{\pi \times 9,026}\right) = 3^\circ 1' \quad (3.2)$$

Po úpravě rovnice 3.1 dostáváme:

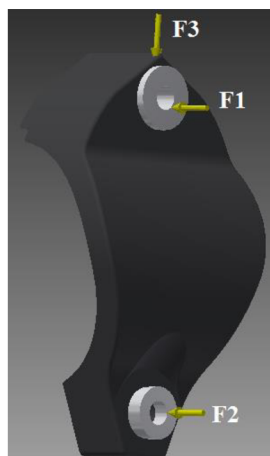
$$F_i = \left[\left(\frac{M}{\frac{d_2}{2 \times d} \frac{\tan(\psi) + f \times \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}{1 - f \times \tan(\psi) \times \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}} \right) + 0,625 \times f_o \right] \times d \quad (3.3)$$

Z rovnice 3.3 byla vypočtena osová síla potřebná k upevnění držáku. Použity byly utahovací momenty z tab. 3.1. Literatura [51] uvádí průměrné hodnoty součinitele tření nezávisle na velikostech šroubů $f = f_o = 0,15$. Normalizované údaje šroubů pro metrický závit byly použity ze strojnických tabulek [52]. Výsledky hodnot jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tab. 3.3 Výsledná osová síla šroubu.

Utahovací moment [Nm]	Osová síla šroubu [N]
7 – spodní šroub	5875
22,5 – vrchní šroub	24 276

Výsledná zatížení byla definována do simulace. Třetí síla směřuje kolmo na osu šroubu. Vzniká od zatížení osoby, která sedí na sedačce. Síla F3 byla kvůli bezpečnosti 3krát zvýšena na 3000 N (zatížení od 100 kg osoby). Mechanické údaje pro použité materiály v Inventoru byly dohledány na internetu [příloha 1, 35, 37, 46]. Podložce a šroubu byl přiřazena ocel 11 343. Definované síly jsou znázorněny na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Definované síly ve výpočtu.

3.5 Výsledky simulace

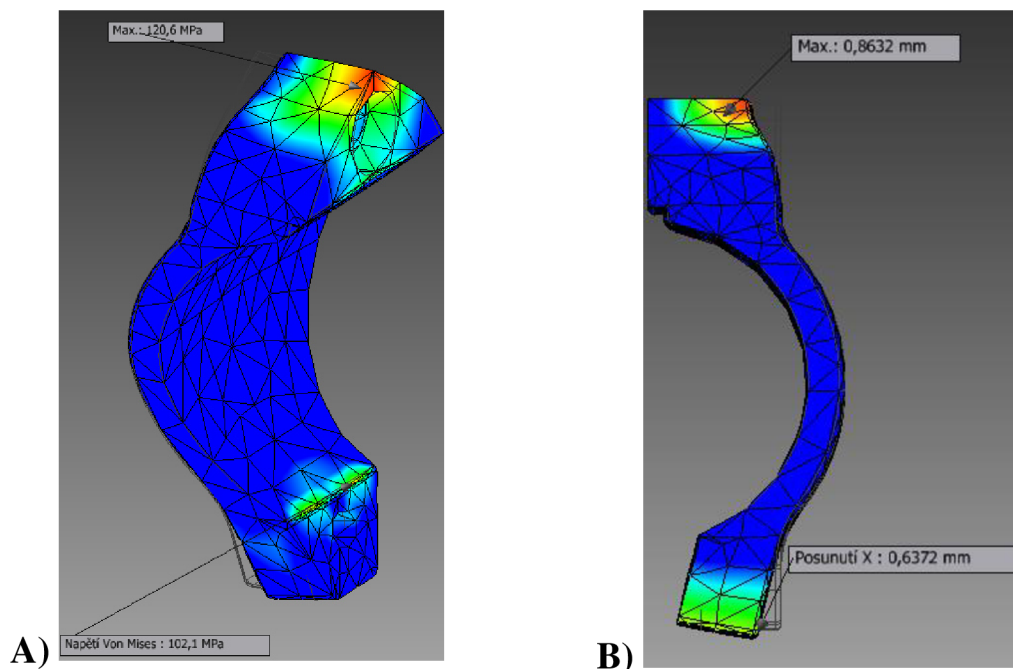
Po dokončení simulace byla přidána síť a vytvořen u vybraných materiálů protokol. Výsledné maximální posunutí v ose X a maximální napětí Von Mises jsou zpracována v tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Maximální posunutí a maximální napětí Von Mises.

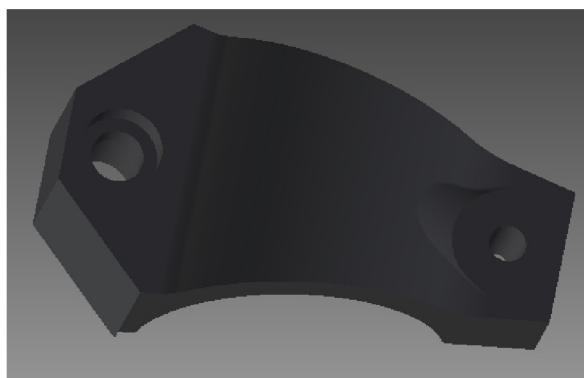
FDM materiál	Max. posunutí v ose X [mm]	Max. napětí Von Mises [MPa]
ABS	0,879	123
ASA	0,977	120,5
HIPS	1,195	121,2
NYLON 12	1,315	121,1
PC	0,863	120,6
PC-ABS	0,706	120,2
PETG	0,979	120,8
POM	0,858	122,7
PLA	0,597	126,3
PPSF	0,931	119,9
ULTEM 9085	0,888	121,2

Největší posunutí a napětí vzniká v horní části okolo otvoru pro šroub (viz obr. 3.6). Z výše uvedené tabulky je zřejmé, že žádný materiál nemůže odolat tak velkému napětí. Vybraný materiál PC odolal lépe napětí než ostatní uvažované materiály pro tisk (PLA, ABS, HIPS). Proto bylo nutné vytvořit druhou variantu, kdy se upravil tvar v požadovaných místech vysokého napětí. Hrana ve spodní části, která dosedá na trubku, byla zvětšena z důvodu

rozložení napětí na větší prostor. Také bylo třeba změnit horní tvar špičky na obdélníkovou plochu, protože na špičce součásti se koncentrovalo příliš velké napětí (viz obr. 3.7).



Obr. 3.6 Simulace provedená na materiálu PC. Max. napětí (obr. A) a posunutí (obr. B) vzniká na hrotu součásti.



Obr. 3.7 Varianta 2. Změna tvaru pro zmenšení napětí na součásti v kritických místech.

Simulace pro druhou variantu dopadla mnohem lépe. Provedena byla jen na PC materiálu. Max. napětí je téměř o 40 MPa menší a posunutí skoro poloviční. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Výsledky simulace varianty 2 pro PC.

FDM materiál	Max. posunutí v ose X [mm]	Max. napětí Von Mises [MPa]
PC	0,549	81,2

U této varianty je také ze simulace zřejmé, že materiál neodolá tak vysokému napětí a měl by se začít deformovat. Tyto výsledky však ještě budou otestovány v praxi.

4 VÝROBA PROTOTYPU

K zahájení výroby je zapotřebí vytvořit zdrojový kód. Existuje několik programů, které dokážou převést model do zdrojového kódu, jenž je vstupním programem na 3D tiskárně.

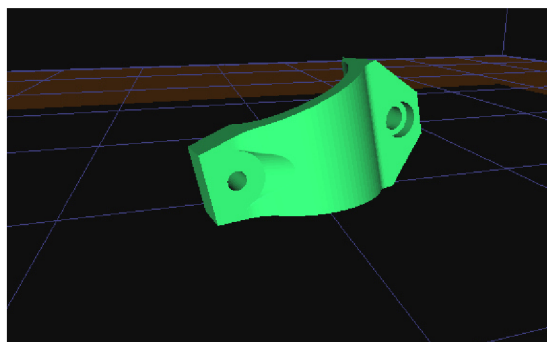
4.1 KISSlicer

Tento program je uživatelsky nenáročný s jednoduchým ovládním a je i ve free verzi. Již v základní verzi nabízí dostatečné nastavení různých parametrů tisku. Jedná se o nastavení stylu tisku, podpurného materiálu, teplot, parametrů tiskárny atd. Program byl zvolen z důvodu své bezplatné verze a dostačující míře nastavení. Navíc z jednoduchého zpracování dostáváme více než uspokojivé výsledky.

Po nahrání stl modelu do programu se součást zobrazí na virtuální ploše 3D tiskárny. Následně lze nastavit parametry tisku a tiskárny. Z uvedených parametrů program rozdělí model na jednotlivé vrstvy o nastavené tloušťce a v těchto vrstvách si vytvoří dráhy pro tiskovou hlavu.

4.2 Umístění a volba parametrů

Umístění modelu do prostoru tiskárny je z hlediska pevnosti vláken důležité. Bylo nutné skládat vrstvy kolmo na působící síly. Výhodou u tohoto umístění byla také nízká spotřeba podpurného materiálu, kde se využilo jen několik cm^3 pro otvory šroubů. Umístění je znázorněno na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Zvolená poloha při tisku.

Prvním zvoleným parametrem byla tloušťka vrstvy. Velikost vrstvy určuje o kolik se tisková hlava posune v ose Z nahoru. Obecně platí, že čím je tloušťka větší, tím je povrch drsnější a méně časově náročný. V opačném případě je obtížnější vyrobit danou vrstvu a může se ucpávat tryska. Proto je nutné zvolit optimální východisko mezi nejjednodušším výrobním procesem a výsledným vytisknutým modelem při splnění daných požadavků. Pro naši práci byl zvolen krok 0,25 mm.

Teploty extruderu byly voleny podle doporučených teplot výrobců materiálů nebo podle zkušeností pana vedoucího mé práce. Teplota podložky se u variant z PC a ABS pohybovala okolo 110 °C. U PLA je teplota nižší z důvodu menší odolnosti proti teplu. Tyto parametry jsou shrnuty v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Teploty extruderu pro různé typy materiálů [příloha 1].

Materiál tisku	Teplota extruderu [°C]	Teplota podložky [°C]
ABS	270	110
PLA	210	60
PC	280	110

Parametr druhu výplně závisí na funkčnosti součásti. Vlákna materiálu jsou nanášeny v úzkých nebo širokých vzdálenostech mezi sebou. To záleží na požadavcích zákazníka. Důležitost je z hlediska mechanických vlastností a potřeby nižších výrobních časů a nákladů. Z důvodu potřeby nejvyšších pevností byla zvolena plná výplň modelu.

Podpora je nutná tehdy, když tvarově složité kontury potřebují oporu při tisku. Jedná se o hrubou síť vláken sloužící pro oporu při tisknutí nepravidelných tvarů. Po dokončení tisku jsou podpory vylámané nebo rozpuštěny v roztocích.

4.3 Tisk součásti

Pro materiály PC, ABS, PLA byla zvolena potřebná nastavení a vytvořen zdrojový kód pro 3D tiskárnu. Následně už probíhá samotný tisk.

Časové porovnání tisku a spotřeba materiálu jsou shrnuty v tab. 4.2.

Materiál	Čas tisku	Celkový objem spotřebovaného materiálu [cm ³]
ABS	4 hodiny 41 minut	67
PLA	3 hodiny 22 minut	52
PC	3 hodiny 22 minut	54

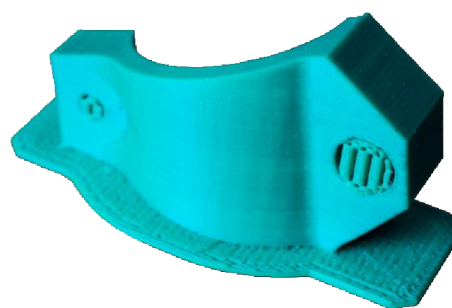
V tab. 4.2 si můžeme povšimnout rozdílný čas a vyšší spotřebu materiálu u ABS oproti ostatním druhům. Je to z důvodu vytváření podpor v otvorech pro šrouby a tvorbu raftu. Tento raft slouží jako základní deska, která drží větší silou na vyhřívané podložce. Síly vznikající při tisku mohou být např. ze smršťování materiálu.

Výsledné modely po tisku

ABS



Obr. 4.2 Pohled na vnitřní stranu z ABS.



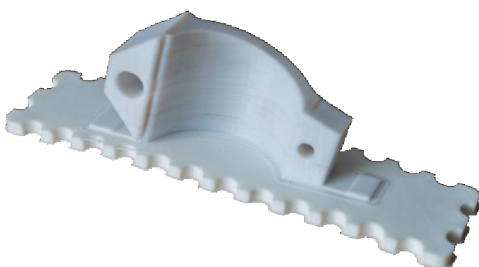
Obr. 4.3 Pohled na vnější stranu z ABS.

PLA

Obr. 4.4 Pohled na vnitřní stranu z PLA.



Obr. 4.5 Pohled na vnější stranu z PLA.

PC

Obr. 4.6 Pohled na vnitřní stranu z PC.



Obr. 4.7 Pohled na vnější stranu z PC.

4.4 Zhodnocení tisku

U PLA a ABS probíhal tisk bez jakýchkoliv problémů. PC se podle materiálových lisů jevil jako pevný a tvrdý, jenže zkušenost byla jiná. Vedoucí mé práce ještě nepracoval s tímto druhem materiálu a tak již od prvních pokusů dělal tento materiál problémy. Disponuje neuvěřitelnou smrštitivostí, což zapříčinilo vytrhávání součástí z podložek nebo deformace samotné součásti. Bylo nutné vytvořit tlustý raft, který byl svorkami přichycen k vyhřívané podložce, a na tento raft byla tisknuta součást. Povrch má však nejlepší ze všech testovaných variant, neboť se vrstvy dostatečně slévaly.

Post-processing

V závěrečné fázi se odstraňují podpory a dodělávají dokončovací práce. Podpory lze odstranit mechanicky a to odlamováním nebo rozpuštěním např. v acetonu. Mezi dokončovací operace může patřit broušení, leštění nebo nanášení různých barev z důvodů lepší vizualizace nebo ochrany povrchu před venkovním prostředím. V našem případě byly nejprve vylámané podpory a rafty a poté povrch obroušen smirkovým papírem s jemnou zrnitostí.

5 TESTOVÁNÍ PROTOTYPU V PRAXI

V této kapitole bylo zjištěno, jak se materiál vytisknutý na 3D tiskárně chová v praxi. Při namáhaném zatěžování úchytu sedla jsme došli k výsledkům, zda by bylo možné použití ve výrobě.

V první fázi byl otestován model z ABS. Postup testování spočíval v upevnění objímek na rám kola a připnutí sedačky k této objímce (viz. obr. 5.1, 5.2). V tuto chvíli byla prozkoumávána místa nejkritičtějších bodů, kde se koncentruje největší napětí. Z pohledů se zjistilo, že nedochází k žádným deformacím nebo trhlinám na součásti. Po úspěšné prohlídce bylo zahájeno testování při samotné jízdě. Jízdou po různých nerovnostech, prudkým zrychlováním nebo zpomalováním se ve finální prohlídce součásti projevila trhlina (viz. obr. 5.3). Tato trhlina se objevila na místech, které byly i v simulaci nejkritičtější.



Obr. 5.1 Upevnění objímky z ABS na rám kola.

Obr. 5.2 Upevnění sedačky do objímky z ABS.



Obr. 5.3 Trhlina vzniklá po zátěžovém testu u ABS plastu.

Další z testovaných byl polykarbonát. Tento materiál nevydržel ani přišroubování k rámu kola. Díky své vysoké křehkosti popraskal ve stejných místech jako ABS (viz. obr. 5.4). Tento druh polykarbonátu se naprosto nehodí do tohoto odvětví.



Obr. 5.4 Trhlina vedená celým objemem materiálu. PC při dotahování popraskal.

Nakonec byl otestován materiál PLA. Již od prvního dotyku se PLA jevil jako tvrdý a pevný. Obávanou vlastností je ale jeho křehkost. Bohužel jsem měl k dispozici jen jednu část objímky. Jako druhá byla použita originální objímka ze vstřikovaného PA plastu. Výsledky byli více než překvapující. Při mnohem vyšším a delším namáhání tento plast obstál a na jeho struktuře nezanechal žádné viditelné vady (viz. obr. 5.5). Otázkou však zůstává, jestli by při dlouhodobém zatěžování ve vlhkém prostředí nebo při vystavování prototypu UV-záření by mohl materiál ztrácet své mechanické vlastnosti.



Obr. 5.5 Součást z PLA plastu v době po zátěžovém testu.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Kapitola se zaměřuje na cenové zhodnocení a porovnání jejich výsledků. Materiál PC zakoupený pro potřeby tisku stál 1549 Kč/ kg. Ceny materiálů ABS a PLA jsou uvedeny v tab. 6.1 v „Cena za cm³“. Pro srovnání s konvenční technologií byl vypracován cenový návrh hliníkové součásti v jedné nejmenované strojírenské firmě, která se zabývá CNC obráběním. Cenový návrh počítá se sérii 10 ks. Ve vyšších sériích by samozřejmě cena klesala. Dále je uvedena cena originálního výrobku ze vstříkovaného plastu.

V tabulce 6.1 jsou uvedeny celkové výrobní náklady a časová náročnost uvedených variant.

Tab. 6.1 Celková výrobní cena úchytu sedla.

Zvolená Metoda	Použitý materiál	Hmotnost součásti [g]	Cena za cm ³ [Kč]	Doba výroby [hod]	Cena celkem za 1ks [Kč]
FDM	ABS	35	0,5	4,71	34
FDM	PLA	40	0,6	3,36	32
FDM	PC	40	1,5	3,36	78
Strojírenská firma	AlMgSi 0,5	134	-	1	457
Vstříkovací lis	PA66+GF30	50	-	-	20

Shrnutí uvedených výrobních nákladů

Z tab. 6.1 si lze povšimnout, že vstříkovaným plastům nelze konkurovat v cenovém i časovém srovnání. S dobou výroby vychází nejhůře metody FDM. Tisknutí velikého množství vrstev zabere tiskárně hodně času. Cena naopak je velmi uspokojivá ve srovnání s plastem PA. U varianty obrábění hliníku jsou nevýhodou vysoká cena a větší hmotnost, což je u výroby kol nežádoucí. Další nevýhodou je vysoká spotřeba materiálu v podobě třísek. Pevnosti plastu s 30 % skelných vláken dosahují podobných čísel jako u hliníku.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá výrobou úchytu sedla metodou FDM tisku.

V první řadě byla zpracována rešerše literatury zabývající se touto problematikou. Dále byl v modelovacím programu navrhnout prototyp. Následoval rozbor technologičnosti konstrukce a volba možných materiálů. Zvolené materiály prošly zátěžovými simulacemi, které zjistily možné chování při budoucích testech v praxi.

V praktické části je popsána výroba v samotné tiskárně a zhodnocení výsledků tisku. Dále pokračovalo testování v praxi a technickoekonomické zhodnocení s cenovým porovnáním různých metod.

Tato technologie RP nazývaná FDM je velmi prospěšná v odvětvích, kde je potřeba ověření smontovatelnosti nebo to jak vypadá reálný výrobek za nízkou cenu v praxi. Hodí se spíše do kusové výroby, jelikož čas výroby těchto součástí je velmi zdlouhavý. Metoda vstřikování plastů, kdy je potřeba vyrobit drahé vstřikovací formy, se využívá v sériové výrobě.

Shrnutí výsledků práce:

- vypracování rešerše literatury dané problematiky,
- zpracování technologičnosti a možnosti volby vhodných materiálů,
- navrhnutí 3D modelu s úpravami pro možný tisk,
- otestování materiálů v zátěžových simulacích,
- vytisknutí součástí na RepRap tiskárně (u PC nutné vytvoření raftu),
- výsledné materiály ABS a PLA byly vytisknuty bez problémů, opakem byl PC, kde docházelo k extrémnímu smrštění,
- vyhodnocení z hlediska nákladů a času vychází ve srovnání i s konvenční technologií nejlépe pro metodu vstřikování plastů.

Výsledným otestováním bylo zjištěno:

- použití PC v praxi nevyhovující při upevnění popraskalo,
- PLA odolalo namáhání při testech, bylo by nutné dále zjistit chování při dlouhodobých testech v extrémních prostředích a vyhodnotit situaci, zda by bylo možné používání v praxi,
- při testu u ABS se tvořili táhlé trhliny → ověření pouhé smontovatelnosti.

Při výrobě z PC je důležité tisknutí v uzavřené vyhřívané komoře s teplotou alespoň 90 °C, aby se dal daný výrobek vůbec používat. Neboť tento materiál disponuje extrémní smrštitivostí a při ochlazování má tendenci praskat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BENIAK, Juraj. Systémy Rapid Prototyping. 1.vyd. Bratislava: Nakladatelství STU 2014, 134 s. ISBN: 978-80-227-4287-0.
2. PRŮŠA, Josef, Michal Průša. Základy 3D tisku [online]. 1.vyd. Praha: Prusa Research s.r.o. 2014 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z:
<http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
3. PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
4. 3D tisk – aplikace. [online]. Květen 2013. [vid. 2016-04-04]. Dostupné z:
<http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-aplikace>
5. Technologie 3D tisku. *Http://www.pkmodel.cz* [online]. 2006 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dtisk.html>
6. 3D tisk – metody. [online]. Květen 2013. [vid. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
7. DLP 3D Printers. In: Makermasters [online]. © 2016 Makermasters [cit.2016-04-04]. Dostupné z:
<http://www.makermasters.com/wp-content/uploads/2013/08/Form-1-on-Desk.jpg>
8. SEDLÁK, Josef. Aditivní technologie-metody Rapid Prototyping [online]. 2010 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z:
http://kst2.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
9. HODEK, Josef. Aditivní technologie [online]. 2016. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/
10. Nákras: Princip 3D tisku pomocí technologie FDM. In: F1news [online]. ©F1NEWS.cz a Active Solutions s.r.o. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://autoroad.cz/pictures/article/2013/09/13/1379070934-hdd.png>
11. FDM Materiály [online]. *TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE s.r.o.* [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy>
12. Materiály pro 3D tisk [online]. Futur3d [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
13. Chain Model With Moving Parts. In: Stratasys [online]. Stratasys Ltd. © 2016. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://usglobalimages.stratasys.com/Image%20Gallery/absplus_mojo_moving_chain.jpg?v=635532101224320423
14. Prototype Castings - SLS (Selective Laser Sintering). In: KenWald [online]. © 1998-2015 KenWalt Die Casting Company [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.kenwalt.com/prototype_casting_SLS.gif

15. SLA 3D Printing Method. In: University of Leeds Careers Centre Blog [online]. LEEDSUNICAREERS [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://leedsunicareers.files.wordpress.com/2015/07/sla-3d-printing-method.png>
16. Layer thickness in 3D printing: an additive manufacturing basic [online]. Sculpteo. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>
17. ProJet® 7000 HD [online]. © 2015 3D Systems. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/3d-printers/professional/projet-7000-hd>
18. EOS P 396 [online]. EOS. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: http://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/eos_p_396
19. Dimension 1200es [online]. © 2013-2015 Stratasy. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/Machine_Spec_Sheets/PSS_FDM_Dim1200es.pdf?la=en
20. K 8200. In: Ges [online]. © 1991–2016 GES-ELECTRONICS, a.s. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://images.ges.cz/images/pictures/0/08105168a.jpg>
21. Replicator-cheap-3d-printer-design. In: Dornob [online]. Dornob. [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://assets.dornob.com/wp-content/uploads/2009/07/replicator-cheap-3d-printer-design1.jpg>
22. Posuvný držák sedačky. In: AZUB [online]. AZUB bike s.r.o. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.azub.eu/galerie/c_1413381997.jpg
23. AZUB T-Tris - skládací trikolka [online]. AZUB bike s.r.o. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.azub.cz/azub-t-tris-skladaci-trikolka/>
24. PA66+GF30 - polyamid modifikovaný sklenými vlákny [online]. © 2014 TechPlasty. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.techplasty.sk/material/polyamid/pa66gf30-polyamid-modifikovany-sklennymi-vlakny>
25. OSTATNÍ TECHNICKÉ PLASTY [online]. © 2013 Polyplasty a.s. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.polyplasty.cz/ostatni%C3%AD-technick%C3%A9-plasty/>
26. Normy tvrdosti hliníkových slitin [online]. ALUNET.cz © 2016. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/normy-tvrdosti-hlinikovych-slitin>
27. Inventor [online]. © 2015 1C Pro s.r.o. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.1cpro.cz/inventor.php>
28. Material Properties. Plasticsintl [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://www.plasticsintl.com/sortable_materials.php
29. Zemčik, Oskar. Sinuhed. In: repropwiki [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://reprop.org/wiki/Sinuhed#Parameters>
30. Polypropylene Copolymer. In: Makeitfrom [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polypropylene-PP-Copolymer/>
31. Materiály tisku [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://3dtisk1.webnode.cz/material-tisku/>

32. Tiskové materiály [online]. © 2016 4ISP spol. s.r.o. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/rubrika/tiskove-materialy/>
33. Polypropylene [online]. © Goodfellow 2008 - 2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/E/Polypropylene.html>
34. Sinuhed 2. In: rerap [online]. Reprapwiki [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://reprap.org/mediawiki/images/a/a9/Sinuhed-2.jpg>
35. Compare FDM Materials. Stratasys [online]. © 2013-2015 Stratasys [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/compare-fdm-materials>
36. Materiálový list [online]. © 1993-2003 LPM s.r.o. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.lpm.cz/index_datenblatt.html
37. FDM Material properties [online]. MATERIALISE, spol. s.r.o. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.materialise.cz/sites/default/files/public/AMS/datasheets_e_fdm.pdf
38. Materiálové a datové listy [online]. MATERIALISE, spol. s.r.o [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.materialise.cz/fdm-materialy-datove-listy>
39. Nový materiál ASA pro 3D tisk v osmi různých barvách [online]. MCAE Systems, s.r.o. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/stratasys/novy-material-asa-pro-3d-tisk-v-osmi-ruznych-barvach/>
40. TISKOVÁ STRUNA ASA ČERNÁ [online]. Svět 3D tisku. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.svet-3d-tisku.cz/asa/tiskova-struna-asa-cerna-fillamentum-asa-extrafill-1-75-mm-traffic-black-3d-filament/>
41. POM [online]. Svět 3D tisku. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.svet-3d-tisku.cz/pom/>
42. Filament MKF-PETG F1.75 červená [online]. MK FLORIA spol. s r.o. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://mk-eshop.cz/filamenty-tiskove-materialy/filament-mkf-petg-f175-cervena-tiskova-struna-petg-175-mm-1kg-pro-3d-tiskarnu.html>
43. PP [online]. Svět 3D tisku. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.svet-3d-tisku.cz/pp/>
44. Reprap. Wikipedia: the free encyclopedia. [online]. 2001- [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RepRap>
45. Polylactic Acid (PLA, Polylactide). In: Makeitfrom [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide/>
46. ULTEM™ Resin 1010R [online]. © 2016 Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <https://www.sabicip.com/gepapp/eng/weather/weatherhtml?sltUnit=SI&sltRegionList=1002002000&sltPrd=1002003018&sltGrd=1002011261&sltModule=DATASHEET S&sltType=Online&sltVersion=Internet&sltLDAP=0>

47. ZEMČÍK, Oskar. TECHNOLOGICKÉ PROCESY: část obrábění. Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno, 2007 [vid. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnProcesy.pdf>
48. Cena filamentu PC. Filament MKF-PC [online]. MK FLORIA spol. s r.o. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://mk-eshop.cz/filamenty-tiskove-materialy/filament-mkf-pc-polykarbonat-f175-natur-transparent-tiskova-struna-pc-175-mm-1kg-pro-3d-tiskarnu.html>
49. Ceny filamentů. TISKOVÉ STRUNY 1,75 MM]. Svět 3D tisku. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny-1-75-mm/>
50. ŽABA, T. Realizace edukační úlohy na experimentální stanici pro modelování předepjatých šroubových spojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Vaverka, Ph.D.
51. SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Konstruování strojních součástí. Vysoké učení technické v Brně : VUTIUM, 2010. 1186 s. ISBN: 978-80-214-2629-0
52. VÁVRA, Pavel - kol. Strojnické tabulky. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 670 s. ISBN 5492, 04-218-83. Kapitola Závity, s. 148 – 154.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný
3DP	Three-Dimensional Printing
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AM	Aditivní modelování
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	Computer Aided Drawing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
HIPS	High Impact Polystyrene
IPS	Ideal Position System
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi-Jet Modeling
MJS	Multiphase Jet Solidification
PA	Polyamid
PC	Polycarbonát
PETG	Polyetylén Tereftalát Glykol
PLA	Polylactic Acid
PLT	Paper Lamination Technology
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylene
PPSF	Polyphenyl Sulfone
PVA	Polyvinylalkohol
REPRAP	Replicating Rapid-Prototype
RP	Rapid Prototyping
SCS	Solid Creation System
SGC	Solid Ground Curing
SLA	Stereolitography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language

Symbol	Jednotka	Popis
F_i	[N]	osová síla šroubu
M	[Nm]	utahovací moment šroubu
P	[mm]	stoupání závitu šroubu
d	[mm]	velký průměr závitu šroubu
d_2	[mm]	střední průměr závitu šroubu
f	[-]	součinitel tření pod maticí
f_0	[-]	součinitel tření v závitu
α	[°]	vrcholový úhel závitu
ψ	[°]	úhel stoupání závitu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálové listy