



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

JEDNOSTUPŇOVÁ PŘEVODOVKA VYROBENÁ 3D TISKEM

A SINGLE-SPEED GEARBOX MADE BY 3D PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Denis Hykolli

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Denis Hykolli
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

Jednostupňová převodovka vyrobená 3D tiskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro výukové účely či školicí střediska je možno použít převodovky s nenáročnými parametry. V průmyslovém využití jdou parametry mnohem výše. Tyto skutečnosti rozebírá zadané téma.

Cíle diplomové práce:

- Charakteristika 3D tisku zaměřená na ozubená kola
- SW konstrukce ozubeného soukolí
- SW konstrukce převodové skříně
- Příprava procesu 3D tisku
- Kontrola a simulace procesu
- Výroba vzorku
- Finální úpravy na vzorku
- Zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

FREIBAUER, Martin, Hana VLÁČILOVÁ a Milena VILÍMKOVÁ. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2010. 326 s. ISBN 978-80-251-2504-5.

FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 1996. 262 s. ISBN 80-85867-95-8.

GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. P. 459. ISBN 14-419-1120-0.

IMAI, Masaaki. Kaizen. 1. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2004. 272 s. ISBN 80-251-0461-3.

KARPIŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

MICHNA, Štefan et al. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

SUCHÝ, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je výroba výukového modelu jednostupňové převodovky pomocí aditivní výrobní metody FDM/FFF. Za tímto cílem je nutné vypočítat rozměry kol na základě zvolených hodnot. Počítačový 3D model byl vytvořen pomocí počítačového softwaru Autodesk Inventor. Výroba součástí proběhla pomocí FDM tiskárny od společnosti Prusa. Výrobní programy byly vytvořeny pomocí počítačových 3D modelů. Ty byly převedeny do cílového formátu v slicer softwaru od společnosti Prusa Research a následně vyrobeny na 3D tiskárně. Transparentního vzhledu horní části převodové skříně bylo dosaženo na základě zkušeností získaných sérií testů. V práci je vypočítán celkový náklad na výrobu modelu. Výsledkem práce je plně funkční, elektricky poháněný model převodovky s horní transparentní převodovou skříní.

Klíčová slova

3D tisk, převodovka, rapid prototyping, transparentní materiál, ASA, PETG

ABSTRACT

The aim of these theses was the creation of a single-stage gearbox by additive technology FDM / FFF. By chosen values was made dimension calculation for gears. The 3D model of the gearbox was designed in 3D software Autodesk Inventor. Single parts were produced on an FDM 3D printer by Prusa Research. Manufacturing programs for parts were prepared in PrusaSlicer. These programs were used for producing individuals parts on 3D Printer. Transparent material and printing parameters for the top of the gearbox were chosen by visual test and test of light intensity. The total cost of model production is calculated in the work. The result of these is a completely working model of a single-stage gearbox with a transparent top of the gearbox.

Key words

3D printer, gearbox, rapid prototyping, transparent materiál, ASA, PETG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HYKOLLI, Denis. Jednostupňová převodovka vyrobená 3D tiskem. Brno 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 79 s. Zdeněk Fiala.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Jednostupňová převodovka vyrobená 3D tiskem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Denis Hykolli

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Zdeňkovi Fialovi, Ph.D za odborné rady a vedení této diplomové práce.
Také bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	10
1.1 PŘEVODY OZUBENÝMI KOLY	10
1.1.1. Dělení ozubených soukolí:	11
1.1.2. Rozdělení ozubených mechanismů:	11
1.2. VÝROBA OZUBENÝCH KOL	12
1.2.1. Frézování dělicím způsobem	12
1.2.2. Frézování odvalovacím způsobem	12
1.2.3. Obrázení čelních ozubených kol s evolventním ozubením	13
2 PŘEHLED METOD 3D TISKU	14
2.1. ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	14
2.1.1. SLA	14
2.1.2. SLM	14
2.1.3. SLS	15
2.1.4. MJM	15
2.1.5. LOM	15
2.2. FFD/FFF	15
2.2.2. FFD/FDM tiskárna s kartézským systémem	16
2.2.2.1. Rozbor částí FDM tiskárny s kartézským systémem	17
2.2.3. 3D tiskárna typu delta	20
2.2.4. Tisk pomocí robotického ramene	21
2.2.5. Polární kinematika	21
2.3. MATERIÁL VYUŽÍVANÝ PŘI METODĚ FDM/FFF	21
2.3.1. PLA	22
2.3.2. ABS	22
2.3.3. ASA	22
2.3.4. Nylon	22
2.3.5. PET	23
2.4. DŮLEŽITÉ PARAMETRY PRO NASTAVENÍ TISKU	24
2.4.1. Výška tiskové vrstvy	24
2.4.2. Hustota výplně a shells	24
2.4.3. Tisková rychlost	25
2.4.4. Teplota	26
2.4.5. Přesuny a mosty	26
2.5. POST-PROCESSING	26
2.5.1. Čištění a příprava	26
2.5.2. Finišování	28
2.6. TRANSPARENTNÍ 3D TISK	30
2.6.1. Metody tisku transparentních modelů	30
2.6.2. Materiály pro transparentní 3D tisk – FFF/FDM	30
2.6.3. Materiály pro transparentní 3D tisk – SLA	31
2.6.4. Finišování	31
2.7. INTENZITA SVĚTLA	32
2.7.1. Typy snímačů	32
2.7.2. Senzor intenzity světla – BH1750	33
3. PRAKTICKÁ ČÁST	34
3.1. PROCES TVORBY PRODUKTU	34
3.2. VÝPOČET OZUBENÝCH KOL	34
3.2.1. Vstupní hodnoty	35
3.2.2. Výpočet převodového poměru	35
3.2.3. Výpočet počtu zubů	35
3.2.4. Výpočet modulu	35
3.2.5. Výpočet rozměrů ozubených kol	36

3.2.6.	Výpočet osové vzdálenosti a šířky ozubení	38
3.2.7.	Šířka ozubení	38
3.3.	VOLBA TRANSPARENTNÍHO MATERIÁLU	38
3.3.1.	Měřicí zařízení.....	38
3.3.2.	Postup měření měřicím zařízením.....	40
3.3.3.	Vizuální vyhodnocení	41
3.3.4.	Vzorky.....	41
3.3.5.	Hustota výplně	42
3.3.6.	Výška vrstvy.....	43
3.3.7.	Vybrané porovnávané materiály	43
3.3.8.	Rychlost tisku	44
3.3.9.	Vyhodnocení testu.....	44
3.4.	VÝROBA MODELU	51
3.4.1.	Tiskárna Prusa.....	51
3.4.2.	Příprava programů pro 3D tisk /slicer.....	51
3.4.3.	Příprava tiskárny před tiskem	52
3.4.4.	Tisk modelu	53
3.4.6.	Ekonomické zhodnocení.....	64
4.	DISKUSE.....	69
4.1.	PEVNOSTNÍ PARAMETRY.....	69
4.2.	CHYBY VZNIKLE PŘI VÝROBĚ	70
4.3.	TRANSPARENTNÍ TISK	70
4.4.	VÝROBNÍ CENA.....	71
4.5.	VYROBENÝ MODEL	71
	ZÁVĚR.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78

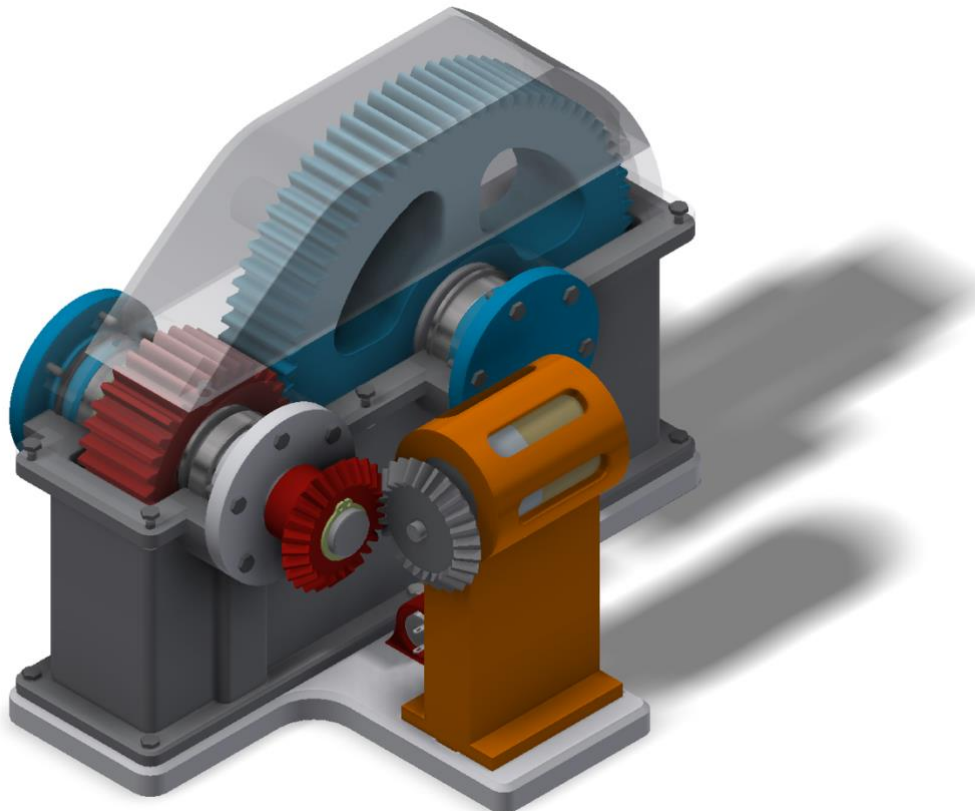
ÚVOD

Práce se zabývá konstrukčním návrhem jednostupňové převodovky, který bude sloužit k ukázkovým účelům pro demonstraci funkce převodové skříně. Pro výrobu byla vybrána aditivní technologie Rapid Prototyping, která je v posledních letech velmi oblíbená. Přínosem této metody by měla být možnost výroby modelu přímo ve školících zařízeních nebo školách, jelikož tyto zařízení často disponují některým z typů 3D tiskárny.

V práci jsou popsány konvenční metody, které se běžně používají pro výrobu většiny ozubených kol. Pro obeznámení s aditivní metodou jsou v práci detailněji rozebrány materiály, technologie a důležité parametry.

Samotná praktická část se zabývá volbou transparentní výroby horní části převodové skříně. Pro výběr byly vymyšlené testy, které hodnotí vizuální vzhled vzorku a jeho schopnost propouštět světlo. Na základě výsledků byl následně vybrán vhodný vzorek. Ze zvolených hodnot byly vypočítány konstrukční rozměry ozubených kol. Podle vypočítaných hodnot byl vytvořen model převodovky v programu Autodesk Inventor. Dále je v práci popsán samotný tisk od tvorby modelu a nastavení parametrů až po popis tisku jednotlivých součástí. V závěru práce je vypočítána výrobní cena ukázkového modelu.

V diskusi bylo provedeno vyhodnocení poznatků získaných při tvorbě převodovky. V podkapitolách jsou rozebrány pevnostní vlastnosti a hrozby, chyby, které vznikly při tisku, výběr transparentního materiálu, cenové zhodnocení práce a finální vyhodnocení modelu.



Obrázek 1 Model jednostupňové převodovky

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

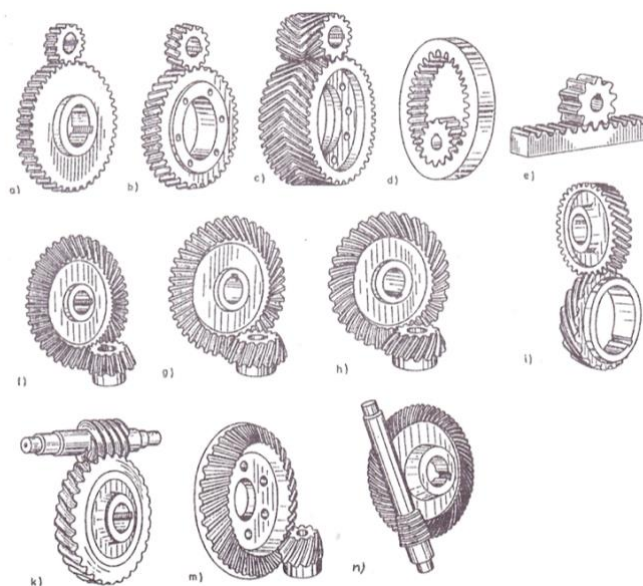
Ozubená kola se liší v několika parametrech jako například tvar, využití nebo způsob výroby.

1.1 Převody ozubenými koly

Převodové mechanismy jsou tvořeny několika různými druhy, avšak nejvyužívanější je převod s ozubenými koly. Jejich přenos sil je založený na využití tlaku (tzv. zazubení), kde dochází k dotyku dvou zabírajících členů. Nejjednodušším konstrukčním provedením jsou dvě spolu zabíhající ozubená kola. Jeden člen je hnací (pastorek) a druhý hnaný. [1]

„Úkolem této dvojice je vytvoření kinematické a silové vazby mezi relativně blízkými hřídeli při požadované transformaci, úhlové rychlosti a točivého momentu a při co nejvyšší mechanické účinnosti.“ (Švec, 1999, s.5)

Definice převodového poměru (i) je definován jako změna otáčivého pohybu mezi dvěma hřídeli. Hodnota převodového poměru určuje, zda se jedná o převod dopomala ($i > 1$, redukce), nebo dorychla ($i < 1$). [1]



Obrázek 2 Ukázka různých druhů ozubení

Převodový poměr musí být konstantní na obou kolech. Tolerované výrobní úchytky od teoreticky přesné vzdálenosti od hřídelů nesmí být ovlivněny převodovým poměrem. Výroba i kontrola přesnosti ozubených kol by měla být co nejrychlejší, nejjednodušší a nejlevnější. Ozubená kola by měla být vyrobena a zkonstruována tak, aby nedocházelo k velkým ztrátám vlivem tření. [2]

Při volbě profilu boku zubu se musí brát v potaz výše zmíněné požadavky. Evolventní tvar boku zubu je dnes nejvyužívanější. Ve výjimečných případech se mohou využít cykloidní nebo kruhové boky zubů. [2]

Konstantního převodového poměru lze nejjednodušší dosáhnout evolventním a cykloidním tvarem boku zubu. Přesné vzdálenosti od os hřídelů nejlépe vyhovují evolventní zuby. Nejmenší ztráty a opotřebení lze dosáhnout cykloidním tvarem boku zubu. [2]

1.1.1. Dělení ozubených soukolí: [1]

Dle vzájemné polohy os:

- rovnoběžné osy (Čelní (válcová) soukolí),
- různoběžné osy (soukolí valivá kuželová se zuby přímými, šikmými a zakřivenými.),
- mimoběžné osy (soukolí šroubová, šneková, šroubová kuželová (hypoidní) a spiroidní).

Dle vzájemné polohy spolu zabírajících kol:

- soukolí s vnějším záběrem,
- soukolí s vnitřním záběrem.

Dle velikosti obvodové rychlosti (v):

- pomaloběžná ($v \leq 3 \text{ ms}^{-2}$),
- o středních rychlostech ($3 < v < 15 \text{ ms}^{-2}$),
- rychloběžná ($v > 15 \text{ ms}^{-2}$).

Dle velikosti převodového poměru:

- dopomala ($i > 1$),
- dorychla ($i < 1$).

Jednotlivé převody ozubeného mechanismu se řadí:

- paralelně,
- sériově.

1.1.2. Rozdělení ozubených mechanismů: [1]

Dle počtu převodových stupňů:

- jednostupňové,
- dvou a více stupňové.

Dle pohybu os v prostoru:

- klasické (poloha os ozubených kol se nemění vůči rámu),
- planetové (některé osy v soukolí mohou konat pohyb krouživý).

Dle využitého typu konstrukce:

- nezakryté,
- uzavřené,
- vestavěné do pracovního zařízení/motoru,
- volné.

Dle použití:

- kinematické (zanedbání točivého momentu),
- silové (přenášení význačných točivých momentů).

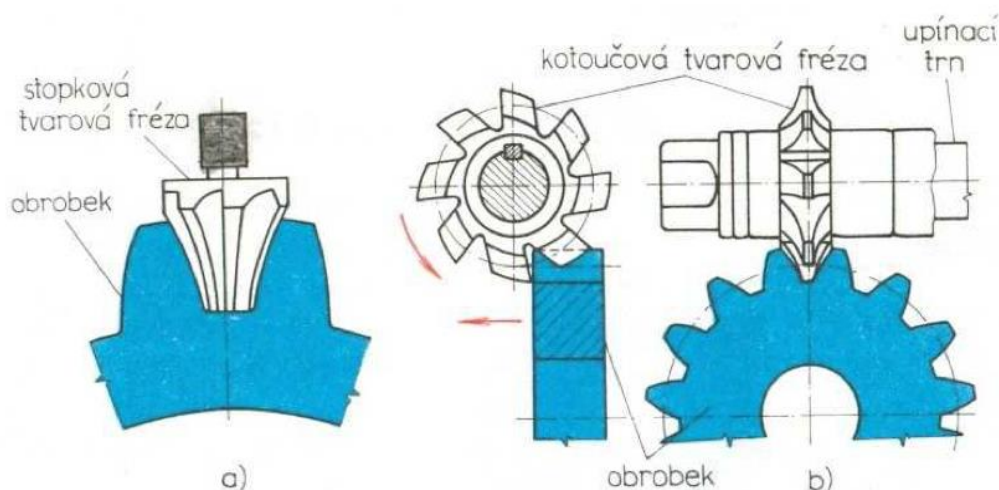
1.2. Výroba ozubených kol

1.2.1. Frézování dělicím způsobem

Nástroj využívaný při výrobě dělicím způsobem má tvar zubové mezery. Potom co nástroj dokončí jednu zubovou mezeru se obrobek otočí pomocí dělicího přístroje o jednu rozteč. Pro výrobu čelního ozubeného kola se využívá čepová fréza, nebo kotoučová modulová fréza. Jeden nástroj je navržený pro určitý rozsah počtu zubů. Na základě přesnosti, která je požadovaná, mívají frézy pro jeden modul 8 až 26 fréz. [1,2,3,49]

Strojem používaným pro frézování dělicím způsobem je konzolová univerzální frézka, vybavená dělicím přístrojem, ne frézka pro tvarové frézování zubů. [1,2,3,49]

Metoda frézování dělicím způsobem umožňuje obrábění kol velkých průměrů (až 12 000 mm), nebo s velkým modulem (až 80 mm). Při využití speciálních strojů s vodorovnou osou vřetena, může být frézování dělicím způsobem využito pro výrobu kol se šípovým ozubením. [1,2,3,49]



Obrázek 3 Výroba ozubení dělicím způsobem

1.2.2. Frézování odvalovacím způsobem

Metoda je založená na obrábění mnohobřítým nástrojem, který koná odvalovací pohyb. Nástroj se vyrábí ve více konstrukčních provedeních, které jsou děleny na základě výroby nástroje na jednochodé nebo vícechodé. Tato metoda během posledních let nahrazuje metodu frézování dělicím způsobem. Možnost frézování jednou frézou kola o libovolném počtu zubů. [1,2,3,49]

V metodě frézování vnějšího ozubení odvalovacím způsobem se využívá hřebenový nůž (Maagový hřeben), zubové kolečko (Fellow) nebo šneková modulová fréza. Pro výrobu vnitřního ozubení lze vyrábět zubovým kolečkem. [1,2,3,49]

Tato metoda je vhodná pro výrobu ozubených kol s modulem 0,1 až 75 mm. Metoda se využívá k výrobě kol s průměrem 1,5 až 2000 mm, ve zvláštních případech lze vyrábět ozubená kola s průměrem až 10000 mm. [1,2,3,49]

1.2.3. Obražení čelních ozubených kol s evolventním ozubením

1.2.3.1. Kotoučový obrážecí nůž

Pro výrobu ozubených kol je vyrábění kotoučovým obrážecím nožem nebo hřebenovým orážecím nožem. Nástroj metody kotoučovým nožem má stejný modul jako kolo, které vyrábíme. Nástroj koná přímočarý vratný pracovní pohyb. Tvar boku zubu se vytváří jako obálka evolventních poloh boku zubů obrážecího nástroje. Pomocí kotoučového obrážecího nože lze vyrábět ozubená kola s přímým, šikmým nebo šípovým ozubením. Tato metoda je vhodná o pro výrobu ozubených kol s vnitřním ozubením. [1,2,3,49]

Tato metoda je vhodná pro výrobu ozubených kol modulu 2 až 10 mm. Využívá se k výrobě kol s průměrem 200 až 500 mm. [1,2,3,49]

Výroba ozubených kol metodou obražení je vysoce produktivní při využití rychloběžných obrážecích strojů. Lze dosáhnout přesnosti ve třídě 5 až 6, $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. [1,2,3]

1.2.3.2. Hřebenový nůž

Metoda je založena na odvalu nástroje po zubech obrobku. Nástroj mývá 8 až 10 zubů, který má stejný modul jako vyráběné kolo. Nástroj koná pohyb přímočarý vratný společně s obrobkem, který se otáčí a posouvá se k nástroji. Z důvodu omezené délky nástroje je výrobní cyklus přerušovaný. Před zahájením pracovního cyklu se nástroj postaví na pozici proti obrobku na výšku zubu. Následně začíná pracovní proces. Obrobek se otáčí v okamžiku, kdy se nástroj nachází v horní poloze, a to o hodnotu kruhového posuvu. Ve stejný okamžik se obrobek posune v podélném směru. [1,2,3,49]

Obražením hřebenovým nožem se mohou vyrábět ozubená kola s přímým, šikmým a šípovým ozubením. [1,2,3,49]

2 PŘEHLED METOD 3D TISKU

2.1. Aditivní technologie

Existuje několik druhů aditivních technologií, které se odlišují použitým materiálem, procesem a využitím

2.1.1. SLA

Stereolitografický (SLA) 3D tisk je metoda, založena na principu vytvrzování tekuté pryskyřice pomocí světelného paprsku (např. laser). Jedná se o technologii 3D tisku s nejlepší kvalitou povrchu a nejlepším provedením detailů. SLA metoda využívá několik různých provedení pryskyřice (standartní, zubařská atd.).

Jedná se o první vyvinutou metodu 3D tisku na světě.

Díky vysoké kvalitě povrchu je často SLA využíváno k výrobě prototypů. [4,5,48]

Výrobci:

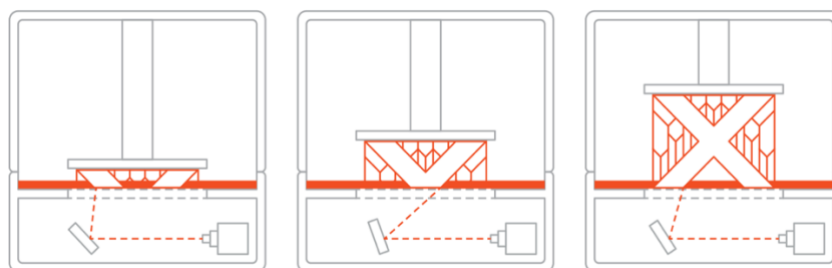
- Prusa Research,
- Formlabs.

Výhody [4,5]:

- Nízká cena.

Nevýhody [4,5]:

- malá tisková plocha,
- malé množství tiskových materiálů,
- složitější post-processing z důvodu nutnosti velkého množství podpěr.



Obrázek 4 Technologie SLA

2.1.2. SLM

Selective laser melting (SLM) je metoda 3D tisku kovových součástí. SLM funguje na principu tavení vrstev kovového prášku po vrstvách. Tiskárny tohoto typu jsou velmi drahé a využívají se v průmyslu. Jejich aplikace je dnes možná v dentálním průmyslu, automobilu a klenotnictví. [6,7, 48]:

Výhody [6,7]:

- široká škála dostupných materiálů,
- možnost výroby složitých tvarů.

Nevýhody [6,7]:

- vysoká cena,
- možnost tisku malých součástí,
- složitější post-processing,

- velká drsnost konečného povrchu.

2.1.3. SLS

Selective laser sintering je metoda 3D tisku, která je velmi podobná metodám SLA a SLM. Podobně jako SLM využívá tavení práškového materiálu pomocí laseru (například kov, plast, keramika). Mezi přednosti metody nepochybně patří tisk bez podpěr z důvodu neustálého obklopení výtisku zbytkovým práškem. [8, 48]

Výhody [8]:

- široká škála dostupných materiálů,
- možnost výroby složitých tvarů.

Nevýhody [8]:

- velká drsnost konečného povrchu.

2.1.4. MJM

Multijet printig – je vysoce kvalitní 3D tisk, který využívá UV světla k vytvrzování fotopolymery. Při procesu tisku dochází k vstřiku drobných kapiček fotopolymery na tiskovou desku. UV lampa umístěná u trysky vytvrzuje nanesené vrstvy fotopolymery. Po dokončení jedné vrstvy se tisková podložka posune o úroveň níž. Tento proces se opakuje, dokud se nevytiskne celý díl. Oproti SL (laser sintering) metodám má výtisk z metody MJM nižší množství porozity a hladší povrch. Díky tomu je doba výroby zkrácena oproti SL metodám o čas potřebný k dokončovacím operacím. [9, 48]

2.1.5. LOM

Laminated Object Manufacturing – metoda založená na vyřezávání jednotlivých vrstev laserem či nožem, které jsou následně spékány nebo lepeny. Výhodou je univerzálnost použití materiálů. Nejčastěji se používá papírů, plastů nebo kovových plechů. LOM se díky své rychlosti a nízké ceně využívá pro výrobu prototypů ale i finálních součástí. [10, 48]

2.2. FFD/FFF

Je metoda výroby součástí aditivním nanášením jednotlivých vrstev materiálu. K tavení materiálu dochází většinou těsně za hranicí tání tištěného materiálu. Po natavení materiálu z tiskové hlavy přenáší na tiskovou strunu podložku a zde tvoří obrys výtisku. [11,12,13,48]

Tisk probíhá protlačováním filamentu přes hotend (horkou trysku). Těsně po nanesení materiálu na podložku materiál vlivem ochlazení ztuhne. Po dokončení jedné vrstvy obrysu a výplně se tisková hlava posouvá o úroveň výš, kde nanáší další požadovaný tvar a jeho výplň. Tímto postupným nanášením jednotlivých vrstev dojde k postupnému vytvoření požadované součásti. [11,12,13,48]

FDM (fused deposit modeling) se v roce 1991 ochranou známkou společnosti Stratasys. Proto se pro tuto metodu využívá také název FFF (fused filament fabrication). [11,12,13]

FDM / FFF je v dnešní době považován za nejsnadnější způsob výroby součástí metodou 3D tisku. Jeho velice dobrá efektivnost a nízká cena jsou příčinou jeho

velké rozšíření, a to jak v průmyslových školách, ale také mezi amatérskými nadšenci nebo ve školství. [11,12,13]

Výhody:

Předností této metody je možnost jejího zhotovení v různých škálách. To znamená, že se dá vyrobit v několika různých velikostech, při zachování primárního principu metody. Velikost tiskárny je omezena pouze velikostí použité portálové kolejnice. Toto škálování naráží pouze na problém, že od jisté velikosti již nemusí být výhody této metody tak dominantní než u jiných metod a poměr výhod k velikosti už není vyvážený. I přes to se jedná o metodu s největším množstvím velikostí při nízkém výskytu problémů. Díky škálovatelnosti designu lze dosáhnout výborného poměru nákladů k ceně. Jiné typy tiskáren o stejné velikosti jsou mnohonásobně dražší. Je to zapříčiněné tím, že je stále velice obtížné vyrobit tiskárnu ve větším měřítku a komponenty těchto tiskáren jsou velice drahé. [11,12,13]

Nevýhody:

Jednou z nejběžnějších nevýhod FFF/ FDM tiskárny je dosahování nižší kvality vytištěné součásti. Je velice složité dosáhnout vyšší kvality výtisku z důvodu definované tloušťky vrstvy průměrem trysky. Z tohoto důvodu je pro dosažení konečného modelu zapotřebí složitých a časově náročných povrchových úprav. [11,12,13]

2.2.2. FFD/FDM tiskárna s kartézským systémem

Nejpoužívanější typ 3D tiskárny, který využívá pohybu 3 os (X, Y, Z). Své uplatnění díky své jednoduché konstrukci a nízké pořizovací ceně našla na poli amatérského tisku. Ve směru osy X a Y se ve většině provedeních pohybuje tisková hlava, v ose Z se pohybuje tisková deska. Pohyb os se může lišit podle výrobce. [11,12,13,14]

Výrobci:

- Prusa Research,
- Anycubic,
- MakerBot.

Výhody [11,12,13]:

- nízká cena,
- snadná sestavitelnost.

Nevýhody [11,12,13]:

- vyšší váha,
- nízká rychlost,
- limitovaná výška výtisku.



Obrázek 5 FDM tiskárna Prusa MK3S+ [29]



Obrázek 6 3D tiskárna MakerBot Replicator [30]

2.2.2.1. Rozbor částí FDM tiskárny s kartézským systémem

Rám

Rám složí pro uchycení všech komponent 3D tiskárny. Nejčastěji se využívají rámy „Reprap“ a „BoxBots“. Využívaným materiálem pro výrobu rámu tiskáren jsou ocelové plechy, hliníkové profily, dřevo nebo plast. Některé části 3D tiskáren, především u „RepRap“, jsou tištěny na jiných tiskárnách. Pevnost Rámu určuje celkovou přesnost tiskárny. [15]

Tisková podložka

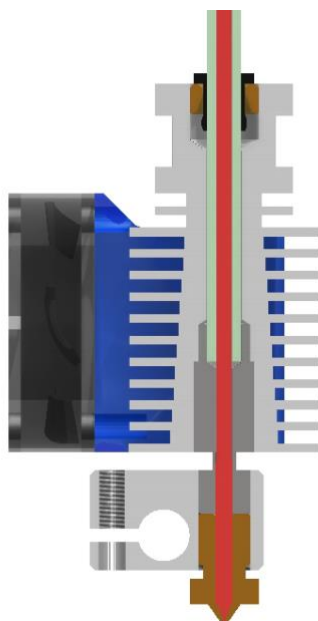
Je to jedna z hlavních částí 3D tiskárny, a proto je na její provedení kladen velký důraz. Na tiskovou podložku nanáší tisková hlava roztavený filament. Aby se předcházelo zvedání výtisku z podložky bývá většina tiskáren vybavena podložkou vyhřívanou. Při tisku dochází k rychlému ochlazování výtisku, a tím k mírnému zmenšení výrobku. Vyhřívaná podložka udržuje spodní část výrobku teplou a předchází tak zvednutí hrany. Povrch podložky se vyrábí z různých materiálů v závislosti na tisknutém materiálu. Povrch by měl mít takové vlastnosti, aby umožnil bezproblémové přichycení výrobku na podložku, ale i snadné odstranění z ní. Kalibrace tiskové podložky se provádí ručně nebo automaticky. [15]



Obrázek 7 Tisková podložka [31]

Extruder

Extruder je hlavní komponenta 3D tiskárny. Tato komponenta se skládá ze dvou základních částí „cool end“ a „hot end“. Coolend se nachází na vstupu extruderového systému. Jeho hlavním úkolem je vedení a přivádění materiál do hot endu. Coolend se skládá z motoru extruderů a převodů. Nachází se na rámu tiskárny, nebo přímo na tiskové hlavě. [15]



Obrázek 8 Extruder [32]

Přímý pohon vs Bowden

Přímý pohon – Cold end a Hot end jsou spojeny v jednu sestavu. Filament prochází skrze cold end přímo do Hotend. [15]

Bowden – Tiskárny v provedení Bowden mají cold end a hotend oddělený. Cold end bývá zpravidla připevněný na rámu tiskárny. Díky tomu má pohybující se tisková část nižší hmotnost. Filament se posouvá z coldend do hotend v teflonové hadičce. [15]

Podávací kolečka – tlačí filament do hotend. [15]

Hotend chladič/ventilátor – zajišťuje, aby nedošlo k předčasnému roztavení materiálu, než se dostane k trysce. To by mohlo zapříčinit ucpání extruderu. Tento problém se nejčastěji týká materiálu PLA, a proto by mělo být chlazení aktivní kdykoliv je hotend horký. [15]

Topné těleso – ohřívá plast, jedná se o vysoce výkonný rezistor. [15]

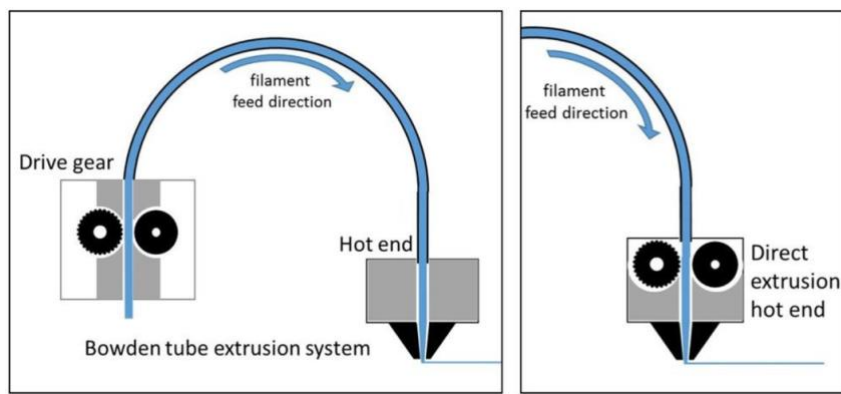
Termistor – jedná se o senzor teploty hotend. [15]

Tryska – poslední část extruderu, kde dochází k vytékání materiálu na tiskovou podložku. Vyrábí se hned na v několika průměrech (např. 0,25; 0,4; 0,6mm; atd). Čím menší je průměr trysky tím detailnější, ale i pomalejší je tisk. Nejčastěji se využívá tryska o průměru 0,4mm. Při volbě tiskových podmínek při různých průměrech trysky platí pravidlo, že by výška tištěné vrstvy neměla přesahovat 80 % průměru trysky. [15]



Obrázek 9 Tiskové trysky [33]

Ventilátor tištěné vrstvy – Chladí tisknutý materiál po nanesení na tiskovou podložku. Ventilátor pomáhá výtisku udržet tvar. Tento ventilátor se spouští a vypíná za různých okolností v závislosti na druhu tisknutého materiálu. [15]



Obrázek 10 Přímý pohon vs Bowden [32]

Endstop spínač – předává tiskárně informace o tom, kde se tisková hlava nachází. Pomocí spínačů se určuje výchozí bod na začátku tisku. 3D tiskárny využívají mechanické nebo optické spínače. [15]

Závitové tyče/ vodící šrouby – používají se k pohybu tiskové hlavy obvykle ve směru osy Z. Pomocí otáčivého pohybu se pohybuje ve směru nahoru a dolů. Tiskárny patřící do nižší cenové kategorie používají tyče ocelové závitové tyče. Z důvodu minimalizování vůle se využívají závitové tyče pochromované (především u dražších tiskáren). [15]

Řemen – pomocí řemenice umístěné na motorech zajišťují pohyb v osách X a Y. [15]

Krokové motory – se používají namísto stejnosměrných motorů z důvodu přesné kontroly díky krokovému pohybu. 3D tiskárny obvykle používají krokové motory Nema 17 s 200 kroky na otáčku. [15]

Kryt – z důvodu bezpečnosti jsou některé tiskárny tohoto typu zakrytované. Díky tomu se předchází riziku popálení. Kryt má také dobrý vliv na tiskové vlastnosti. Pomáhá udržovat konstantní teplotu tiskového prostoru. [15]

Elektronické komponenty: [15]

- zdroj energie,
- základní deska – jedná se o mozek tiskárny. Řídí veškerý proces tisku na základě vygenerovaného G-code.

2.2.3. 3D tiskárna typu delta

Tiskárna typu delta využívá také kartézský souřadný systém. Rozdíl mezi deltou a „kartézskou“ 3D tiskárnou je ve způsobu zajištění pohybu v osách X, Y, Z. Zde je pohyb zajištěn třemi rameny, která jsou připojena k vertikálním pojezdům. Tisková hlava se pohybuje ve všech třech osách pomocí vzájemného pohybu všech tří ramen. Tisková podložka je nehybná. Díky nehybné tiskové podložce lze dosáhnout lepších výsledků při tisku vyšších součástí. [12,13,16]

Výrobci:

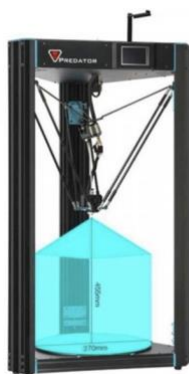
- TriLAB,
- Anycubic.

Výhody [12,13,16]:

- vysoká rychlost tisku,
- vysoká kvalita vytisknuté součásti,
- možnost tisku vysokých modelů.

Nevýhody [12,13,16]:

- složité opravy a upgrady,
- vysoká cena.



Obrázek 11 Tiskárna typu delta Anycubic Predator [34]

2.2.4. Tisk pomocí robotického ramene

Metoda 3D tisku ve stádiu vývoje. Potenciál metody je v oblasti architektury a tisku budov. Výhodou je mobilita metody, protože tiskárna není vázána na tiskovou podložku. Díky veliké škále robotických ramen lze vytisknout velkorozměrové výtisky. Konečná kvalita tisku nedosahuje úrovně tiskáren s kartézským souřadnicovým systémem. 3D tisk robotickým ramenem nabízí možnost využití betonového materiálu, ale i kovových materiálů. Společnost MX3D využívá robotických tiskáren pro tisk konstrukcí mostu nebo uměleckých děl [17]

Výrobci:

- Genesis Dimensions (startup),
- MX3D.

Výhody [17]:

- proces není fixovaný na tiskovou podložku.

Nevýhody [17]:

- nižší kvalita tisku,
- vysoká cena robotického ramene.



Obrázek 12 Tisk pomocí robotického ramene Kuka [17]

2.2.5. Polární kinematika

Typ tiskárny, který využívá otočné tiskové podložky a pohybu dvou os (X, Y). Konstrukce je velice snadná na sestavení, a proto je populární mezi amatéry. Díky malému množství motorů oproti jiným metodám je polární metoda tišší. [12,13]

Výrobci:

- Sculpto,
- Polar 3D.

Výhody [12,13]:

- jednoduchá konstrukce,
- nízká cena,
- tichý chod.

Nevýhody [12,13]:

- Nízká kvalita tisku.
- Pomalý chod.
- Neexistence Sliceru pro převádění modelů do křivek

2.3. Materiál využívaný při metodě FDM/FFF

Při výrobě technikou FDM / FFF lze použít širokou škálu výrobních materiálů. Běžně bývají používány termoplasty, ale může být použito čokoláda nebo některý

z exotických materiálů, jako je například termoplast obohacený o kov nebo dřevo. [18]

2.3.1. PLA

PLA patří mezi nejpoužívanější materiál v technologii 3D tisku. Tento materiál se na rozdíl od většiny ostatních termoplastů nevyrábí z ropy, ale z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. I přes odlišnost prvotní suroviny má PLA velmi podobné vlastnosti jako zbytek průmyslově využívaných plastů. [1] Mezi uživateli 3D tisku velice rozšířen z důvodu příznivé ceny a bezproblémového tisku. Jeho nevýhodou je nižší pevnost. [19,20]

Využití – potravinářský průmysl, zdravotnictví, kosmetický průmysl [18,19]

Obecné tiskové vlastnosti (může se drobně lišit u jednotlivých výrobců) [19]:

Teplota extruder: 150–210 °C

Teplota podložky: 0-60 °C

Hustota – 1250 kg/m³

2.3.2. ABS

ABS stejně jako PLA se jedná o hojně využívaný materiál v oblasti amatérského i profesionálního tisku. Díky nízké pořizovací ceně a dobrým mechanickým vlastnostem. Nevýhodou materiálu je nebezpečí vzniku „wrapping“ (zvednutí rohu výtisku z tiskové podložky – obr.1). ABS je náchylný k použití na přímém slunci a je proto vhodné použít jinou alternativu. [19,21]

Obecné tiskové vlastnosti (může se drobně lišit u jednotlivých výrobců) [19]:

Teplota extruder: 220–275 °C

Teplota podložky: 100-130 °C

Hustota – 1050 kg/m³

2.3.3. ASA

ASA je velmi blízký materiálu ABS s menším množstvím nevýhod. Největším rozdílem oproti ABS je odolnost vůči vlivům UV záření. Materiál se vyznačuje vysokou pevností, tuhostí, odolností proti vysoké teplotě a jednoduchou zpracovatelností na 3D tiskárnách. [19,21]

Obecné tiskové vlastnosti (může se drobně lišit u jednotlivých výrobců) [19]:

Teplota extruder: 250–255 °C

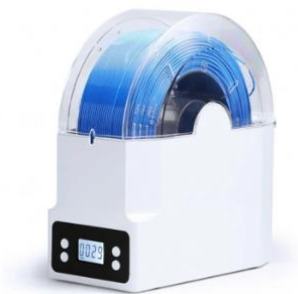
Teplota podložky: 60-100 °C

Hustota – 1070 kg/m³

2.3.4. Nylon

Nylon se vyznačuje vysokou houževnatostí a odolností. Materiál má schopnost absorbovat velké množství vlhkosti, a proto je nutné z důvodu zachování

materiálových vlastností ho skladovat v odvlhčovacích zařízeních. Dnes je velmi využíván při tisku namáhaných součástí díky své houževnatosti a pružnosti. Jeho nevýhodou je vyšší pořizovací cena a náchylnost k vyšší vlhkosti materiálu. [19,23]



Obrázek 13 Odvlhčovací box [35]

Obecné tiskové vlastnosti (může se drobně lišit u jednotlivých výrobců) [19]:

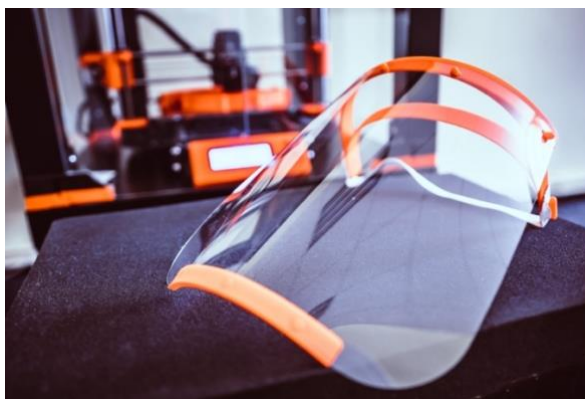
Teplota extruder: 235–260 °C

Teplota podložky: 100–130 °C

Hustota – 1100 kg/m³

2.3.5. PET

Nejrozšířenější plastový materiál na světě polyethylentereftalát (PET), ze kterého se vyrábí například láhve nebo oděvní vlákna se dnes používá i v metodě 3D tisku. Filament PET se v tiskařských strunách označuje jako „PET-G“ z důvodu přidání glykonu pro snazší tisk. Mezi jeho přednosti patří vysoká houževnatost, malá tepelná roztažnost (na podložce se nekrouť) a pružnost. Díky jeho poslední zmíněné vlastnosti se hojně využíval při tisku ochranných štítů při celosvětové pandemii COVID 19. Jeho pružnost zajišťovala přilnutí na čelo a houževnatost dovolila opětovné namáhání při nasazování štítu. [24]



Obrázek 14 Ochranný štít vytištěný na 3D tiskárně [36]

Obecné tiskové vlastnosti (může se drobně lišit u jednotlivých výrobců) [19]:

Teplota extruder: 210–235 °C

Teplota podložky: 45–60 °C

Hustota – 1350 kg/m³

2.4. Důležité parametry pro nastavení tisku

Pro dosažení co nejlepších tiskových výsledků je důležité znát možnosti nastavení parametrů a správně nastavit generování gcodeu ve sliceru.

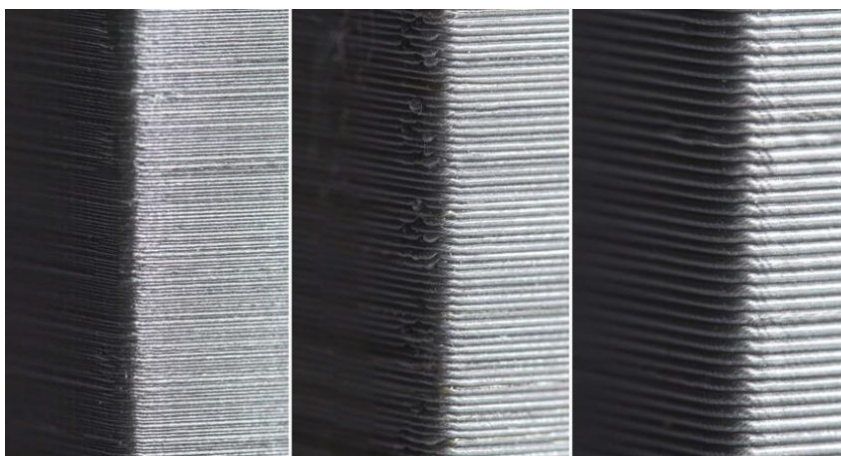
2.4.1. Výška tiskové vrstvy

Ve všech procesech 3D tisku je nastavení výšky tiskové vrstvy implicitním parametrem. Tvar výtisku se generuje především v osách X a Y kde se nanáší jednotlivé vrstvy. Přesun na další vrstvu zajišťuje posunutí v ose Z. Posunutí v ose Z reflektuje výšku tištěné vrstvy. Výška vrstvy je softwarově nastavitelný parametr, kterým lze docílit co nejlepší kvality a rychlosti tisku. [25,26]

Kvalita tisku – Výška vrstvy odpovídá vertikálnímu rozlišení posuvu v ose Z. Čím nižší je tisková vrstva, tím hladšího povrchu finální součásti docílíme. To je zapříčiněno vyšším počtem vrstev a s tím spojený i vyšší počet bodů definovaných v ose Z. [25,26]

Rychlost tisku – Při zvyšování výšky vrstvy se sníží počet vrstev a s ním i spojená doba potřebná pro vytištění dílce. [25,26]

Obecně se považuje výška vrstvy 0,15mm za způsob dosažení vysoké kvality tisku. Naopak pro nižší kvalitu a dosažení co nejvyšší možné rychlosti se využívá výška vrstvy 0,3 mm. [25,26]



Obrázek 15 Rozdílné výšky vrstvy [25]

2.4.2. Hustota výplně a shells

Aby nedocházelo ke zbytečnému plýtvání materiálu (vysokým nákladům) a zároveň se dosáhlo co nejlepšího času výtisku, se většina dílů vyráběných metodou FFF/FDM nevyrábí s plnou výplní. [26]

Shell jsou rozděleny na různé kategorie na základě jejich polohy na výtisku: [26]

- stěny – boční stěny modelu,
- spodní vrstva – první vrstva tištěná na tiskovou podložku,
- horní vrstva – poslední tištěná vrstva mezi výplní a tryskou,
- výplň – vnitřní struktura součástí.

Nastavení shell: [26]

Pro zlepšení pevnosti stěny lze ve sliceru nastavit větší tloušťku stěny. To může mít negativní vliv na čas potřebný pro výrobu modelu. Aby se předešlo tvorbě dutin ve stěně modelu, je důležité zvolit takovou tloušťku stěny, aby odpovídala násobku průměru trysky.

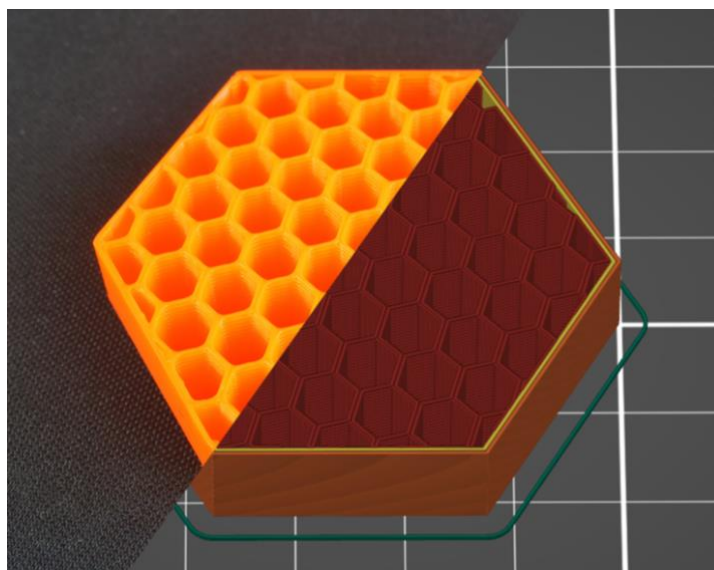
Nastavení výplně: [26]

Hodnota výplně výtisku se dá nastavit plynule od 0 do 100 %. Při volbě hustoty výplně je důležité mít na mysli, jak bude výrobek vypadat a jaké bude mít využití. Výrobky vyráběné na tiskárnách typu FFF/FDM mívají obvykle hustotu nižší než 50 %. Obvykle se využívá hustota výplně okolo 20 % aby se snížil čas výroby a při tom se zachovaly co nejlepší vlastnosti tištěného materiálu. Se zvyšující hustotou výplně roste pevnost výrobku, ale také spotřebovaný materiál a čas tisku.

Druhy výplně:

Mřížka – Jedná se o jednu z nejrozšířenějších druhů výplně. Je to jedna z nejrychleji tisknutelných výplní a je i snadná na tisknutí. Vlivem křížení cest může docházet k zvýšené hlučnosti a v některých případech i k pokažení součásti.[50]

Honeycomb (plástev) - Je tvořena svislými šestibokými hranoly. Mezi její nejsilnější stránky patří vysoká odolnost součásti, ale také tisk výplně bez překryvu. Tato výplň díky své konstrukci rapidně zvyšuje spotřebu tisku, při zachování stejného procenta výplně. To má také za následek vyšší spotřebu materiálu. [50]



Obrázek 16 Výplň ve tvaru plástev[50]

Gyroid – velmi oblíbený druh výplně, který má trojrozměrnou strukturu. Díky tomu vytváří podporu součásti ve všech směrech. [50]

2.4.3. Tisková rychlost

Rychlost tisku se volí na základě použitého materiálu, rozměru, průměru trysky, výšce vrstvy. Obecně platí, že s rostoucí rychlostí tisku se snižuje kvalita výrobku. Proto je nutné nalézt takovou rychlost, aby se zachovala co nejlepší kvalita tisku při co nejkratším výrobním čase. [26]

U malých modelů se změnou výrobní rychlosti nedocílí tak velké změny výrobního času jako u větších modelů. [26]

2.4.4. Teplota

Volba tiskové teploty záleží nejen na typu materiálu, ale také na konkrétním výrobci daného materiálu. [26]

Nastavení tiskové teploty:

Při nastavování tiskové teploty je důležité, aby teplota tisku nepřekročila hranici nejnižší teploty tání materiálu. Příliš nízká teplota by mohla zapříčinit uspání tiskové trysky z důvodu neroztaveného materiálu. [26]

2.4.5. Přesuny a mosty

Z důvodu zvolené konstrukce výrobku je někdy nutné vytvořit podpůrné konstrukce, aby bylo možné výrobek vyrobit, anebo aby nedocházelo k deformaci.

Pokud tiskárna nedisponuje duální extruderem je nutné tisknout podpurné konstrukce ze stejného materiálu jako výrobek. V tomto případě je odstranění podpěr velmi náročné a dochází k negativnímu ovlivnění povrchu materiálu mezi modelem a podpěrami. [26]

2.5. Post-Processing

Téměř každá součást vyrobená metodou 3D tisku, u které požadujeme lepší povrchové vlastnosti, musí být po vytištění upravena jednou z metod povrchových úprav. Metody post-procesingu mohou zlepšit estetické vlastnosti povrchu, ale také pevnost nebo další mechanické vlastnosti. [26]

2.5.1. Čištění a příprava

Odstranění podpor

Jedná se o jednu z nejzákladnějších metod post-procesingu. Obvykle na odstranění podpěr nemusí být vynaložena velká námaha. Největší obtíž bývá odstranit podpěry vytvořené v úzkých rozích a v těžko dostupných místech. Obtížnost odstranění udává kromě jejich umístění i materiál, ze kterého jsou vyrobeny (tiskárny, které jsou schopny tisknout zároveň z více materiálů používají pro tisk podpěr materiál rozpustný ve vodě nebo jiné kapalině). Nejčastěji používané materiály s rozpustností ve vodě jsou HIPS a PVA. Materiál PVA se používá při tisku z PLA a lze ho rozpustit ve vodě. HIPS se používá při tisku z ABS a je rozpustitelný v rozpouštědle D-limonene. [27]



Obrázek 17 Vstupní hřídel s využitím tiskových podpěr

Broušení

V pořadí nejběžnějších metod post-procesingu je broušení hned za metodou odstraňování podpěr. Výrobky vytištěné na 3D tiskárně mají obvykle zvýšenou hrubost z důvodu snahy o dosažení co nejkratšího tiskového času. Broušení je jednoduchým způsobem, jak povrch zjemnit. [27]

Po dokončení tisku zůstávají na výrobku malé otřepy/kuličky, které mohou vzniknout při odstraňování podpěr. Takových to vad je nejnazší se zbavit pomocí brusného papíru. Obvykle se začíná nižší zrnitostí (150-400) a postupuje se až k vyšší zrnitosti (2000 a více). Třením brusného papíru o výtisk může docházet k zvyšování teploty a tím i k negativnímu na jemnost povrchu. Proto se doporučuje broušenou součást navlhčit, aby se lépe absorbovalo přebytečné teplo.

Broušení součástí by mělo probíhat kruhovým pohybem. Rovnoběžné broušení může zničit vizuální vzhled součástí, a to především u těch, které byly vytištěné s vyšší výškou vrstvy. [27]

Výhody: [27]

- skvělá technika pro přípravu součástí, které budou leštěny nebo malovány,
- lze dosáhnout jemného povrchu,
- všechny materiály využívané při tisku metodou FDM/FFF mohou být broušeny.

Nevýhody: [27]

- časově náročné,
- může mít vliv na přesnost rozměrů,
- obtížné použití v těžko dostupných oblastech.

Svařování

Z důvodu omezeného tiskového prostoru 3D tiskáren je obtížné tisknout součásti větších rozměrů. Metoda svařování se používá pro spojování dílů z ABS/ASA pomocí acetonu a tím k vytváření jedné velké součásti. Aceton má schopnost naleptat povrch ABS / ASA. [27]

Proces svařování je velice jednoduchá metoda. Kontaktní plochy součástí, které chceme spojit se naleptají acetonem a následně se přitisknou k sobě. [27]

Výhody: [27]

- pevnější než ostatní metody,
- levné,
- jednoduché.

Nevýhody: [27]

- nebezpečí zničení součásti při použití vysokého množství acetonu,
- spoj je nejslabší místo na součásti,
- lze svařovat pouze ABS a ASA.

Lepení

Oproti spojování metodou svařování umožňuje lepení spojovat větší škálu materiálů. Stejně jako svařování se používá pro výrobu velkých součástí, které se nedají vytisknout v tiskárně z důvodu omezeného tiskového prostoru. [27]

Výhody: [27]

- lze použít po běžné filamenty (PLA, PETG),
- levné,
- nízká časová náročnost.

Nevýhody: [27]

- není tak pevné jako spojování metodou svařování.

2.5.2. Finišování

Finišování je posledním krokem post-procesingem 3D tisku. Mezi metody finišování patří zejména malování, vyhlazování, leštění. [27]

Malování

Povrch součásti se před konečným nátěrem upravuje nanesením základní vrstvy u. To se provádí základním nátěrem nebo základním nástríkem. Před nanesením konečné vrstvy se doporučuje povrch zbrousit, aby se odstranily tiskové vrstvy a součást měla hladší povrch. K nanášení konečné vrstvy se využívá štětce nebo spreje. [27]

Výhody: [27]

- dosažení hladkého povrchu součásti,
- lze použít u jakéhokoliv materiálu.

Nevýhody: [27]

- časově náročné.

Vyhlazování

Vyhlazování acetonem je oblíbená finišování, a to zejména u materiálů ABS a ASA. Aceton se pyšní schopností naleptat povrch součástí vyrobených z materiálu ABS a ASA a tím dosáhnout hladkého povrchu. Součásti vyrobené z materiálu PLA není vhodné vyhlazovat acetonem, protože nedochází k jeho naleptání, ale dokonce by mohlo dojít ke zničení součásti. PLA lze vyhlazovat chemickými látkami jako je THF nebo MEK. Ovšem pomocí těchto látek nelze dosáhnout takové kvality povrchu součásti jako při použití acetonu. [27]

Výhody: [27]

- hladký a lesklý povrch,
- rychlost metody.

Nevýhody [27]

- vhodné pouze pro součásti z materiálu ABS a ASA,
- riziko změny rozměru.

Leštění

Leštění se používá pro dosažení co nejhladšího povrchu vytištěné součásti. Před zahájením procesu leštění je nutné součást důkladně obrousit a odstranit všechny součásti. [27]

Výhody: [27]

- dosažení jemného a zrcadlového povrchu,
- lze provádět jednoduše pomocí elektrických nástrojů.

Nevýhody: [27]

- hrozí změna rozměrů.

Epoxidační nátěr

Tento nátěr má velmi kladný vliv na zvýšení pevnosti a lze jím utěsnit porézní části tisku. Jedná se o ochrannou vrstvu s velmi dobrými vlastnostmi. Epoxidový povlak se skládá ze dvou základních chemikálií epoxidové pryskyřice a tvrdidla.

K dosažení co nejlepších možných výsledků je nutné zachovat správný poměr tvrdidla a pryskyřice. V případě vytvoření špatného poměru by mohlo dojít k nanesení nátěru, který by nemusí vyschnout. Povlak se nanáší pomocí pěnového aplikátoru nebo houby. [27]

Výhody: [27]

- zajišťuje pevnost součásti,
- vznik odolné ochranné vrstvy.

Nevýhody: [27]

- nedojde k úplnému zmizení vrstev.

Galvanické pokování

Jedná se o proces, kde se na součásti s vodivým povrchem nanáší kovový povlak. Tato metoda postprocessingu výrazně zlepšuje pevnost součásti, ale také i vizuální vzhled. Jedná se o proces, kde dochází k přenosu kovového povlaku jednoho kovu na druhý. Galvanické pokování se provádí chemickým procesem zvaný elektrolyza. Elektrolyza se provádí pomocí zdroje energie a elektrolytu. Elektrolyt je roztok, který vede elektrický proud prostřednictvím volných iontů. K zahájení chemické reakce elektrolyzy mezi katodou (záporný pól) a anodou (kladný pól) je potřeba elektrický proud. Anoda je z kovu, který chceme použít jako povlak. Součást, která má být pokována je katoda. Katoda i anoda se společně ponoří do elektrolytu. Nejčastěji se při elektrolyze využívá měď a nikl. Dále se dá součást pokovat materiály jako je zlato, stříbro, chrom, mosaz a další. Součásti vyrobené na technologiích 3D tisku bývají obvykle z plastu a jsou nevodivé. Před galvanickým pokovením je třeba součásti obrousit a nanést vodivou barvu. [27]

Výhody: [27]

- součásti jsou pevnější a vodivé,

- při správném postupu není ohrožena přesnost rozměrů,
- lepší vizuální vzhled.

Nevýhody: [27]

- náročná úprava.

2.6. Transparentní 3D tisk

Transparentním 3D tiskem se označují tištěné součásti, s různým stupněm průsvitnosti. Lze dosáhnout průsvitných součástí, ale i téměř transparentních v závislosti na zvoleném způsobu výroby, materiálu a post-processingu.

Při návrhu geometrie transparentní součásti je nutno si uvědomit, že součásti složitějšího tvaru mají tendenci více lámat světlo a nelze úplné transparentnosti. To platí především pro zakřivené křivky modelu, které přesměrovávají světlo jinam. Aby byl lom světla minimalizován, je doporučeno minimalizovat tloušťku stěny na minimální možnou mez. Je to z důvodu, že stěna s větší tloušťkou rozptýlí více světla a způsobí neprůhledný vzhled. [37,38,39]

2.6.1. Metody tisku transparentních modelů

FDM / FFF

Metoda FDM/FFF pracuje na principu nanášení vrstev materiálu na sebe. Při tomto procesu dochází ke vzniku malých mezer, které zhoršují transparentnost modelu. Viditelné vrstvy vytištěné na hotové součásti mají také negativní vliv na její transparentnost. Minimalizace viditelnosti tiskových vrstev na modelu vytištěném na FDM tiskárně je klíčem k získání co nejtransparentnějšího modelu. [37,38,39]

SLA

Výhodou této metody je součást získává objem po velmi tenkých vrstvách. Díky tomu jsou u součástí vyrobených metou STL dosahovány velmi dobré transparentní vlastnosti. Tato metoda je pro vizuální aplikaci nevhodnější (hladký povrch a vysoká úroveň detailů). Negativní vliv na transparentnost mohou mít tištěné podpěry a nutnost jejich odstranění. [37,38,39]

Polyjet technologie

Jedná se o jednu z nejpokročilejších aditivních technologií. Výsledkem je součást, která má velmi hladké povrchy a vysoké rozměrové přesnosti. Výsledné součásti z této metody se přibližují součástem vyrobeným technologií vstřikování. [37,39]

2.6.2. Materiály pro transparentní 3D tisk – FFF/FDM

PLA

Transparentnost strun z tohoto materiálu závisí na kvalitě. Nejčastějším problémem je, že vlákna PLA materiálu mívají nažloutlý nádech, protože jsou vyrobeny z přírodních surovin. [37,39]

ABS

Jedná se o spíše průsvitný než průhledný materiál. Je to z důvodu přidání aditiv pro dosažení průhlednosti. Pro dosažení transparentnosti musí být součást po tisku upravena jednou z metod post-processingu. [37,39]

PMMA

Oproti ostatním materiálům je materiál poměrně průhledný a je k dostání v několika barvách. [37,39]

PC

Polykarbonát je průsvitné a odolné vlákno. [37,39]

PETG

Jeden z neprůsvitnějších filamentů pro použití na 3D tiskárně [37,39]

2.6.3. Materiály pro transparentní 3D tisk – SLA

Existuje několik značek transparentního resinu (pryskyřice). Součásti vyrobeny z transparentního resinu nedosahují zcela čistých výsledků, ale přesto se jedná o velmi dobré výsledky. Součásti vyrobené metodou SLA, a to především ty s tloušťkou stěny 2 mm a více mívají namodralý nádech.

Transparentní resin (pryskyřice)

Jedná se o fotocitlivou průhlednou kapalinu, která tvrdne pomocí UV světla. Součásti vyrobené z tohoto materiálu mohou leštěním získat velice transparentní povrch. [37,39]



Obrázek 18 Vyleštěný SL1 výtisk [39]

2.6.4. Finišování

Existuje několik metod finišování, které přispívají k čirosti součást. Mezi nejpoužívanější patří broušení, vyhlazování acetonem, leštění nebo epoxidační nátěr. [37,39]

2.7. Intenzita světla

Tato veličina je udávána v jednotce lux (lx), kde 1 lux vyjadřuje svítivost způsobenou dopadáním světelného toku na jednotku plochy (1 m^2). Intenzita světla bývá například využívána ke správné volbě intenzity světla na pracovištích. Takováto osvětlenost může být například 20-50 lx pro schodiště a chodby, 200-500 lx pro kancelářské prostory až 2000 a více pro pracovní prostor, kde se provádí velmi náročné zrakové úkony. [40,41]

2.7.1. Typy snímačů

Fotorezistor

Rezistory lze použít střídavých, ale tak i v stejnosměrných obvodech. Jedná se o směs krystalů polovodičů. Fotorezistory díky poklesu odporu součástky vlivem osvětlení citlivé vrstvy reagují na světlo. Je důležité odečítat hodnoty s časovým odstupem po změně světla z důvodu zpožděné změny odporu. Fotorezistory se v dnešní době používají pouze zřídka z důvodu existence zpoždění a tepelné závislosti. [40,41]



Obrázek 19 Fotorezistor LDR5516 [44]

Fotodioda

Existuje základní rozlišení fotodiod na takzvané fotodiody PN a fotodiody PIN. Ty se dělí podle výroby a provedení. Křemík je hlavní výrobní materiál fotodiod. Fotodiody reagují dobře na světlo s delší vlnovou délkou jako je například infračervené světlo. [40,41]

Fotodiody se v poslední době používají díky jejich vysoké citlivosti k infračervenému záření. Fotodioda se také hodí na aplikace, kde potřebujeme rychlou reakci na změnu světla. Jedním z praktických použití je přijímač infračerveného záření z dálkového ovládání. [40,41]

Fototranzistory

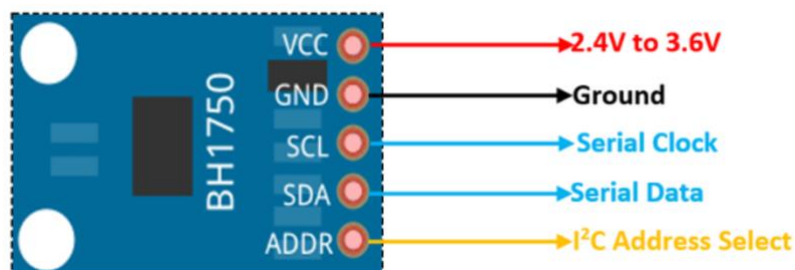
Fototranzistor je velmi podobný klasickým bipolárním tranzistorům. Funguje na principu využívání světelné energie, které při dopadu na oblast báze generuje pár nosiče náboje. Popularita tohoto druhu tranzistoru je v poslední době vysoká. Je to z důvodu, že v praktických aplikacích bývá výkonové zatížení fotodiod nedostatečné. Fototranzistory jsou citlivější než fotodiody. Úhel dopadu světla a jeho délka mají vliv na citlivost fotorezistoru. [40,41]



Obrázek 20 Fototranzistor THT 5mm [45]

2.7.2. Senzor intenzity světla – BH1750

Jedná se o modul, který využívá pro měření intenzity světla fotodiodu. Tento modul má široké využití z důvodu vysokého rozlišení a to 1 až 65635 lx. Vstupní napětí senzoru je 3,3 až 5 V a je kompatibilní s deskou arduino. Citlivost tohoto modulu se pohybuje mezi 1 a 4 luxy. Pro správné fungování s deskou arduino je nutné využít knihovnu BH1750. S deskou komunikuje přes rozhraní I²C bus. Modul je spojen s deskou přes 5 pinů – VCC (napájení), GND (uzemnění), SCL (Serial clock line), SDA (Serial data address, ADDR (device address pin)). [42,43]



Obrázek 21 BH1750 Light sensor pinout [42]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Výstupem této diplomové práce je vytištěný model jednostupňové převodovky pro výukové účely. Cílem práce je zjistit možnost využití 3D tisku pro výukové účely a s tím i spojené prověření schopnosti výrobní metody vyrobit mechanismus s dostatečnou přesností a plynulostí chodu. Praktická část se také zabývá povrchovou úpravou částí vyrobených metodou 3D tisku a volba materiálu pro transparentní dílec.

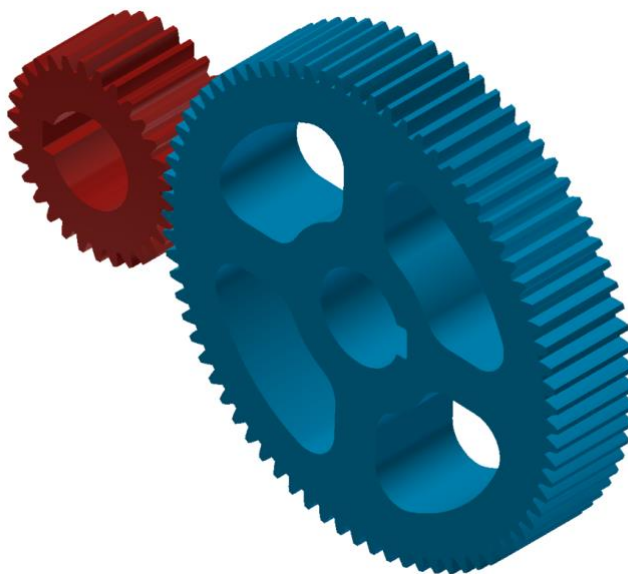
3.1. Proces tvorby produktu

Jelikož převodovka nebude sloužit k reálnému využití ve stroji, nebyly výchozí hodnoty předem zadány. Hodnoty zvolené pro konstrukční výpočet, byly zvoleny tak, aby bylo možné všechny součásti vyrobit na omezené ploše 3D tiskárny a přitom zůstal převodový poměr v přijatelných mezích.

Model bude určený pro názornou ukázkou funkčnosti převodovky. S přihlédnutím ke způsobu využití byla zvolena výrobní metoda. Součásti vyrobené na 3D tiskárně nedosahují tak vysoké pevnosti jako ozubená kola vyrobená jednou z konvenčních metod, ale ani tak složité výroby, nebo výrobních nákladů na výrobu. Velkou výhodou této metody je také skutečnost, že většina škol nebo výukových center disponuje FDM tiskárnou a v případě nutnosti by měli být schopni si celou převodovku naklonovat, nebo vyrobit případné náhradní součásti. V modelu jsou použity i dokupované komponenty, které by z důvodů technologických hranic výrobní metody nešly použít.

3.2. Výpočet ozubených kol

Před začátkem samotné modelace převodovky a následného tisku je nutné provést výpočty pro zajištění funkčnosti. Veškeré výpočty byly provedeny v programu Mathcad, kde byly zvolené hodnoty několikrát kombinovány a změněny z důvodu dosažení co nejlepšího ukázkového modelu, který bude splňovat svůj účel. Výpočty byly následně zkontrolovány v design akcelérátoru ozubených kol v programu Autodesk Inventor.



Obrázek 22 Ozubená kola

3.2.1. Vstupní hodnoty

Vstupní hodnoty byly zvoleny tak, aby rozdíl vstupních a výstupních otáček byl dostatečný k demonstraci funkce převodovky a ukázkového převodového poměru.

Otáčky na vstupní hřídeli – 500 [min⁻¹]

Otáčky na výstupní hřídeli – 160 [min⁻¹]

3.2.2. Výpočet převodového poměru [46]

$$i_c = \frac{n_i}{n_o} \quad (3.1)$$

$$i_c = \frac{500}{160}$$

$$i_c = 3,125$$

Kde:

i_c [-] - Převodový poměr

n_i [min⁻¹] - Otáčky na vstupní hřídeli

n_o [min⁻¹] - Otáčky na výstupní hřídeli

3.2.3. Výpočet počtu zubů [46]

Počet zubů 1. kola (pastorku) byl zvolen a následně s jeho pomocí vypočítán počet zubů 2. kola na výstupní hřídeli.

Počet zubů pastorku byl zvolen: $z_1 = 30$

Počet zubů druhého převodového stupně

$$z_2 = z_1 \times i_c \quad (3.2)$$

$$z_2 = 30 \times 3,125$$

$$z_2 = 93,75 \approx 94$$

Kde:

z_2 [-] – Počet zubů ozubeného kola druhého převodového stupně

z_1 [-] – Počet zubů ozubeného kola prvního převodového stupně

3.2.4. Výpočet modulu [46]

Volba výšky zubu $h = 5$ mm

$$m = \frac{h}{2,25} \quad (3.3)$$

$$m = \frac{5}{2,25}$$

$$m = 2,222 \approx 2$$

Kde:

m [mm] – modul

h [mm] – výška zubu

3.2.5. Výpočet rozměrů ozubených kol [46]

Roztečná kružnice pastorku byla vypočítaná ze zvolené hodnoty počtu zubů pastorku a vypočítaného modulu.

$$D_1 = z_1 \times m \quad (3.4)$$

$$D_1 = 30 \times 2$$

$$D_1 = 60 \text{ mm}$$

Kde:

D_1 [mm] – Průměr roztečné kružnice pastorku

Roztečná kružnice ozubeného kola druhého převodového stupně

$$D_2 = z_2 \times m \quad (3.6)$$

$$D_2 = 94 \times 2$$

$$D_2 = 188 \text{ mm}$$

Kde:

D_2 [mm] – Průměr roztečné kružnice druhého převodového stupně

Hlavová vůle ozubených kol [46]

Jedná se o vzdálenost mezi v hlavou a patou zubu.

$$c_{12} = 0,25 \times m \quad (3.7)$$

$$c_{12} = 0,25 \times m$$

$$c_{12} = 0,25 \times 2$$

$$c_{12} = 0,5 \text{ mm}$$

Kde:

c_{12} [mm] – Hlavová vůle ozubených kol

Výška hlavy zubu kol obou převodových stupňů [46]

$$h_{a12} = m_{12} \quad (3.8)$$

$$h_{a12} = 2 \text{ mm}$$

Kde:

h_{a12} [mm] – Výška hlavy zubu

Výška paty zubu obou převodových stupňů [46]

$$h_{f12} = h_{a12} + c_{12} \quad (3.9)$$

$$h_{f12} = 2 + 0,5$$

$$h_{f12} = 2,5 \text{ mm}$$

Kde:

h_{f12} [mm] – Výška paty zubu

Hlavová kružnice pastorku [46]

$$D_{a1} = D_1 + 2 \times h_{a12} \quad (3.10)$$

$$D_{a1} = 60 + 2 \times 2$$

$$D_{a1} = 64 \text{ mm}$$

Kde:

D_{a1} [mm] – Hlavová kružnice pastorku

Hlavová kružnice druhého kola [46]

$$D_{a2} = D_2 + 2 \times h_{a12} \quad (3.11)$$

$$D_{a2} = 188 + 2 \times 2$$

$$D_{a2} = 192 \text{ mm}$$

Kde:

D_{a2} [mm] – Hlavová kružnice druhého kola

Patní kružnice pastorku [46]

$$D_{f1} = D_1 - 2 \times h_{f12} \quad (3.12)$$

$$D_{f1} = 60 - 2 \times 2,5$$

$$D_{f1} = 55 \text{ mm}$$

Kde:

D_{f1} [mm] – Patní kružnice pastorku

Patní kružnice druhého kola [46]

$$D_{f1} = D_1 - 2 \times h_{f12} \quad (3.13)$$

$$D_{f1} = 188 - 2 \times 2,5$$

$$D_{f1} = 183 \text{ mm}$$

Kde:

D_{f1} [mm] – Patní kružnice druhého kola

3.2.6. Výpočet osově vzdálenosti a šířky ozubení [46]

$$a_{12} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3.14)$$

$$a_{12} = \frac{60 + 188}{2}$$

$$a_{12} = 124 \text{ mm}$$

Kde:

a_{12} [mm] – Osová vzdálenost

3.2.7. Šířka ozubení [46]

Šířka ozubení se volí z intervalu $b \in \langle 9 \times m; 14 \times m \rangle$ [47]

$$b = 15 \times m \quad (3.15)$$

$$b = 15 \times 2$$

$$b = 30 \text{ mm}$$

Kde:

b [mm] – Šířka ozubení

3.3. Volba transparentního materiálu

Víko převodové skříně bylo navrženo tak, aby umožňovalo alespoň částečnou průhlednost a tím, aby bylo umožněno pozorovat pohyb ozubených kol. Aby bylo dosaženo co nečilejšího výsledku tisku bylo zapotřebí zvolit správný výrobní materiál. Zvolení materiálu bylo provedeno pomocí testu čírosti výtisku z různých materiálů. Pro test byly vybrány materiály ABS – T, PLA, PETG.

3.3.1. Měřicí zařízení

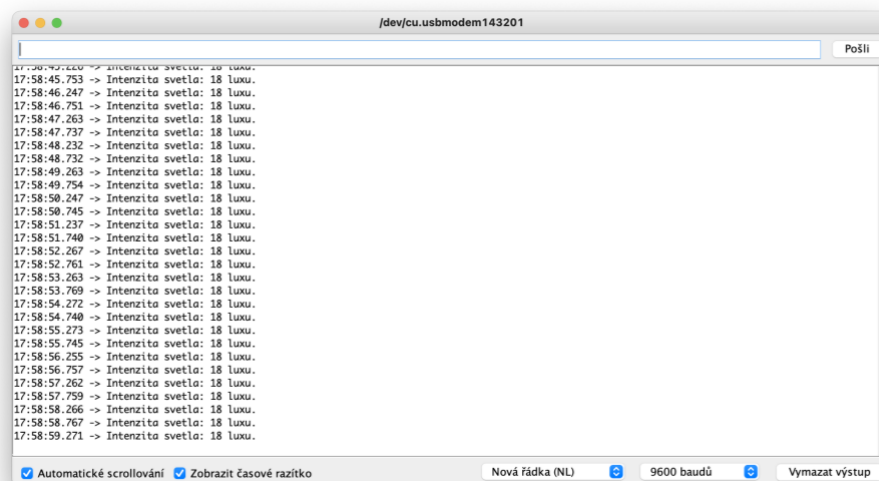
Měřidlo pracuje na principu prosvícení vytištěné destičky ze zkoušeného materiálu pomocí led diody. Zařízení se skládá ze světelného zdroje, který je v našem případě LED dioda s průměrem 5 mm. Druhou důležitou součástí je senzor intenzity světla. Byl zvolen senzor s označením BH1750, který komunikuje s vývojovou deskou Arduino přes komunikační rozhraní I2C. Citlivost tohoto senzoru je 1 až 4 lx a Rozsah měření se pohybuje mezi 1 až 65 535 lx. Obě součásti se nachází v boxu, který byl vytištěný na 3D tiskárně. Mezi těmito dvěma součástmi se nachází testovaný etalon. Mimo zkušební box se nachází již zmíněná vývojová deska Arduino, která zajišťuje napájení obou součástí, čtení hodnot, a i jejich výpis na monitoru počítače.

Senzor BH1750 je nutné propojit s deskou Arduino pomocí 5 propojovacích pinů. Aby bylo možné získat naměřené hodnoty ze senzoru, bylo nutné vytvořit program pro desku Arduino. Ten byl napsán v originální aplikaci Arduino 1.8.13. Tento program ovládá LED diodu (zapíná ji) a také čte hodnoty ze senzoru, a to s obnovovací frekvencí 5000 ms.

Ukázka programu Arduino:

```
// Měření intenzity světla BH1750// připojení potřebných knihoven
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
// inicializace senzoru BH1750 z knihovny
BH1750 luxSenzor;
int led = 13;
void setup() {
  pinMode(led, OUTPUT);
  digitalWrite(led, HIGH); //zapnutí led
  // komunikace po sériové lince rychlostí 9600 baud
  Serial.begin(9600);
  // zapnutí komunikace se senzorem BH1750
  luxSenzor.begin();
  // pauza před zahájením měření
  delay(200);
}
void loop() {
  // vytvoření proměnné pro uložení naměřených údajů
  // a načtení aktuální intenzity světla
  uint16_t lux = luxSenzor.readLightLevel();
  // vytištění výsledku po sériové lince
  Serial.print("Intenzita svetla: ");
  Serial.print(lux);
  Serial.println(" luxu.");
  // pauza po dobu 1 vteřiny před dalším měřením
  delay(120);
}
```

Po odečtení hodnot ze senzoru jsou hodnoty vypsány na sériovém monitoru.

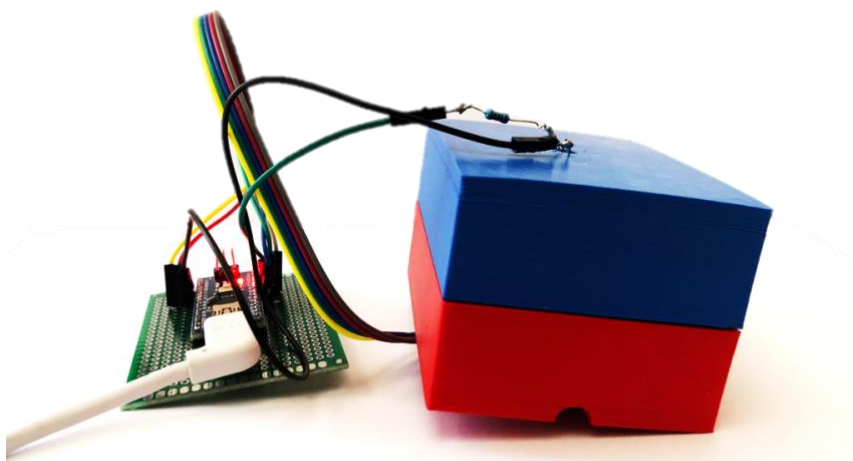


Obrázek 23 Sériový monitor měřených hodnot

3.3.2. Postup měření měřicím zařízením

Do měřidla jsou vkládány vzorky vytištěných etalonů z různých materiálů a s různou úpravou za dosažení co nejlepší transparentnosti materiálů. Po uzavření měřidla horním krytem je měřidlo připojeno k napájení, a je v něm spuštěný měřicí program. V programu se otevře sériový monitor, ze kterého se po ustálení hodnot odečte finální hodnota intenzity světla, propuštěného zkoušeným vzorkem. Hodnota z měření je zapsána do tabulky změřených hodnot. Následně je zkušební výtisk vyndán z měřicího zařízení a nahrazen dalším vzorkem. Měření nového vzorku probíhá stejně jako u měření předchozího. Po změření hodnot všech vzorků bylo provedeno vyhodnocení a volba nejvhodnějšího materiálu a povrchové úpravy.

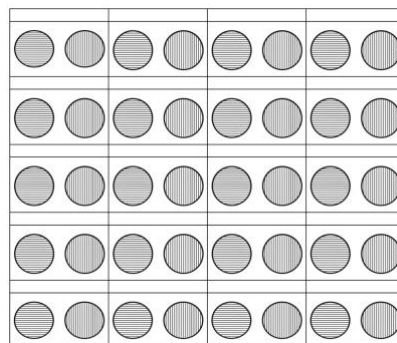
Měřený etalon ve tvaru kvádrů o rozměrech 50x30 mm byl vytištěn na 3D tiskárně.



Obrázek 24 Zařízení pro měření intenzity světla

3.3.3. Vizuální vyhodnocení

Jelikož nejlepší výsledek z měření pomocí schopnosti průchodu světla vzorkem nemusel odpovídat vzorku s nejlepšími vlastnostmi, byl test doplněn o vizuální vyhodnocení. Zde se nehodnotila jen čírost, ale takové celkový vzhled. Do toho spadá například zbarvení použitého materiálu a viditelnost vrstev. Čírost byla vyhodnocena pomocí přikládání vzorků na testovací list s vytištěným vzorem. Jako vzor byly zvoleny kruhy s různě orientovanými pruhy. Tento test se využívá na očních klinikách pro ověření ostroty zraku. V tomto testu byl zvolen na základě zkoušky různých obrazců, při kterých bylo zjištěno, že právě pruhy v různých směrech mohou odhalit horší vlastnosti transparentnosti z důvodu rovnoběžnosti čar s vrstvami vzorku.



Obrázek 25 Testovací list

Při měření byly všechny vzorky položeny na stejný testovací list, aby mohly být vzorky vyhodnoceny navzájem za stejných podmínek. K dosažení co nejvíce autentického výsledku bylo před zahájením testu provedeno změření intenzity světla v okolí testovacího prostoru. Ta totiž mohla mít vliv na konečný výsledek. I přes veliký přínos této metody vyhodnocení je nutné podotknout, že lidský zrak je individuální lidská schopnost, která se může u jednotlivců lišit. Tento test vyhodnocuje transparentní vlastnosti z pohledu hodnotitele a jedná se o subjektivní hodnocení. Tím se tento test liší od testu intenzity světla, u kterého dokážeme při všech měřeních dosáhnout velmi podobných podmínek okolí a měření provádí modul, který má svoji nepřesnost danou výrobcem ve svém produktovém listu.

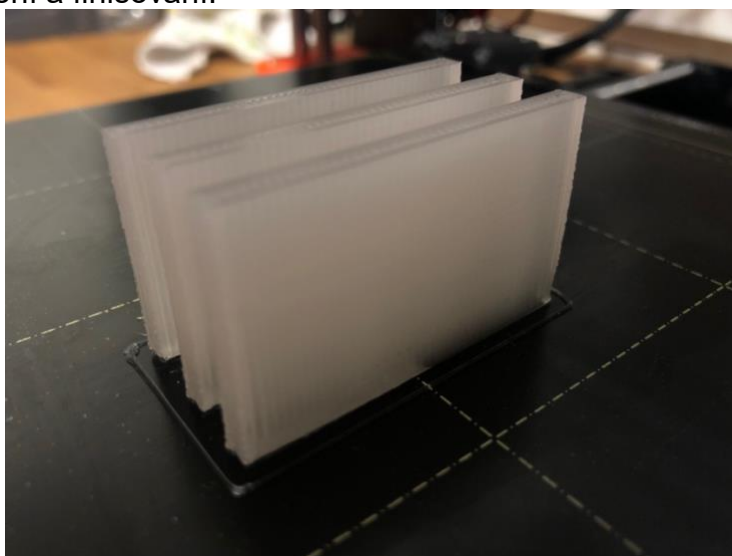
Vzorky z obou měření byly vyhodnoceny bodově. Za každý naměřený lux obdržel vzorek jeden vyhodnocovací bod. Z vizuálního vyhodnocení byly vzorky bodovány 1 až 10 body. Vizuální kontrola tvořila poměrově menší část bodování z důvodu subjektivního hodnocení, který ovlivňuje řada faktorů. Tyto body byly následně sečteny a následně byla provedena finální analýza.

3.3.4. Vzorky

Jako první bylo důležité definovat orientaci tisku jednotlivých etalonů. V úvahu připadly dvě možné řešení. První možností je tisknout etalon „na ležato“ tedy největší plocha etalonu v rovnoběžné orientaci s tiskovou podložkou. Druhou variantou bylo „na stojato“. To znamená, že etalon měl největší plochu kolmo k tiskové podložce. Z důvodu designu horní části převodové skříně je možné tisknout skřín v orientaci, která odpovídá druhé variantě uložení etalonu na tiskové podložce. Aby bylo možné říct, že by tisknutí etalonu a skříně v orientaci varianty 1 by nebyl výsledek markantně lepší, než při variantě 2 byly vytisknuty dva etalony v různých orientacích. Ty následně byly změřeny v měřicím zařízení. Po ustálení

měřených hodnot byly hodnoty obou variant porovnány. Hodnota intenzity procházejícího světla byla přibližně stejná (rozdíl byl přibližně 1 až 2 lux). Při vizuální kontrole byl rozdíl poměrně znatelnější. Vzorek vytisknutý ve variantě 1 měl mnohem lepší transparentní vlastnosti. Je ale také důležité zmínit, že se úroveň transparentnosti oproti variantě tištěné „na stojato“ odvíjela od úhlu pozorování. To bylo dáno střídavě tištěnými vrstvami. I přes lepší vizuální výsledek by bylo složité nastavit tisk a design skříně tak, aby umožnila tisknout skříň v této orientaci. Bylo by nezbytně nutné použití velkého množství podpěr, a to by mělo negativní vliv na povrch a transparentnost součásti. Proto byla pro následující testy etalonů zvolena kolmá varianta. Cílem bylo nalézt dokončovací metodu, při které dosáhneme co nejlepší transparentnosti při orientaci, která se nejvíce hodí pro výrobu převodové skříně.

Aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího výsledku, bylo zapotřebí vyzkoušet několik kombinací jednotlivých úprav a materiálů. Díky tomu mohlo být vybráno nejlepšího výrobního nastavení a finišování.



Obrázek 26 Dotištěné vzorky z materiálu ABS - T

3.3.5. Hustota výplně

Prvním testovaným parametrem byla hustota výplně. Byly vyzkoušeny vzorky s různou hustotou výplně. Hustota výplně má vliv na pevnost. Byl zde předpoklad, že vzorek s vyšší hustotou výplně bude mít horší transparentnost. Kromě transparentnosti z důvodu složitosti součásti krytu převodovky bylo důležité porovnat i pevnost součásti. Dále byly porovnány vzorky s různou výškou vrstvy. Výsledek vizuálního testu i testu svítivosti jednoznačně odhalil, že transparentnost roste s výškou vrstvy. Tento jev je nejspíš způsobený tvarem vrstvy, kdy vyšší vrstva má kulatější tvar a nedochází k tak vývratnému lomu světla. S rostoucí výškou vrstvy roste také riziko nesoudržnosti jednotlivých vrstev. Aby nebylo zbytečně plýtváno materiálem, byly nejprve vytištěny vzorky z materiálu PETG s různou hustotou výplně. Zde se odhalilo, že pro transparentní tisk nemá význam se zabývat jinou hustotou výplně než 0 nebo 100 %.

Na vytištěném vzorku s hustotou výplně 10 % vzniká negativní efekt v podobě pruhů v místech dotyku výplně se stěnou vzorku. Nicméně při testu průsvitnosti se ukázalo, že vzorkem dokáže projít vyšší množství světla než při hustotě 100 %. Vzorek také měl vyšší pevnosti při působení síly na jeho bok než vzorek s nulovou výplní. I přes všechny dobré pevnostní a průsvitné vlastnosti by při použití tohoto nastavení vznikl na součásti nevzhledný vizuální vzhled.



Obrázek 27 Vizuální hodnocení vzorku s hustotou výplně 10%

3.3.6. Výška vrstvy

Dalším testovaným parametrem byla výška vrstvy. Byly vytisknuty vzorky s výškou vrstvy 0,1 mm, 0,36mm (90 % průměru trysky), které byly vytisknuty tryskou o průměru 0,4 mm. Při tisku materiálu ABS-T došlo k problému s tiskem s výškou vrstvy 0,36mm. Docházelo zde k oddělení vrstev v horní části vzorku. Proto byly ABS-T vzorky vytištěny s výškou vrstvy 0,3mm. U prvních vzorků bylo viditelné, že s vyšší vrstvou roste transparentnost materiálu. Vyšší vrstva ale způsobuje hrubší povrch a nižší úroveň detailů. Proto byly pro porovnání vybrány vzorky s výškou vrstvy.



Obrázek 28 Srovnání vzorků PETG s odlišnou výškou vrstvy

3.3.7. Vybrané porovnávané materiály

Pro test byly vybrány materiály PETG, PLA a ABS-T. Všechny testované materiály byly pořízeny u českého výrobce Filament PM. Tím byl eliminován vliv výrobce na testovaný materiál.

Ze všech tří testovaných materiálů byly vytištěny vzorky s výškou vrstvy 0,1mm a 0,36mm (0,3mm pro ABS) v kombinaci s hustotou vzorku 0 a 100 %.

Všechny parametry byly upraveny pomocí technologie broušení a následně nalakovány. Tato povrchová úprava byla následně také zhodnocena ve vyhodnocovací tabulce.

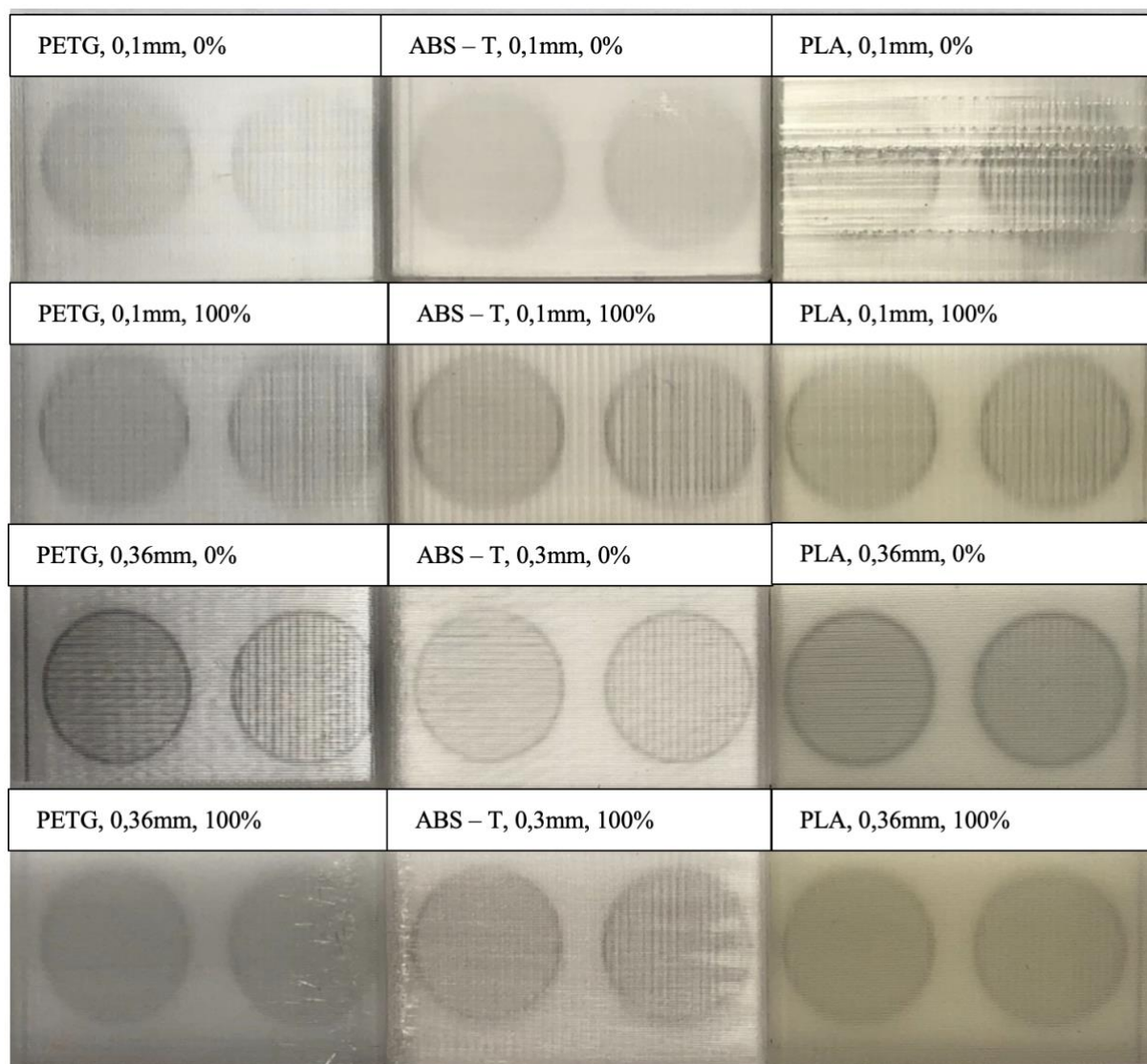
3.3.8. Rychlost tisku

Rychlost tisku byla snížena o 25–30 % oproti normálním rychlostem pro dané materiály. Aby byla vyzkoušena závislost rychlosti tisku na kvalitě transparentnosti, byl jeden vzorek vytištěn do přibližné půlky jeho výšky s tiskovou rychlostí zvýšenou na 140 % původní rychlosti. Druhá půlka byla vytištěna původní 100 % rychlostí. Rozdíl v transparentnosti byl markantní.

3.3.9. Vyhodnocení testu

3.3.9.1. Vyhodnocení vizuálního testu

V první fázi byly vyhodnoceny vzorky bez povrchové úpravy. Posuzování probíhalo při denním světle při intenzitě 550 až 620 lx, což odpovídá běžné intenzitě světla v domácnosti.



Obrázek 29 Srovnání vzorků bez povrchové úpravy

PLA

Všechny testované vzorky z materiálu PLA byly v různé míře zbarvené do žluta. Z materiálů PLA vycházely nejlépe obě varianty s hustotou 0 %. Vzorek s výškou vrstvy 0,1mm měl nekonstantní rozložení transparentnosti. Nejlépe byl vzorek

průhledný ve středu. Negativní vizuální aspekt byly mírně viditelné svislé pruhy, které vznikly při tisku. Oba vzorky měly slabě viditelné svislé pruhy testovacího obrazce. Podélné pruhy viditelné nebyly. Vzorek s výškou vrstvy 0,1mm měl výrazně leklší povrch než vzorek s výškou vrstvy 0,36mm. Vzorek s vyšší vrstvou měl patrně horší transparentnost při pozorování pod úhlem a zabarvení do žluta.

Vzorky s hustotou výplně 100 % byly vysoce zbarvené do žluta. Na vzorcích nebyly rozeznatelné pruhy testovacích obrazců. Podélné pruhy, které vznikly při tisku byly viditelné na obou vzorcích. Tyto vzorky získaly ze všech testovaných nejhorší hodnocení. Stejně jako u hustoty výplně 100 % měl vzorek s výškou vrstvy 0,1 mm nekonstantní transparentnost.

ABS – T

Nejhůře byl hodnocený vzorek s výškou vrstvy 0,3mm a hustotou 100 %. Ten měl nekonstantní transparentnost. Testovací obrázek byl rozeznatelný ve svislém pruhu, podélné pruhy byly viditelné pouze málo, a to jen ve správném pozorovacím úhlu. Na vzorku byly vidět svislé pruhy i podélné tiskové vrstvy a povrch byl poměrně hrubý.

Velmi podobně vyšly oba vzorky s výškou vrstvy 0,1mm. O něco málo vyšel lépe vzorek s hustotou výplně 100 %. Tento vzorek měl lepší rozlišitelnost porovnávacích obrazců. Byly zde velice výrazné svislé tiskové proužky. Povrch vzorku byl pololesklý s nádechem do žluté barvy. U vzorku s vrstvou 0,1mm jsou rozeznatelné pruhy pouze svislého obrazce. Oproti vzorku PETG a PLA s výškou vrstvy 0,36 mm je jeho transparentnost konstantní. To by mohla způsobovat nižší výška vrstvy o 0,06mm.

Nejlépe z materiálu ASA a celkově druhý nejlepší nastavení tiskárny bylo při výšce vrstvy 0,3mm a hustotou výplně 0 %. Díky tomu bylo dosaženo konstantní průsvitnosti po celé délce vzorku. Svislé proužky kontrolního obrazce byly velmi dobře viditelné, podélné proužky byly viditelné méně. Vzorek má bílé barvení a pololesklý povrch. Nedošlo zde k viditelným svislým proužkům. I přes mírně zakalený vzhled je vzorek dobře transparentní a nedochází zde k takové míře lomu světla.

PETG

U tohoto materiálu bylo zjištěno, že se snižující se vrstvou tisku se zhoršují vlastnosti. Se stejným hodnocením skončil jak vzorek s hustotou výplně 0 % procent tak i s hustotou 100 %. Vzorek bez výplně neměl na rozdíl od druhého vzorku nekonstantní transparentnost plochy. Oba vzorky měly špatnou rozpoznatelnost svislých proužků testovacího obrazce. Podélné proužky nebyly rozpoznatelné vůbec. Nízká výška vrstvy dosáhla hladkého povrchu součástí a pololesklého až lesklého bílého vzhledu. Výtisk se 100 % hustotou výplně měl velmi výrazné svislé pruhy, které vznikají při tisku a docházelo i něj k velkému lámání světla.

S podobným výsledkem skončil i vzorek s výškou vrstvy 0,36 a hustotou 100 %. Ten při vyhodnocení obdržel pouze o jeden bod víc, a to zejména díky konstantní transparentnosti a absence svislých pruhů. Stejně tak jako vzorek se stejnou hustotou ale nižší vrstvou nedosahuje dostatečné rozpoznatelnosti podélných ani svislých pruhů obrazce. Povrch výtisku je pololesklý s drobným výskytem otřepů. Vzorek působí velice zakaleným dojmem.

S nejlepším hodnocením dopadl vzorek s hustotou výplně 0 % a výškou vrstvy 0,36mm. Jeho transparentnost byla konstantní. Taktéž se vyznačoval nejlepším rozlišitelností pruhů testovacího obrazce v obou směrech. Na vzorcích nebyly pozorovány svislé tiskové pruhy. Vzorek měl bílé zbarvení a lesklý povrch. Vzorek

měl nejvyšší transparentnost ze všech testů. Pozorování pod úhlem bylo kritickým faktorem testu těchto parametrů.

Shrnutí

Z testu vzorků bez povrchové úpravy vyplývá, že vzorky s nulovou hustotou výplně měly lepší transparentnost než vzorky s hustotou 100 %. U vzorků s nižší výškou vrstvy častěji a ve větší míře objevovala nekonstantní transparentnost v horní a spodní části. U vzorků s nižší vrstvou se ve větší míře objevovaly svislé pruhy, které vznikají při tisku. U vyšší vrstvy byly pozorovány jen u vzorku z materiálu ABS – T s výškou vrstvy 0,3 mm. Svislé vrstvy se u vzorků s nejnižší vrstvou byly nejvýraznější u hustoty výplně 100 %.

Oba kruhy testovacího obrazce byly dobře pozorovatelné pouze u vzorku z PETG, 0,36 mm a 100 % hustoty výplně. Svislé vrstvy byly většinou částečně nebo dobře viditelné. Výjimečně byly pouze slabě viditelné nebo téměř neviditelné.

Dalším důležitým faktorem bylo zbarvení materiálu. U vzorků z PLA bylo potvrzené zabarvení do žluta. Ta nebyla u všech vzorků z tohoto materiálu stejná a intenzita zbarvení se lišila. Materiály ABS – T a PETG měly velice podobné zbarvení do sněhově bílé barvy. Některé varianty ABS – T měly zbarvení do lehce nažloutlé barvy.

Vzorky měly také různou úroveň lesku. Ta se pohybovala ve všech různých úrovních od matného až do zcela lesklého povrchu. Na rozdíl od předchozích vlastností neměl lesk žádný spojujatel mezi jednotlivými materiály nebo úpravami.

Nejlepší hodnocení obdržel vzorek z PETG, 0,36 mm s hustotou výplně 100 % a ten díky dobré vizuální transparentnosti, tedy dobré rozlišitelnosti pruhů obrazce a také absence svislých tiskových vrstev.

Tabulka 1 Vizuální vyhodnocení vzorků bez povrchové úpravy

Parametry			Vyhodnocení	
Materiál	Výška vrstvy	Hustota výplně	Povrchová úprava	Vyhodnocení
PETG	0,1	0 %	-	3
PETG	0,1	100 %		3
PETG	0,36	0 %		8
PETG	0,36	100 %		4
ASA	0,1	0 %	-	5
ASA	0,1	100 %		6
ASA	0,3	0 %		7
ASA	0,3	100 %		3
PLA	0,1	0 %	-	6
PLA	0,1	100 %		2
PLA	0,36	0 %		6
PLA	0,36	100 %		2

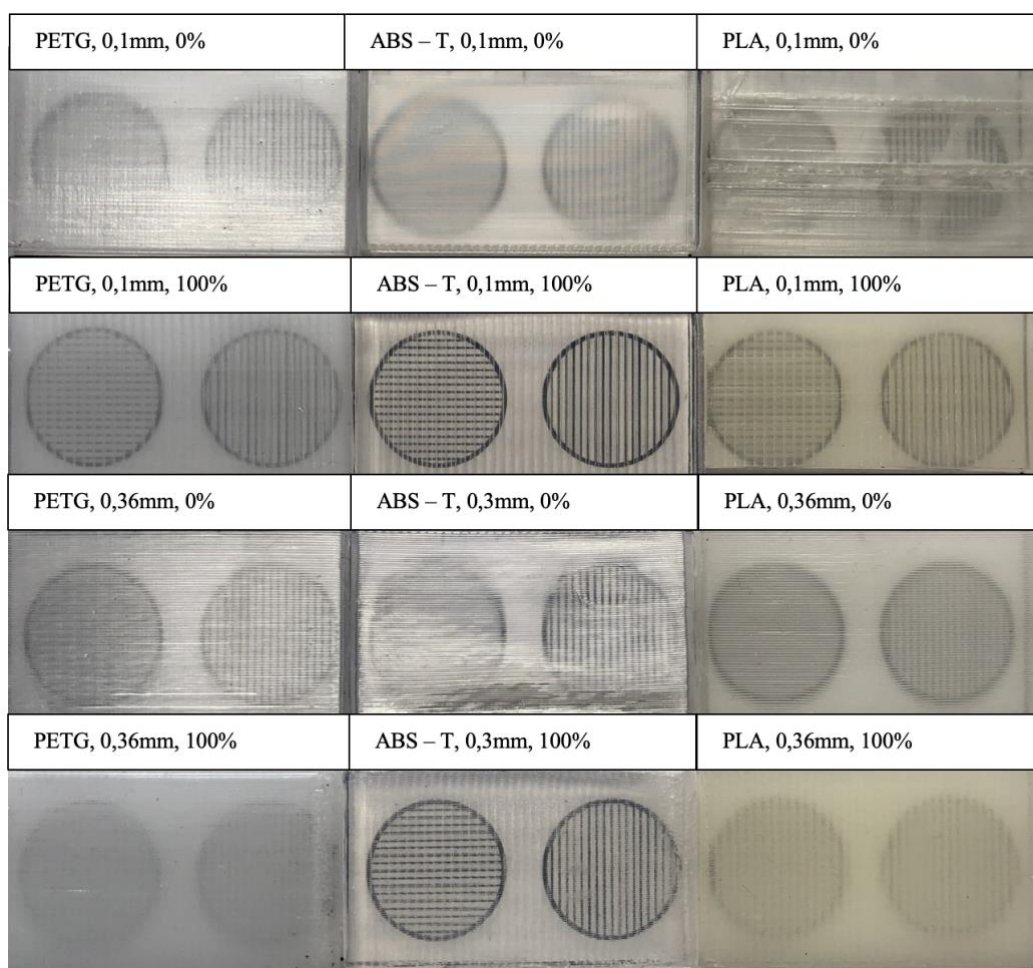
V další fázi byly provedeny testy byly provedeny povrchové úpravy. Všechny vzorky byly postupně obroušeny brusným papírem. Drsnost brusného papíru se měnila od nejhrubšího po nejjemnější. Byly použity papíry s drsnostmi 400, 800, 1200

a 2000. Broušení probíhalo s namáčením brusného papíru do vody. Díky této operaci bylo u vzorků s nižší vrstvou dosaženo zcela hladkého povrchu. U vzorků s vyšší vrstvou nebylo dosaženo hladkého povrchu. Tyto vzorky po broušení ztratily tak vysokou úroveň transparentnosti a působily matným a kalným dojmem. Proto bylo nutné znovu dosáhnout lesku a průsvitnosti.

Pro lesklý povrch byly vybrány dvě dokončovací metody. První metodou byla leptání vzorku pomocí napařování v acetonové komoře. Tato metoda je vhodná pouze pro materiál ABS – T. Materiály PETG a PLA by se při leptání acetonem deformovaly. Napařování probíhalo v průhledném boxu z polypropylenu. Na dno boxu se nalil aceton (do přibližné výšky 5 mm), vzorky byly umístěny na plechové vyvýšení, aby nedošlo k doteku s hladinou acetonu. Celý box se postavil vyhřívanou podložku 3D tiskárny, která byla vyhřátá na 70 stupňů celsia. Tím došlo k lepšímu efektu napaření a rychlejšímu procesu. Celý proces napařování trval 20 minut. Tiskárna s boxem musela být po celou dobu napařování pod dohledem, aby nedošlo k požáru.

Vzorky z materiálu PETG a PLA byly nalakovány bezbarvým lakem ve 3 vrstvách z obou stran.

Tyto vzorky byly následně v poslední fázi ohodnoceny stejným způsobem jako vzorky bez povrchové úpravy.



Obrázek 30 Srovnání vzorků s povrchovou úpravou

ABS – T

Vzorky s hustotou 0 % dopadly nejhorším hodnocením 1 bod, a to z důvodu deformace vzorku. Tenká stěna se při naleptání zkroutila a vytvořila na povrchu nerovnosti, proto změna transparentnosti nemohla být pozorována.

Naopak nejvyšší hodnotou byly po povrchové úpravě hodnoceny vzorky s hustotou výplně 100 %. U těch nedošlo k deformaci v důsledku leptání. Transparentnost byla přitom mnohonásobně vyšší, a to zejména u výšky vrstvy 0,1mm. Skrze testovaný vzorek byly obrazce bezproblémově čitelné, a to i podélné pruhy. Negativní efekt měly pouze pruhy, které vzniknuly při tisku, ty byly výraznější u nižší vrstvy. Vzorek s výškou vrstvy 0,3mm měl původně nekonstantní transparentnost. To se po úpravách změnilo a vzorek se stal konstantně transparentním.

Zbarvení zůstalo u všech vzorků neměnné. Vzorky s nižší vrstvou měly zcela hladký vzhled bez náznaku tištěných vrstev.

PLA

U vzorku s nejnižší hustotou a výškou vrstvy bylo zaznamenáno zlepšení po povrchové úpravě. Za kladný faktor lze považovat zmizení svislých tiskových vrstev a dosažení konstantní transparentnosti. V důsledku prasklin se lak dostal dovnitř vzorku

Poměrně velkého zlepšení bylo dosaženo u druhého vzorku PLA, 0,1, 100 %. Tento výsledek se podobal vzorkům s použitím technologie napařování. Bylo dosaženo konstantní transparentnosti v celé ploše vzorku. Tiskové obrazce byly zřetelně čitelné, a to v obou směrech. Povrchovou úpravou se nepodařilo odstranit nažloutlost (pouze ve slabé míře) ani viditelné svislé tiskové vrstvy. Vzorek měl oproti ABS – T vzorkům hrubý povrch.

Vzorek s vyšší vrstvou a nulovou hustotou byl téměř stejný jako vzorek bez opracování. Bylo dosaženo nižší hrubosti povrchu. Povrch byl v důsledku nalakování lesklý a méně nažloutlý.

Poslední vzorek dosáhl mírné změny oproti neupravené verzi. Zvýšila se úroveň transparentnosti na docela dobrou úroveň čtení svislých pruhů vyhodnocovacího obrazce. Podélné pruhy zůstaly nezměněné. Došlo také ke snížení žlutosti vzorku a zvýšení lesku.

PETG

U obou vzorků s výškou vrstvy 0,1mm došlo ke zlepšení transparentnosti.

Vzorek s nižší hustotou měl dobře čitelné svislé pruhy a zvýšila se u něj úroveň konstantnosti transparentnosti. Bílá barva a lesklý vzhled zůstaly zachovány.

Vzorek s vyšší hustotou se rapidně zlepšil. Po úpravách bylo možné bezproblémově pozorovat svislé vrstvy obrazce, podélné vrstvy byly viditelné téměř ve všech úhlech. Povrch byl téměř hladký a lesklý. Svislé tiskové pruhy nezmizely.

Vzorek s hustotou 0 % a výškou vrstvy 0,36mm byl po úpravách znatelně horší. Jeho transparentnost se radikálně změnila. Na porovnávacím obrazci byly čitelné pouze svislé pruhy. Konstantní transparentnost se nezměnila, došlo ale k zakalení vzorku. Lesk se po nanesení laku zvýšil.

Poslední vzorek z materiálu PETG se změnil pouze nepatrně. Bylo pozorováno zlepšení čitelnosti obrazce se svislými pruhy. V důsledku použití laku se zvýšil lesk. Vzorek byl méně kalný.

Souhrn

Vzorky upravené metodou napařování dosáhly nejlepšího výsledku ze všech variant. Tato metoda má několik problémových faktorů a tím je variace použitelných materiálů a tloušťka stěny. Jejich povrch je oproti lakování tvrdý a méně náchylný k rýhám.

Z lakovaných vzorků dopadly nejlépe ty s hustotou 100 % a výškou vrstvy 0,1 mm. Zde bylo dosaženo zlepšení konstantní transparentnosti, hladkého povrchu a dosažení viditelnosti podélných pruhů vyhodnocovacího obrazce.

U vzorků PLA bylo dosaženo nižší úrovně žlutého tónu materiálu, ale i přes to byla nažloutlost podstatně vyšší než u zbylých dvou materiálů.

Vzorky upravené pomocí napařování měly lepší úroveň drsnosti povrchu než vzorky upravené třemi nátěry bezbarvého laku. U lakování bychom mohli dosáhnout podobné drsnosti přidáním další vrstvy nátěru. Všechny vzorky lakované bezbarvým lakem zcela ztratily schopnost transparentnosti při pozorování pod úhlem. Vzorky upravené metodou napařování měly výbornou pozorovatelnost i při malém úhlu.

Nejhoršího výsledku bylo dosaženo u napařování dutých vzorků, dalším špatným výsledkem byl vzorek PETG, 0,36 mm, 0 %, který měl v hodnocení vzorků bez úpravy nejlepší hodnocení. Nejlépe dopadly oba vzorky ASA, 100 %, kde bylo dosaženo výborných vlastností. Negativním aspektem těchto vzorků byly svislé proužky.

Tabulka 2 Vizuální vyhodnocení vzorků s povrchovou úpravou

Parametry			Vyhodnocení	
Materiál	Výška vrstvy	Hustota výplně	Povrchová úprava	Výsledek
PETG	0,1	0 %	Broušení + lakování	4
PETG	0,1	100 %		7
PETG	0,36	0 %		5
PETG	0,36	100 %		5
ASA	0,1	0 %	Broušení + napařování	1
ASA	0,1	100 %		9
ASA	0,3	0 %		1
ASA	0,3	100 %		9
PLA	0,1	0 %	Broušení + lakování	3
PLA	0,1	100 %		8
PLA	0,36	0 %		6
PLA	0,36	100 %		4

3.3.3.1. Vyhodnocení testu intenzity světla

Vyhodnocení proběhlo na všech vzorcích, které byly hodnoceny vizuálním testem. Aby bylo dosaženo co nejpřesnější metody bylo měření několikrát opakováno. Z těchto opakování se vytvořila průměrná hodnota, která se zapsala do vyhodnocovací tabulky.

U vzorků bez post-processingu bylo dosaženo nejlepšího výsledku u vzorku PETG, 0,36 mm, 0 % hustoty výplně. Zde byla naměřena průměrná hodnota 24 lx. Tento vzorek dopadl nejlépe i ve vizuálním vyhodnocení. Naměřené hodnoty vzorků bez povrchové úpravy se výrazně nelišily. Výsledky se pohybovaly v rozmezí 11 až 17 lx. Jedinou odchylkou byl vzorek s neměřenou hodnotou intenzity světla 24 lx.

U vzorků s povrchovou úpravou byly naměřeny vyšší výsledky. Tedy v oblasti měření byla naměřena vyšší intenzita světla. Největší změna nastala u vzorků napařených v acetonové páře. Absolutně nejvyšší výsledek ze všech vzorků a úprav byl 56 lx a to u vzorku ABS – T, 0,1 mm a 100 % hustoty výplně. U něj bylo bez povrchové úpravy naměřeno 17 lx. Další velkou změnou byl druhý vzorek z materiálu ABS – T a hustotou výplně 100 %. Zde byla naměřena hodnota 39 lx, což je velká změna oproti neupravenému stavu, kde byla naměřena hodnota 14 lx. Zbývající dva vzorky z materiálu ABS – T dopadly také velmi dobře i při deformaci způsobenou při napařování.

3.3.9.2. Vyhodnocení testu a výběr materiálu

Cena všech tří materiálů od společnosti PM je téměř stejná. Materiál PETG a ABS-T stojí stejně, tedy 599 Kč za jeden kilogram, PLA je o něco nižší a jeho cena je 579 Kč za jeden kilogram materiálu. Proto nebude jeho cena mít na rozhodování vliv.

Z obou testů byly zhodnoceny výsledky do rozhodovací matice. Nebylo pravidlem, že vizuální hodnocení sedělo s naměřeným výsledkem intenzity světla. Některé hodnocené vlastnosti z vizuálního testu nemusely mít vliv na propustnost intenzity světla. Mezi tyto vlastnosti patří například žluté zbarvení, deformace stěn vzorku nebo svislé tiskové pruhy.

Z neupravených vzorků byl nejlépe hodnocen vzorek z materiálu PETG, výškou vrstvy 0,36 mm a hustotou výplně 0 %. Velkou výhodou je dosažení velmi dobrého výsledku bez nutnosti povrchové úpravy. Negativním aspektem je vysoká viditelnost vrstev a ztráta transparentnosti při pozorování pod úhlem. Tento vzorek se však transparentností ani vizuální stránkou nepřiblížil k nejlépe hodnoceným vzorkům s povrchovou úpravou.

Tabulka 3 Celkové hodnocení testovaných vzorků bez povrchové úpravy

Parametry			Vyhodnocení		
Materiál	Výška vrstvy	Hustota výplně	Vizuální	Propustnost světla lx	výsledek
PETG	0,1	0 %	3	12	15
PETG	0,1	100 %	3	16	19
PETG	0,36	0 %	8	24	32
PETG	0,36	100 %	4	11	15
ASA	0,1	0 %	5	13	18
ASA	0,1	100 %	6	17	23
ASA	0,3	0 %	7	15	22
ASA	0,3	100 %	3	14	17
PLA	0,1	0 %	6	16	22
PLA	0,1	100 %	2	11	13
PLA	0,36	0 %	6	15	21
PLA	0,36	100 %	2	13	15

Z testovaných vzorků z materiálu ABS – T měly oba velmi podobné výsledky. Vzorek s nižší vrstvou měl v testu intenzity nejlepší výsledky. Tato hodnota se nejvíce přiblížila hodnotě měření bez vzorku. Nicméně z vizuálního hlediska bylo

velmi negativně nahlíženo na svislé pruhy na vzorku, které byly při vyhodnocení velmi viditelné. Ani jeden ze vzorků nebyl dokonale transparentní.

Tabulka 4 Celkové hodnocení testovaných vzorků s povrchové úpravy

Parametry			Vyhodnocení upravené součásti		
Materiál	Výška vrstvy	Hustota výplně	Vizuální	Propustnost světla lx	výsledek
PETG	0,1	0 %	4	19	23
PETG	0,1	100 %	7	23	30
PETG	0,36	0 %	5	28	33
PETG	0,36	100 %	5	17	22
ASA	0,1	0 %	1	29	30
ASA	0,1	100 %	9	56	65
ASA	0,3	0 %	1	25	26
ASA	0,3	100 %	9	39	48
PLA	0,1	0 %	3	12	15
PLA	0,1	100 %	8	18	26
PLA	0,36	0 %	6	27	33
PLA	0,36	100 %	4	19	23

Na základě všech poznatků, vyhodnocení a naměřených hodnot byl pro výrobu horní části převodové skříně vybrán materiál ABS – T. Hustota výplně byla stanovena na 100 %, tedy součást zcela vyplněna materiálem. Jelikož ani jedna výška vrstvy nedosahovala perfektních výsledků, bylo rozhodnuto, že se dojde ke kompromisu. Abychom dosáhli co nejnižší úrovně svislých pruhů při zachování co nejlepších vlastností transparentnosti, byla vybrána výška vrstvy 0,2mm. Tedy střed obou vyhodnocovacích výšek. Protože bylo ověřeno, že rychlost tisku má značný vliv na kvalitu transparentnosti, bylo rozhodnuto, že nebude rychlost navýšena za docílením rychlejší výroby součástí.

3.4. Výroba modelu

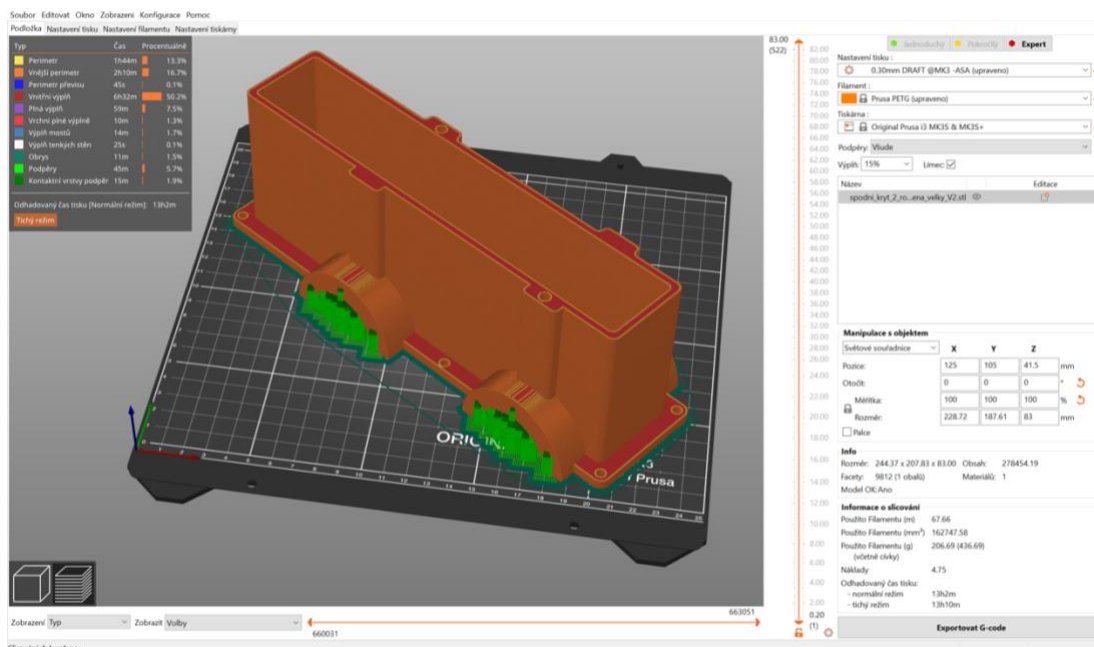
3.4.1. Tiskárna Prusa

Pro výrobu všech součástí byla použita 3D tiskárna od značky Prusa. Jednalo se o model Prus MK3S+ s velikostí tiskové plochy 250x210x200 mm. Konstrukce převodovky byla vytvořena tak, aby bylo možné jí pohodlně vytisknout na tomto modelu tiskárny. Tato tiskárna je největším a zároveň nejnovějším modelem od této společnosti. Model se pyšní možností tisku široké škály termoplastů. Tiskárna zvládá tisk s teplotou trysky do 300 °C a s maximální teplotou tiskové podložky až 120 °C. Lze na ní tisknout součásti s výškou vrstvy od 0,05 mm až do 0,36 mm.

3.4.2. Příprava programů pro 3D tisk /slicer

V Sliceru se připravují součásti pro následný tisk na 3D tiskárně. Dochází v něm k převedení modelu součásti ve formátu STL na gcode, který je podporovaný tiskárnou. V programu lze nastavit širokou škálu parametrů, které při správném

zvolení zajistí bezproblémový a dobře vypadající výtisk. Kromě parametrů, kterými nastavujeme teplotu, rychlost nebo hustotu výplně se v programu dá nastavit rozmístění modelů na podložku nebo jejich orientaci v programu. Existuje několik takových to programů. Mezi nejčastěji využívané patří PrusaSlicer, Cura nebo Sli3r. Jelikož byly všechny součásti vyrobeny na tiskárně od společnosti Prusa, byl využit PrusaSlicer, který dokáže pracovat přímo s vybraným modelem tiskárny a také má širokou databázi filamentů, které jsou běžně k dostání na českém trhu.



Obrázek 31 Pracovní prostředí programu PrusaSlicer

3.4.3. Příprava tiskárny před tiskem

Výroba součástí na 3D tiskárně je velmi náchylná na jakékoliv nedokonalosti. Je důležité mít správně kalibrovanou podložku, a to bylo především důležité při tisku velkorozměrových součástí. Byla provedena kalibrace osy XYZ a kalibrace první vrstvy. Pokud by nebyla tiskárna řádně zkalibrovaná, mohlo by docházet ke zvedání modelu z podložky, nebo oddělování vrstev modelu. Při začátku samotného tisku je vhodné si zkontrolovat nanášení první vrstvy a případně doladit výšku osy Z. Při tisku první vrstvy dochází nejčastěji k problémům a odhalení problému při nanášení první vrstvy nám může ušetřit spoustu času a spotřebovaného materiálu.

Kromě kalibrace podložky, která je doporučena jednou za čas nebo v případě výměny dílců či problémů s tiskem, je také nutné vhodné provést úpravy před začátkem každého tisku. Ačkoliv je podložka vyhřívaná a měla by zabraňovat tepelným deformacím, které vznikají vlivem ochlazování součástí, může přesto docházet k odlepení tisknuté součásti od vyhřívané podložky. Jednou z možností, jak předejít odlepení od podložky, a to především u dlouhých úzkých součástí (malá dotyková plocha mezi součástí a podložkou), je vytištění vrstvy podpurného materiálu neboli raftu. Tento podpurný materiál zvětšuje kontaktní plochy mezi součástí a podložkou. Po dokončení tisku lze raft snadno odstranit pomocí kleští. Raft je sice velmi efektivní řešení, ale není vhodné pro součásti, kde je kladen důraz na kvalitu plochy, která je kontaktní plochou mezi součástí a podložkou. Zde totiž může dojít k horší kvalitě povrchu.

Přilnavost tiskové podložky lze zvýšit pomocí takzvaného ABS juice. Ten se nanáší přímo na tiskovou podložku. Zde tvoří vrstvu, která přispívá k lepší

přilnavosti. Jedná se o rozpuštěné kousky filamentu ABS a roztoku acetonu. Lze také využít fólii nebo pásku, která se nalepí na tiskovou podložku. Aplikace pásky nebo fólie musí být provedena velice pečlivě, aby nedocházelo k výskytu bublin a deformaci součástí.

Další možností, jak zvýšit přilnavost mezi součástí a podložkou je použití tuhého tyčinkového lepidla. Lepidlo se nanáší na nezahřátou tiskovou podložku v jedné vrstvě (několik pruhů těsně vedle sebe nebo lehce přes sebe). Tato metoda je velmi oblíbená z důvodu snadné aplikace, absence zápachu, nízká cena. Po dokončení tisku se součást odlepí z podložky a vrstva lepidla se snadno odstraní pomocí teplé vody. Výhodou tohoto řešení je jeho možnost opakovaného použití (jednu vrstvu lze použít opakovaně pro více výtisků). Metodu nanesení vrstvy tuhého lepidla lze použít pro většinu běžně používaných materiálů filamentu (ABS, PLA, PETG, dřevo, ASA). Bylo zvoleno lepidlo Tesa Easy Stick.



Obrázek 32 Tisková podložka s aplikovanou vrstvou tuhého lepidla

3.4.4. Tisk modelu

Z důvodu různorodosti využití jednotlivých součástí byly pro ně zvoleny různé tiskové podmínky. Bylo nutné zohlednit veškeré nástrahy, které mohly způsobit potíže jak při samotném tisku součást, tak i při jejím provozu. Nezbytně musel být brán v úvahu tvar součástí a uzpůsobit tomu využití a rozvržení tištěných podpěr. Cílem bylo navrhnout tisk tak, aby byl co nejehospodárnější, co se týče spotřebovaného materiálu, ale také tiskového času a s tím spojené využití energie. To tedy znamená nastavení například tiskové vrstvy na co největší možnou úroveň nebo nastavení co nejmenší možné výplně, kterou nám daná součást dovolí. Bylo však nutné dbát na primární účel součásti a neohrozit takovýmto snižováním spotřeby její mechanické vlastnosti či vzhled součásti.

Téměř každá součást modelu má specifické nastavení tiskových parametrů. Pro lepší přehled byla vytvořena tabulka, kde jsou parametry pro jednotlivé součásti popsány. První parametry, uvedené v tabulce se týkají nastavení výplně součásti. Jedná se o zvolení druhu výplně a hustota zvolené mřížky. Jelikož se součásti vyrobené metodou 3D tisku nevyrábí s plnou výplní z důvodu úspory spotřeby materiálu a především času. I tak existují výjimky, kde je použití 100 % výplně nezbytné. V případě této převodové skříně se jednalo o horní kryt převodové skříně a s tím i spojené tisknutí zkušebních kvádrů. Plná výplň byla také využita pro tisk

pojistných kroužků z materiálu PETG. U zbytku součástí byla zvolena menší hustota než u horního krytu. Byla použita hustota vnitřní výplně v rozmezí 15–100 %. Všechny součásti kromě těch s hustotou výplně 100 % byla využita výplň ve tvaru plástve.

Dalším důležitým parametrem, který je vypsán v tabulce je výška tiskové vrstvy. Ta byla zvolena na základě požadavku detailnosti jednotlivých součástí. Hodnota se pohybovala mezi 0,15 mm až 0,25 mm.

Posledním podstatným parametrem byla teplota tiskové desky a tiskové trysky.

Tabulka 5 Přehledová tabulka tiskových parametrů

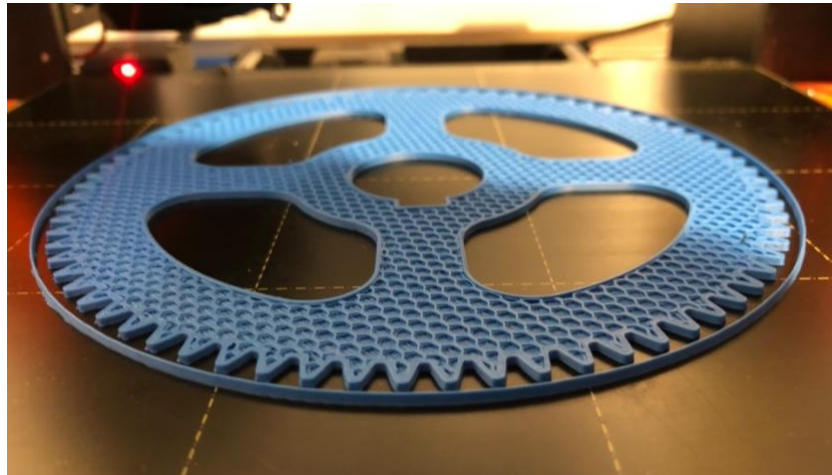
Součást	Materiál	Husota výplně	Výška vrstvy[mm]	Teplota podložky [°C]	Teplota trysky [°C]
Převodová skříň spodní část	PETG	15%	0,2	90	250
Základna	PETG	15%	0,2	90	250
Pojistné kroužky	PETG	100%	0,15	90	250
Převodová skříň horní část 1	ABS - T	100%	0,2	110	255
Převodová skříň horní část 2	ABS - T	100%	0,2	110	255
Pastorek	ASA	25%	0,25	113	264
Ozubené kolo	ASA	25%	0,25	113	264
Hřídel 2x	ASA	20%	0,2	113	264
Příruba	ASA	10%	0,2	113	264
Příruba hřídel	ASA	10%	0,2	113	264
Držák motoru	ASA	10%	0,2	113	264
Držák spouštěcího tlačítka	ASA	20%	0,2	113	264
Kuželové kolo motor	ASA	20%	0,15	113	264
Kuželové kolo vstup. hřídel	ASA	20%	0,15	113	264
Pero (označení)	ASA	20%	0,15	113	264
Pero (označení)	ASA	20%	0,15	113	264

3.4.4.1. Ozubená kola

Čelní soukolí

Jako první součást, která byla z celé sestavy vytištěna, bylo převodové kolo na vstupní hřídeli. Tento tisk proběhl na první pokus bez potíží a mohl být použitý do konečného modelu. Dříve než bylo vytisknuto ozubené kolo, byla za účelem ověření přesnosti tisku vytištěna výstupní hřídel. Toto pořadí bylo zvoleno, aby došlo k ověření montáže kola na hřídel a zároveň nemuselo dojít k tištění jedné ze součástí znovu. Využití této metody se ukázalo jako zásadní, jelikož se vnitřní průměr kola neshodoval s průměrem na hřídeli a nemohlo dojít k nasazení kola na hřídel. Proto při tištění ozubeného kola byl otvor pro hřídel zvětšen o hodnotu 0,25 mm. To bylo zvoleno na základě přeměření hřídele a kola posuvným měřítkem.

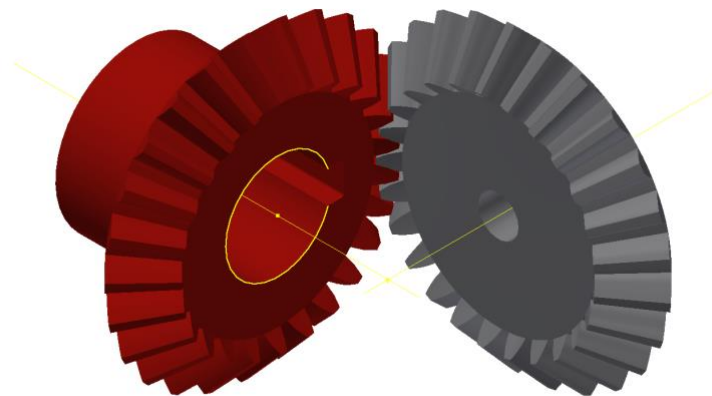
Tisk ozubeného kola na výstupní hřídeli patří mezi větší součásti, a protože byl zvolen materiál pro jeho výrobu typu ASA, hrozilo zde možné zvednutí součásti z podložky nebo oddělení jednotlivých vrstev v důsledku tepelné roztažnosti a nestability teploty okolí. Ozubené kolo i zbytek vyráběných součástí nebyl tisknutý na tiskárně v laboratoři, a proto nebylo možné udržovat v prostoru tiskárny stabilní teplotu. Abychom předešli těmto chybám, bylo kromě nanesení tuhého lepidla na tiskovou podložku využito takzvaného ochranného štítu. Ten by měl součásti poskytnout částečnou ochranu před průvanem a změnou teploty. I přesto, že se ochranný štít při tisku v některých částech oddělil, nedošlo ke zhroucení štítu do tisknutého modelu a tisk součásti byl dokončen. První vrstva byla vytištěna dobře, ale v průběhu tisku došlo k jejímu lehkému zvednutí v jedné krajní části z důvodu teplotní roztažnosti. Tato chyba je ovšem pouze vizuální a na funkčnost ozubeného kola nemá větší vliv. Proto bylo toto kolo využito pro finální model.



Obrázek 33 Proces tisku ozubeného kola

3.4.4.2. Kuželová soukolí

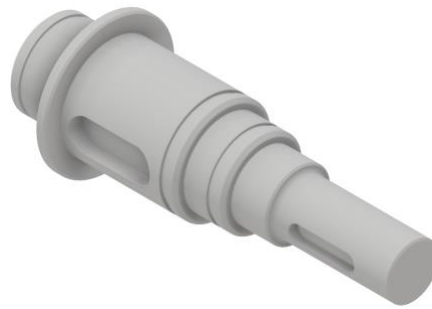
Při tisku kuželových soukolí už bylo počítáno s potřebnou vůlí oproti průměru hřídele. Tyto dvě kola zajišťují přenos hnacího momentu elektrického motoru na vstupní hřídel převodovky. Obě kola mají velmi podobný design, který je odlišný v průměru pro hřídel. Musely zde být využity podpěry, aby mohlo dojít k výtisku kola. Ty bylo nutné po dokončení tisku odstranit.



Obrázek 34 Kuželové soukolí

3.4.4.3. Hřídel

Obě hřídele, které byly použity u sestavy převodovky, jsou designově velmi podobné a jedinou odlišností je jejich zakončení. Hřídel vstupního kola má konec uzpůsobený pro připevnění kuželového kola. To přenáší krouticí moment na hřídel pomocí těsného pera. Pro zajištění kuželového kola na hřídeli je využito pojistného kroužku. Výstupní hřídel je zakončen normovaným koncem hřídele. Podpěry byly využity v celé délce součástí, aby došlo k správnému vytištění kritických míst, jako jsou například zápichy pro pojistné kroužky či drážka pro pero. Vstupní hřídel byla vytištěna s vůlí 0,25 mm pro průměr pod čelní ozubené kolo a pro průměr pod kuželovým kolem.



Obrázek 35 Výstupní hřídel

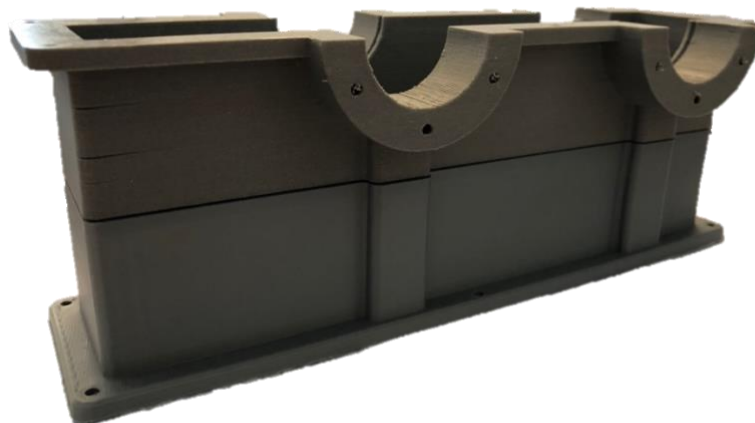
3.4.4.4. Převodová skříň

Spodní část převodové skříňe

Převodová skříň tvoří kostru, ve které jsou všechny pohyblivé a funkční součásti umístěny. Proto zde nejsou kladeny velké nároky na tisknuté detaily. Spodní část převodové skříňe je přichycena k podložce. Z důvodu velkých rozměrů součásti bylo velice složité dosáhnout správného a bezchybného výtisku. Z důvodu velikosti součásti byla zvolena výška jedné tiskové vrstvy. Hned při prvním pokusu se objevil problém s odlepováním první vrstvy. To se dá vysvětlit hned několika způsoby. První možností je zvolený materiál. I když ASA zvládá tepelné změny lépe než materiál ABS, je to stále velmi náchylný materiál. Dalším aspektem zvedání by mohlo být tisknutí součásti přes celou plochu tiskového prostoru. I přes kalibrace není tisková podložka vždy v jedné rovině a při dlouhé součásti se takováto nesrovnalosti projeví zvednutím první vrstvy nebo oddělením vrstev. Problém s rovinností se dá eliminovat kalibrací osy Z a kalibrací první vrstvy. Na podložku bylo také aplikováno tuhé lepidlo, aby se zvýšila přilnavost součásti. Při dalších pokusech se zvedání podložky eliminovalo nebo se neobjevilo vůbec. Objevil se ale problém s oddělováním vrstev. Tento problém úzce souvisí s teplotou. Vyhřívání podložka, která udržuje teplotu součásti nedokáže vyhřát celou výšku součásti. Zvýšením teploty podložky nebylo dosaženo uspokojivého výsledku.

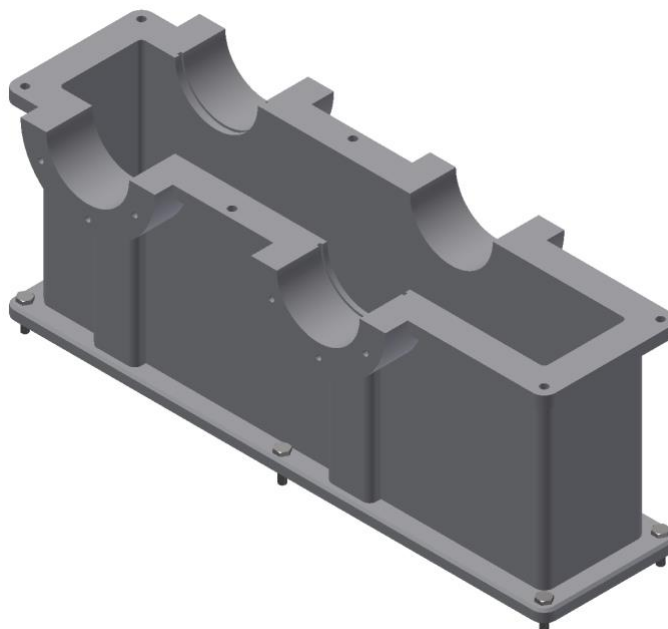
Bylo nutné zajistit vyšší konstantní teploty v tiskovém prostoru. Toho bylo dosaženo umístěním tiskárny do boxu. To nakonec problém s praskáním vrstev snížilo až na přijatelnou mez. Před tím ale bylo nutné vyřešit problém s ucpáváním trysky. Tiskárny Prusa nejsou vhodné do uzavřeného boxu, a to z toho důvodu, že velké množství dílců je vytisknuto z termoplastů (ASA, PLA, PETG). Při zvýšení teploty v tiskovém prostoru dochází k natavení součástí a jejich disfunkci. Docházelo tedy k problémům s podáváním materiálu. Také v důsledku tisku zvýšenou teplotou, která je doporučena pro materiál ASA, se zahříval extruder i v oblasti „coldend“. Tedy docházelo k předčasnému nastavení materiálu a následnému ucpání. Bylo tedy nutné zajistit dostatečné odvětrávání boxu. Box byl tedy částečně otevřen v horní části. Při tvorbě ideálních tiskových podmínek bylo vyzorováno, že na tisk v boxu měla vliv i teplota v místnosti, kde byl box s tiskárnou umístěn. Dostatečným odvětráním a umístěním boxu do chladnější místnosti bylo dosaženo dostatečných podmínek pro tisk. V boxu byl naměřena konstantní teplota $29^{\circ}\pm 1^{\circ}$. I přes všechny opatření byla pro co nejlepší výsledek spodní část převodové skříňe rozdělena na dvě části. Tyto dvě části byly po vytištění slepeny pomocí technologie naleptání acetone. Pro správné zabočování byly využity vytištěné čepy. Jak se po slepení

součástí ukázalo, tak tisknutí skříně na dvě části usnadnilo tisk, ale mělo zásadní vliv na konečný vzhled skříně. Proto bylo od původního záměru tisku skříně z materiálu ASA odstoupeno a tento materiál byl nahrazen materiálem PETG, který zvládá tepelné vlivy mnohem lépe. Se změnou materiálu ale muselo dojít ke zrušení plánované povrchové úpravy.



Obrázek 36 Dělená převodová skříň

Materiál PETG nelze naleptat pomocí acetonu (jako například ASA nebo ABS). Podobná povrchová úprava lze provést pomocí rozpouštědla dichlormethan. Vzhledem k tomu, že převodovka nebyla vyráběna v laboratorním prostředí a dichlormethan se řadí mezi nebezpečná rozpouštědla, bylo od takového způsobu upuštěno a materiál zůstal surový, pouze s úpravou odstranění tiskových podpor.



Obrázek 37 Model převodové skříně

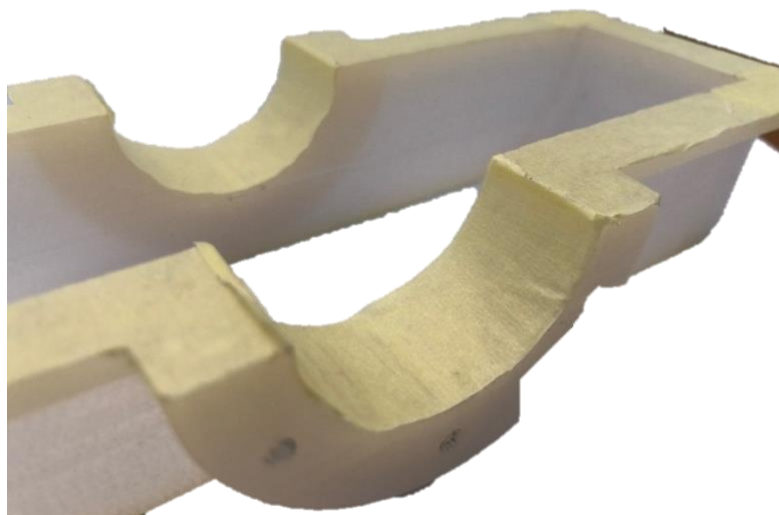
Horní část převodové skříně

Na základě zkušeností získaných v testu transparentnosti byl zvolen materiál ABS – T pro vytisknutí horní části převodové skříně. Ta je složená ze dvou částí. Díky rozdělení horní části lze do skříně nahlédnout. První část je napevno ukotvena ke spodní části skříně pomocí šroubků a matic. Spojením těchto dvou částí dochází k vytvoření uložení pro kuličková ložiska.

Druhá část horní skříně je spojená s první částí pomocí malých magnetů. Pro skříň byl navržený design, který kopíroval profil ozubených kol. Při tisku se ale ukázalo, že tvar součásti je velice složitý pro vytisknutí a docházelo ke špatnému vzhledu součásti. Proto musel být design upravený tak, aby umožnil tisk skříně vzhůru nohama a bez nutnosti tisku podpěr. Konečný design skříně má na horní straně rovnou plochu, která při tisku tvořila tiskovou základnu. Z této základny vychází křivky, které pod zvoleným úhlem směřují k spodní části tiskárny. Aby byl zajištěn výtisk bez problému, byly u čelní a zadní strany vynuceny podpěry, které byly následně odstraněny.

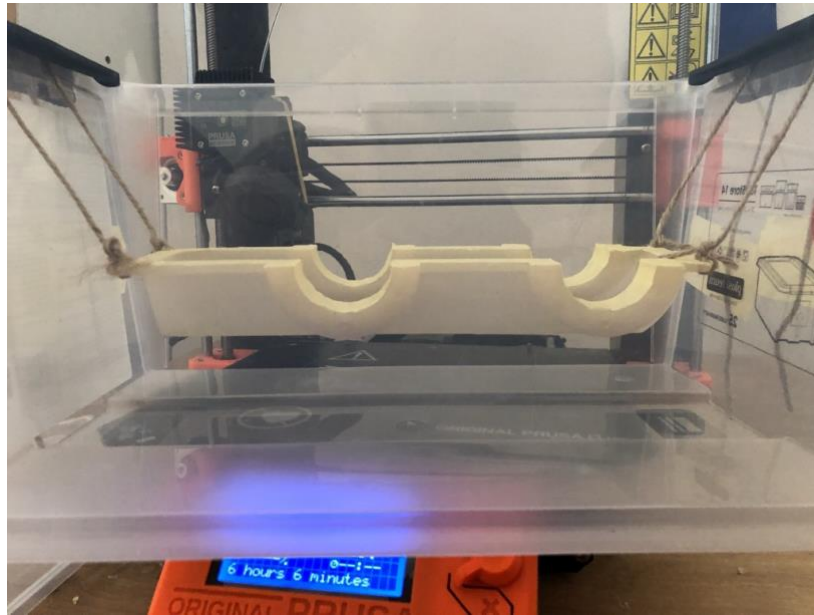
Povrchová úprava

Zkušenosti nabyté v testu transparentnosti 3.3 napomohly k dosažení co nejlepší možné úrovně transparentnosti. Povrch součásti byl obroušen pomocí brusných papírů (hrubost 400, 800, 1200 a 2000). Následně byly součásti oblepeny malířskou lepicí páskou v místech, kde nemělo dojít k naleptání materiálu. Jedná se o dosedací plochu skříně a uložení pro ložiska. Při napařování mění součást rozměr a bylo by zde riziko, že skříň nepůjde smontovat.



Obrázek 38 Připravený model skříně pro leptání acetonem

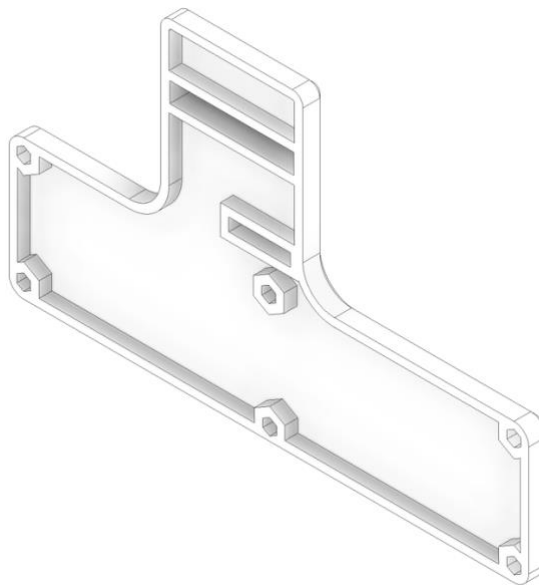
Následně byly součásti umístěny do napařovací komory. Do spodní části komory byl nalit aceton. Proces napařování byl urychlen zahřátím ředidla pomocí tiskové podložky 3D tiskárny.



Obrázek 39 Součást umístěná v napařovací komoře

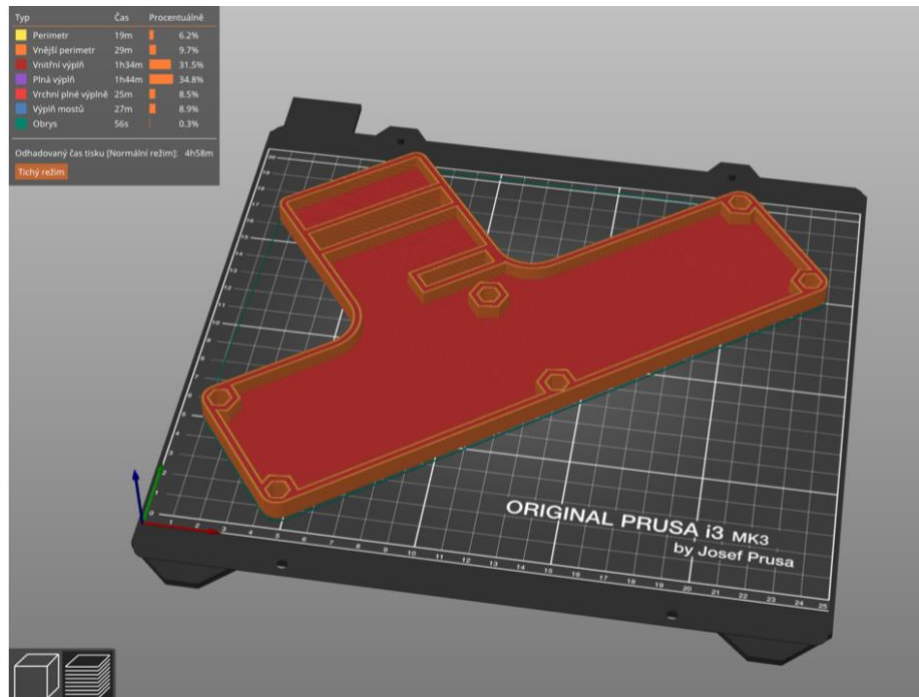
3.4.4.5. Základová deska

Základová deska tvoří konstrukci celého modelu. Slouží ke správnému „zapolohování“ převodové skříně, držáku na motor a držáku na tlačítko. Aby došlo ke správnému usazení, byly v desce vytvořeny otvory pro protikus ukládané součásti. Celá základna je z důvodu ušetření materiálu vykonstruována jako skořepina. Pro uložení převodové skříně pomocí šroubového spoje byla na spodní straně vytvořena zapuštění pro matice.



Obrázek 40 Základna

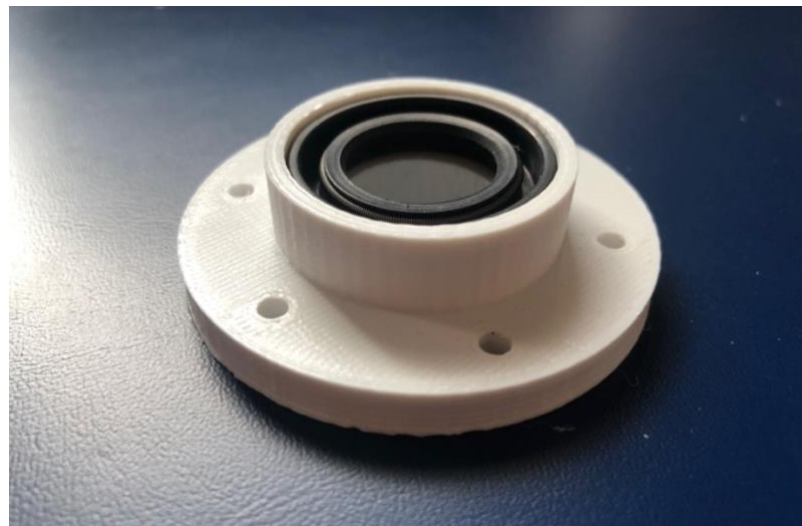
Z důvodu velikosti byla využita celá pracovní plocha tiskárny. Proto byl také využit materiál PETG, který je vhodný pro tisk na velké ploše tiskárny díky odolnosti proti změně teploty. Tisk byl navržen tak, aby nemusela být součást dodatečně opracována. Jelikož byla součást tištěna přes velkou plochu tiskárny, došlo i přes přizpůsobení materiálu v důsledku nerovností tiskové plochy k nedokonalostem. Ty byly pouze vizuální, a proto byla součást použita.



Obrázek 41 Příprava tisku základny

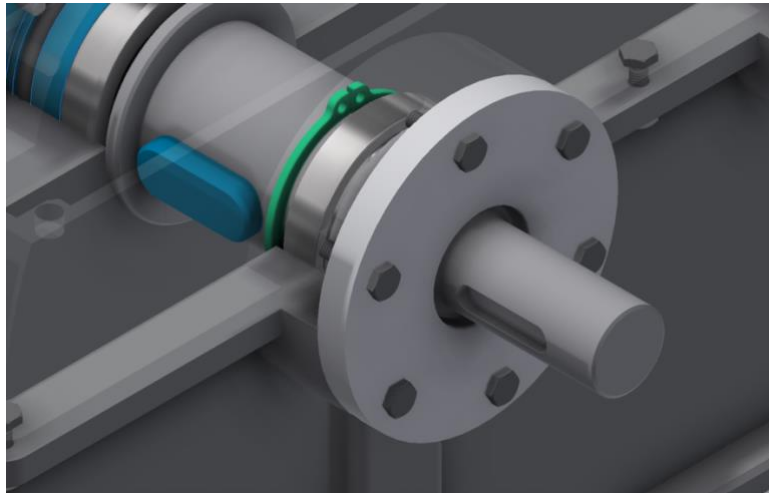
3.4.4.6. Příruba

Příruba byla navržena ve dvou provedeních, kde jedna byla navržena jako plně uzavřená se zápichem pro těsnící kroužek. Tato příruba slouží k uložení axiálně vodícího ložiska. Druhé provedení bylo s otvorem pro vstupní a výstupní hřídel. Design je také rozdílný, aby umožnil použití těsnění gufero.



Obrázek 42 Víko s guferem

Příruba je ke skříni připevněna pomocí šroubů. Součást byla navržena a tisknuta tak, aby bylo použito minimum podpěr a byly tedy použity jen pro správné vytisknutí zápichu pro pojistný kroužek.



Obrázek 43 Uložení výstupní hřídele

3.4.4.7. Držák motoru

Protože je převodovka z důvodu lepší demonstrace vybavena elektrickým pohonem, byl navržený držák, který zajišťuje dostatečně pevné uložení motoru. Držák je přilepený ke společné základně pomocí technologie lepení.

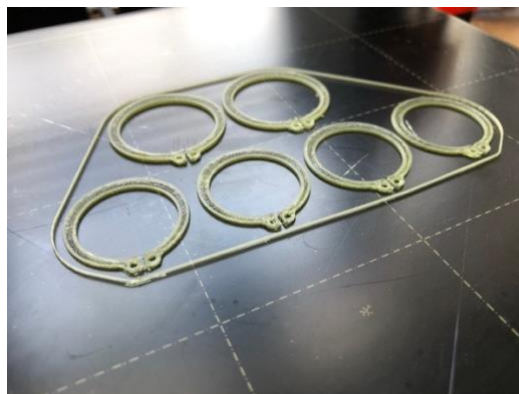
Tisk byl bezproblémový. U součásti byla provedena post produkce odstraněním podpěr, které byly zvoleny v odlehčení a odvětrání držáku.



Obrázek 44 Držák motoru

3.4.4.8. Pojistné kroužky

Pojistné kroužky jsou jedinou součástí, která byla vytištěna z materiálu PETG.



Obrázek 45 Dotištěné pojistné kroužky

3.4.4.9. Těsná pera

Těsná pera, které přenáší krouticí moment z hřídele na kolo byly vytištěny na 3D tiskárně z materiálu ASA.

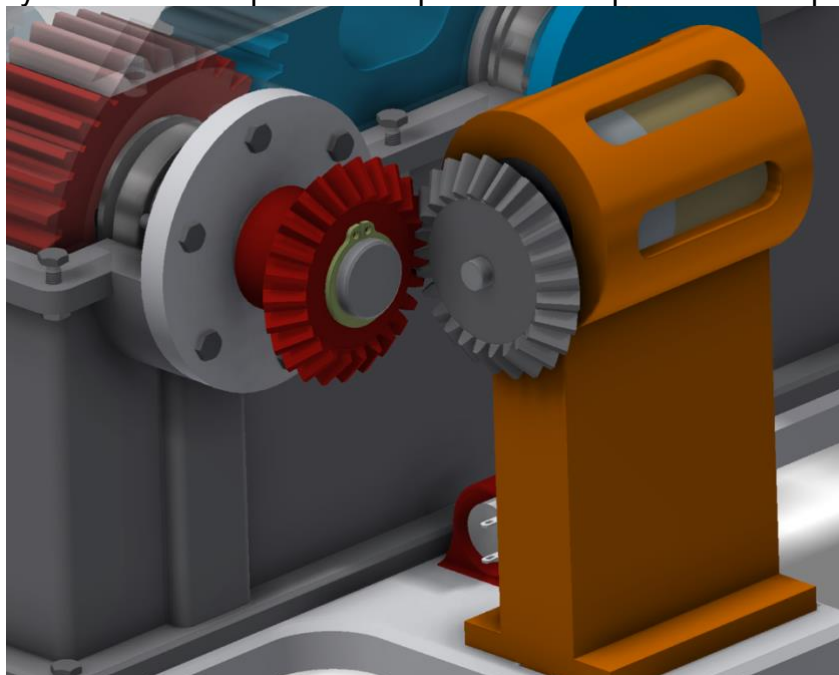


Obrázek 46 Dotištěná těsná pera

3.4.4.10. Nakoupené komponenty

Pohon

K pohonu převodové skříně byl zvolený DC elektromotor, který má napětí 12 V a otáčky 500 RPM. Krouticí moment motoru je v poměru 1:1 přenesen pomocí šikmé ozubení z hřídele motoru na vstupní hřídel převodovky. V převodovce se následně otáčky tohoto motoru převádí dle převodového poměru viz kap.3.2.



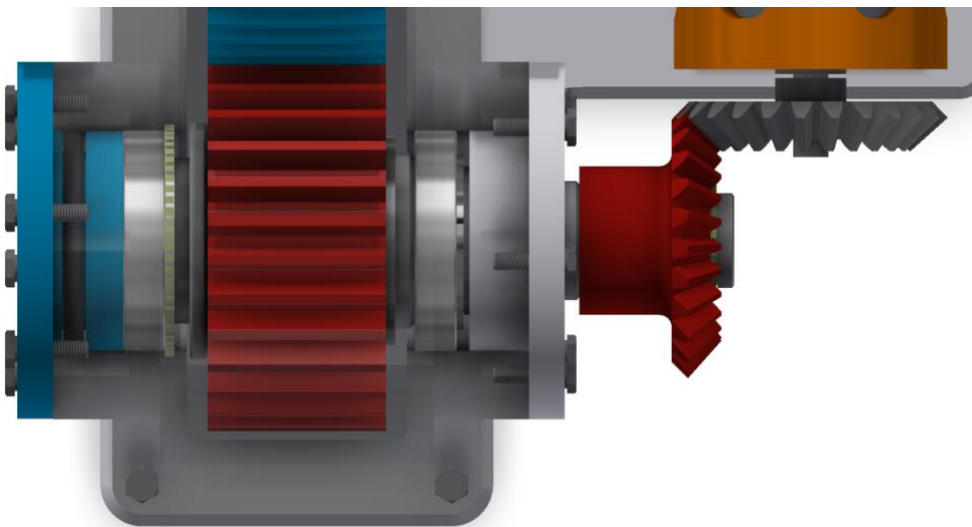
Obrázek 47 Sestava pohonu se vstupní hřídelí

3.4.5. Kompletace

Nejprve bylo nutné zkompletovat převodovku, která byla z důvodu tisku bez podpor rozdělena na dvě části. Ta byla spojena pomocí metody lepení. Po ztvrdnutí lepidla byla spodní část převodové skříně připojena k základně pomocí šroubového spoje M3. Následně byly k základně připojeny zbylé součásti. Držák motoru i držák spouštěcího tlačítka byly k základně přilepeny pomocí technologie lepení. Motor i tlačítko byly nalepeny do držáků ještě před nalepením na základovou desku.

Následně byly sestaveny obě hřídele se všemi komponenty. Do hřídelí byly vloženy pera a následně nalisovaná ozubená kola. Ty byly zajištěny pomocí pojistného kroužku. Po nalisování ozubených kol byla nalisována kuličková ložiska, která se následně zajistila pomocí pojistných kroužků. Na vstupní hřídel bylo stejným způsobem uloženo kuželové ozubením.

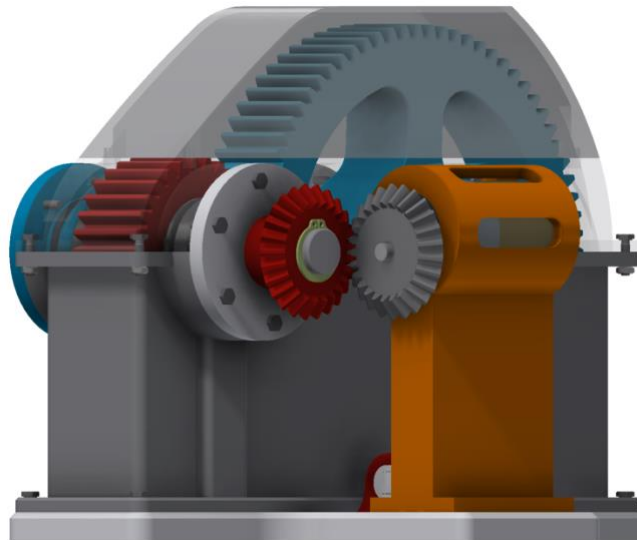
V dalším kroku byly hřídele uloženy do přibližné pozice ve skříní. Poté byla přiložena horní část skříně a po ustanovení do správné pozice a zajištění ložiska vnitřním pojistným kroužkem byla pomocí šroubového spoje M3 připevněna k spodní části převodové skříně.



Obrázek 48 Uložení vstupní hřídele

Do vytištěných vík bylo navlečeno a nasazeno těsnění. Tato víka byla připevněna ke skříní převodovky pomocí šroubů M3.

V závěrečné fázi byl propojen elektromotor se spínacím tlačítkem a konektorem. Pro správné zaběhnutí byla převodovka uvedena do chodu na několik hodin.



Obrázek 49 Sestava jednostupňové převodovky

3.4.6. Ekonomické zhodnocení

Pro zjištění celkové ceny byla vytvořena rovnice, která nám dává součet celkových nákladů na jednotlivé položky.

$$N_c = N_T + N_M + N_{PP} + N_S + N_{CLP} + N_L + N_p + N_{OP} \quad (3.16)$$

Kde:

N_C [Kč] – Celkové náklady

N_T [Kč] – Náklady na provoz tiskárny

N_M [Kč] – Náklady na spotřebovaný materiál

N_{PP} [Kč] – Náklady na dodatečné opracování součástí (post-processing)

N_S [Kč] – Náklady na spojovací materiál

N_{CPL} [Kč] – Náklady cenu lidské práce

N_L [Kč] – Náklady na ložiska

N_p [Kč] – Náklady na pohon.

N_{OP} [Kč] – Zbylé náklady

3.4.6.1. Náklady na provoz tiskárny

Náklady za provoz tiskárny jsou vypočítány jako cena za spotřebovanou energii vynásobena počtem tiskových hodin na celý model a náklad na hodinový náklad obsluhy tiskárny. Cena elektřiny se pohybuje mezi 1,5 až 2 Kč za 1 kWh. Spotřeba tiskárny Prusa MK3S se pohybuje od 100–300 W v závislosti na nastavení parametrů. Lze tedy očekávat, že cena za hodinu tisku je průměrně 0,5 Kč/h.

Tabulka 6 Doba provozu tiskárny

Součást	Materiál	doba tisku[min]
Převodová skříň spodní část	PETG	790
Základna	PETG	301
Pojistné kroužky	PETG	30
Celkem PETG		1121
Převodová skříň horní část 1	ABS - T	696
Převodová skříň horní část 2	ABS - T	446
Celkem ABS-T		1142
Pastorek	ASA	227
Ozubené kolo	ASA	1030
Hřídel 2x	ASA	600
Příruba	ASA	80
Příruba hřídel	ASA	70
Držák motoru	ASA	240
Držák spouštěcího tlačítka	ASA	51
Kuželové kolo motor	ASA	53
Kuželové kolo vstup. hřídel	ASA	145
Pero přímé ozubení	ASA	8
Pero šikmé ozubení	ASA	8
Celkem ASA		2512
Celkem		4775

Protože se jedná o výrobu prototypu, nebyla do ceny za provoz tiskárny počítána investice do tiskárny. Tiskárnu tedy považujeme již za odepsanou. Kdybychom počítali náklady na sériovou výrobu převodovky na 3D tiskárně, museli bychom rozpočítat cenu tiskárny do předpokládaného počtu převodovek.

$$N_T = N_{EN} \times t_t \quad (3.17)$$

$$N_T = 0,5 \times 79,6$$

$$N_T = 39,8 \text{ Kč}$$

Kde:

$N_{EN}[\text{Kč}]$ – Náklady na spotřebovanou energii za hodinu

$t_t [\text{h}]$ – Doba tisku

3.4.6.2. Náklady na spotřebovaný materiál

Cena za spotřebovaný materiál se odvíjí od množství spotřebovaného materiálu a jeho typu. Materiály se cenově liší, a proto bylo nezbytné rozdělit součásti podle použitého materiálu a sečíst náklad za jednotlivé materiály. Cena za jednotlivé součásti byla vypočítána podle její finální váhy. Ta se vynásobí koeficientem za 1

gram daného filamentu. Cena za kilogram filamentu ASA byla 625 Kč, cena PETG a ABS-T byla 600Kč. Do ceny součásti byly započítány i nutné podpěry, které byly z technologických důvodů vytištěny.

Tabulka 7 Cena spotřebovaného materiálu

Součást	Materiál	Spotřebovaný materiál [g]	Cena za spotřebovaný materiál
Převodová skříň spodní část	PETG	207	124,20 Kč
Základna	PETG	78	46,80 Kč
Pojistné kroužky	PETG	2	1,20 Kč
Celkem PETG		287	172,20 Kč
Převodová skříň horní část 1	ABS - T	145,4	87,24 Kč
Převodová skříň horní část 2	ABS - T	86	51,60 Kč
Celkem ABS-T		231,4	138,84 Kč
Pastorek	ASA	34	21,25 Kč
Ozubené kolo	ASA	167	104,38 Kč
Hřídel 2x	ASA	60	37,50 Kč
Příruba	ASA	28	17,50 Kč
Příruba hřídel	ASA	22	13,75 Kč
Držák motoru	ASA	51	31,88 Kč
Držák spouštěcího tlačítka	ASA	6	3,75 Kč
Kuželové kolo motor	ASA	5	3,13 Kč
Kuželové kolo vstup. hřídel	ASA	11	6,88 Kč
Pero přímé ozubení	ASA	2	1,25 Kč
Pero šikmé ozubení	ASA	0,5	0,31 Kč
Celkem ASA		386,5	241,56 Kč
Celkem		904,9	552,60 Kč

V ceně za materiál se nepočítá s materiálem využitým na vývoj sestavy, tedy všechny zmetkové kusy nebo materiál použitý pro test transparentnosti. V případě sériové výroby by bylo možné tento materiál rozpočítat do ceny a také vynásobit celkovou cenou zmetkovitostí.

$$N_M = N_{ASA} + N_{PETG} + N_{ABS-T} \quad (3.18)$$

$$N_M = 241,56 + 172,2 + 138,84$$

$$N_M = 552,6 \text{ Kč}$$

Kde:

N_{ASA} [Kč] – Náklady za spotřebovaný materiál ASA

N_{PETG} [Kč] – Náklady za spotřebovaný materiál PETG

N_{ABS-T} [Kč] – Náklady za spotřebovaný materiál ABS-T

3.4.6.3. Náklady na dodatečné opracování součástí (post-processing)

Do této kategorie patří náklady za použitý aceton a brusný papír.

$$N_{PP} = N_{aceton} + N_{BP} \quad (3.19)$$

$$N_{PP} = 100 + 70$$

$$N_{PP} = 170 \text{ Kč}$$

Kde:

N_{aceton} [Kč] – Náklady za spotřebované rozpouštědlo aceton

N_{BP} [Kč] – Náklady za spotřebovaný brusný papír.

3.4.6.4. Náklady na spojovací materiál

V nákladech za spojovací materiál je cena za nakoupené šrouby a matice.

$$N_S = N_{šrouby} \times n_{šrouby} + N_{matice} \times n_{matice} \quad (3.20)$$

$$N_S = 0,680 \times 12 + 0,130 \times 12$$

$$N_S = 9,6 \text{ Kč}$$

Kde:

$N_{šrouby}$ [Kč] – Cena šroubů M3x12 DIN933

N_{matice} [Kč] – Cena matice M3 DIN934

$n_{šrouby}$ [ks] – Počet šroubů

n_{matice} [ks] – Počet matic

3.4.6.5. Cena lidské práce

Hodinová mzda pracovníka byla stanovena na 200 Kč. Bylo vypořádáno, že pro přípravu tisku jedné součástky bylo zapotřebí provést nutné činnosti, které zabraly 5-10 minut v závislosti na typu součásti a použitém materiálu a typu výrobku. Ve výpočtu bude počítáno s časem osm min. Povrchová úprava za účelem docílení transparentního vzhledu zabrala tři hodiny. Konečná kompletace trvala včetně zkoušky jednu hodinu. V případě sériové výroby bychom do ceny jednotlivých převodovek započítali cenu za vývoj, do které spadá odvedená práce (modelace, čas spotřebovaný na výtisk předchozích verzí, čas strávený testováním transparentního materiálu atd.).

$$N_{CLP} = N_p \times (t_p \times n_s + t_{pp} + t_k) \quad (3.21)$$

$$N_{CLP} = 200 \times (0,13 \times 16 + 3 + 1)$$

$$N_{CLP} = 1216 \text{ Kč}$$

Kde:

N_p [Kč] – Náklady na pracovníka za hodinu

t_p [h] – Doba práce pracovníka na jednu součást

n_s [ks] – Počet vyráběných součástí

t_{pp} [h] – Doba práce pracovníka na post – processingu

t_k [h] – Doba práce pracovníka při kompletaci převodovky

3.4.6.6. Náklady za ložiska

Cena jednoho ložiska kuličkového ložiska v obchodě Prumex je 28,2 Kč, v převodové skříni využíváme čtyři ložiska. Celkové náklady za ložiska jsou $N_L = 112,8$ Kč.

3.4.6.7. Náklady na pohon

Cena elektromotoru, který má otáčky 500 rpm je 270 Kč, cena tlačítka je 40 Kč. Cena za potřebný elektromateriál je zanedbatelná. Celkový náklad za pohon je $N_p = 310$ Kč

3.4.6.8. Zbylé náklady

Do zbylých nákladů se řadí těsnící O kroužky a cena za těsnění gufero. Tento náklad byl vyčíslen na 50 Kč.

3.4.6.9. Finální cena

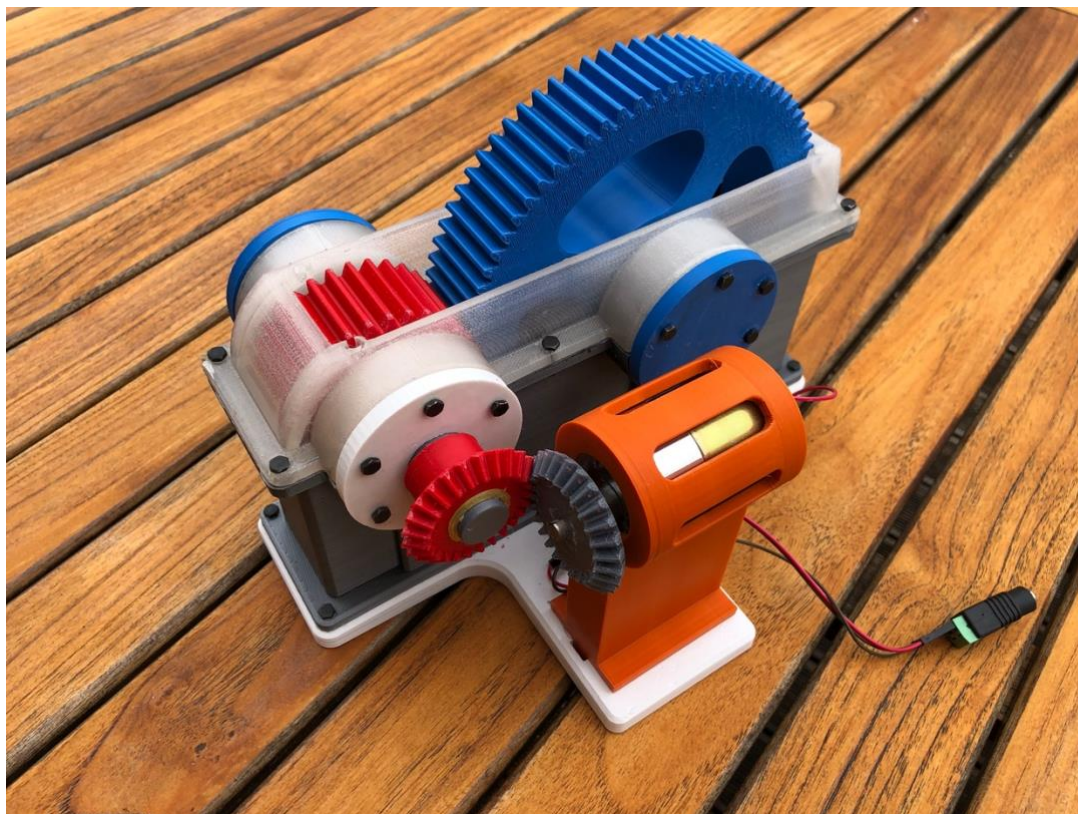
Do rovnice 3.16 byly dosazeny vypočítané hodnoty jednotlivých nákladových položek.

$$N_c = 39,8 + 552,6 + 170 + 9,6 + 112,8 + 1216 + 310 + 50$$

$$N_c = 2469,8 \text{ K}$$

4. DISKUSE

Výrobní metoda 3D tisk se v posledních letech stává stále více populární, a to nejen v oblasti prototypů. Vytvořený model je ukázkou možnosti využití poměrně levné výrobní metody pro funkční výrobky. V budoucnu, s pokračujícím vývojem těchto technologií, by mohlo být možné vyrábět funkční součásti, které budou konkurenceschopné součástem vyrobeným pomocí konvenčních metod.



Obrázek 50 Model jednostupňové převodovky

4.1. Pevnostní parametry

V práci bylo dokázáno, že má tato metoda potenciál i v oblasti, kde vytištěná součást pracuje pod stálým zatížením. Je jasné, že vytištěná ozubená kola se pevností nepřibližují ke kolům vyrobeným některou z konvenčních metod. Nejsou tedy plnohodnotnou náhradou konvenční metody.

Součást byla navržena tak, aby umožnila provoz součásti v krátkých intervalech pro ukázkové účely. K převodovce není připojena žádná součást na výstupní hřídeli, a proto je zatížení omezeno pouze na procesy uvnitř převodovky. Proto nebyl v diplomové práci proveden pevnostní výpočet, který by porovnával ozubená kola vyrobená metodou 3D tisku a vyrobení jednou z konvenčních metod. Výpočet ozubených kol vyrobených pomocí 3D tisku by byl náročný z důvodu mřížkové výplně součástí. I bez výpočtů dokážeme říct, že pevnost ozubených kol vytištěných na 3D tiskárně je nesrovnatelná s konvenční metodou. Kdybychom chtěli využít ozubená kola v běžném použití (například v převodovce kuchyňského robotu), nabízela by se možnost využití materiálu Nylon, který se pro tyto aplikace hodí. V tom případě by bylo nezbytné provést pevnostní analýzu.

4.2. Chyby vzniklé při výrobě

Při výrobě modelu došlo k tisku několika zmetkových kusů. Tento problém byl nejvýraznější u součásti spodní části převodové skříně. S původním záměrem naleptání povrchu tištěných součástí za dosažení hladké povrchu byl pro tuto součást vybrán materiál ASA. Po několika nezdařených pokusech bylo z tohoto záměru odstoupeno. Docházelo zde k oddělování vrstev v důsledku tepelných vlivů. Bylo provedeno několik optimalizací designu i procesu, které vedly pouze ke snížení prasklin modelu. Aby bylo možné převodovou skříň vytisknout bez prasklin, došlo ke změně výrobního materiálu.



Obrázek 51 Oddělení vrstev skříně převodovky

Zde došlo k dosažení limitu 3D tiskárny. Tento problém nemusí být globální pro celou technologii 3D tisku. Profesionální stroje s přesnější kalibrací a uzpůsobenou konstrukcí pro práci ve vyhřívaném prostoru by měly tento problém vyřešit. Zde by byla ztracena výhoda oproti konvenční metodě a výroba by se stala méně dostupnou. Problém mohl být také způsoben nedostatečnou zkušeností s výrobou podobného typu součástí.

Objevil se zde také problém s přesností výroby a některé součásti nebylo možné zkompletovat. Ty buď musely být upraveny, nebo vyrobené znovu s potřebnou vůlí.

Obecně platí že 3D tiskárny netisknou přesně a konstantně. Přesnost se liší v závislosti na použitém materiálu, výšce vrstvy nebo tiskové teplotě. Není zde možné podobně jako u konvenčních metod dopočítat potřebné vůle pro bezproblémové sestavení modelu.

Pro případnou výrobu dalších modelů převodovky by byly součásti upraveny tak, aby umožnily kompletaci převodovky bez dodatečných úprav.

4.3. Transparentní tisk

Pomocí série testů byla vybrána technologie výroby a použitý materiál. Sestavené zařízení pro měření intenzity světla bylo poměrně účinné, jelikož až na výjimky korespondovalo s vizuálním vyhodnocením. V něm byly zahrnuté porovnávané vlastnosti, které nebylo zařízení schopné vyhodnotit. Jedním z nich je například zbarvení do žluta, které mohlo přispět k vyšší intenzitě v důsledku „rozzáření“ měřeného prostoru. S tím může být spojená i barva použité LED diody,

kteřá po rozsvícení má zelenožluté zbarvení. Tento problém by mohl být vyřešený použitím vícero barev LED diody. Z výsledků by následně byla vytvořena jedna průměrná hodnota.

Na základě zkušeností získaných z testu byla vyrobena horní část převodové skříně. U součásti bylo dosaženo podobného výsledku, jako u testovacích vzorků. Na rozdíly v konečném výsledku mohla mít vliv složitost vyráběné součásti. U součásti se neobjevily svislé tiskové pruhy. Ty mohly být dané nastavením ve sliceru pro testovací vzorek nebo jeho designem. Tyto pruhy měly vliv na výsledek vzorků ve vyhodnocovací tabulce. Byly totiž velmi dobře viditelné při přiložení na testovací list. Odstranění těchto svislých pruhů z testovacích vzorků by v jisté míře změnilo výsledky ve vyhodnocovací tabulce, ale na konečný výsledek a vybraný materiál by to nemělo vliv.

Jelikož byl vybrán materiál ABS – T, který má velmi podobné vlastnosti jako materiál ASA, byla zde obava ze stejných problémů, které se objevily při tisku spodní části převodové skříně, která má podobné rozměry. Tyto problémy se u horní části převodové skříně neobjevily, a to nejspíš z důvodu nižší výšky, zaobleného designu bočnic a využití rozdílného materiálu (typu a výrobce).

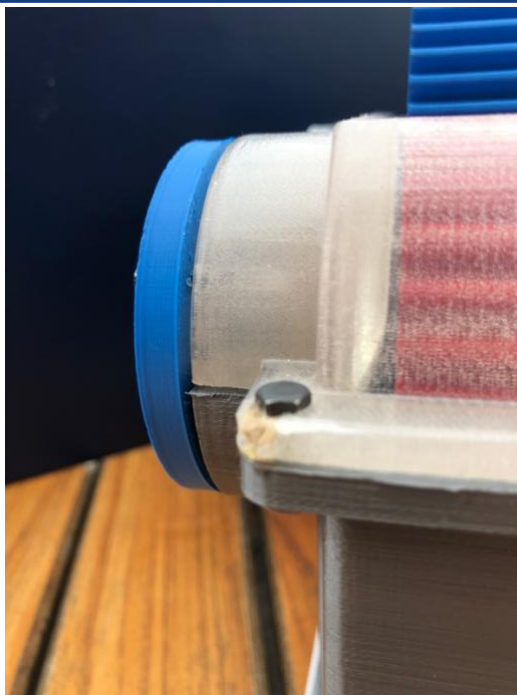
4.4. Výrobní cena

V práci byla vypočítána konečná cena modelu. Ve výpočtu nebylo zohledněno opotřebení 3D tiskárny, odpis tiskárny nebo výpočet ceny vývoje (práce na testech, vývoj). Zahrnutí těchto položek by zkreslovalo výrobní cenu. V případě sériové výroby se tyto položky zahrnují do výpočtu dle plánovaného počtu vyrobených součástí. Předpokládaná cena sériově vyráběných kusů by se příliš nelišila. Navýšení ceny díky rozpočítání odpisu tiskárny a vývoje by měla vykompenzovat možnost tištění více stejných součástí naráz, nebo kratší čas práce obsluhy díky získanému know-how z výroby prototypu.

Bylo předpokládáno, že cena pro výrobu jednoho modelu konvenční metodou by byl vyšší z důvodu nutnosti využití několika speciálních strojů, složitosti přípravy, postprodukce a vyššího nákladu na výrobní materiál. Čím větší série by se vyráběla, tím víc by se tento rozdíl vyrovnával.

4.5. Vyrobený model

Výsledkem práce je kompletně funkční model převodovky, který je poháněn elektrickým motorem. Při kompletaci došlo k několika nepřesnostem a modely musely být upraveny. Na modelu byly zaznamenány nedokonalosti v podobě nepřesného přilnutí obou částí převodových skříní. To bylo způsobeno napařením modelu v acetonové komoře. Tento proces měl také vliv na flexibilitu součástí a vzniklá nerovnost byla vykompenzována deformací spodní části skříně.



Obrázek 52 Nedoléhavost po kompletaci

Po dokončení kompletace byla převodovka uvedena do provozu. Bylo ověřeno, že motor je dostatečně silný, aby dokázal překonat odpory vzniklé nepřesnostmi tištěných součástí. Chod je tedy plynulý. Naměřená hluchnost převodovky za chodu se pohybovala v rozsahu 80-90 dB v závislosti na umístění měřicího zařízení. Po vypnutí pohonu se hluk pohyboval kolem 30 dB. Při chodu lze pozorovat házení všech součástí, které je především výrazné u ozubených kol. Příčinou házení by mohla být nepřesnost výroby. Během provozu modelu bylo vypořádováno chvění držáku motoru. Tyto vibrace vycházely ze základny, která není dostatečně těžká, aby vytvářela větší stabilitu sestavy, a to pak zejména v oblasti motoru.

ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce je funkční ukázkový model převodovky pro výukové účely, který byl vytvořen na základě konstrukčního výpočtu. Vstupní hodnoty pro výpočet byly otáčky vstupní a výstupní hřídele, které byly zvoleny tak, aby model co nejlépe zobrazoval převodový poměr při zachování vytisknutelného rozměru.

Pro co nejlepší ukázkou fungování bylo docíleno transparentní horní části převodové skříně díky testům provedeným na vzorcích z různých materiálů a s odlišným způsobem výroby. Při testech nejlépe dopadly vzorky z materiálu ABS – T s hustotou výplně 100 %. Aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku byly vzorky zkombinovány a pro vytištění horní transparentní části skříně bylo využito výšky vrstvy 0,2 mm. Součást byla upravena pomocí broušení a naleptání povrchu v acetonové komoře.

Vymodelovaná převodovka v programu Autodesk inventor byla pomocí sliceru převedena do výrobního formátu gcode a následně vytištěna na 3D tiskárně od společnosti Prusa. Poté byly všechny součásti zkompletovány v hotový model. Pro co nejlepší ukázkou byla převodovka vybavena kuličkovými ložisky a vstupní hřídel byla připojena k elektromotoru.

Celkové náklady převodovky byly vypočítány na 2469,8 Kč. Nejpodstatnější položku v nákladech tvořila cena za lidskou práci, kterou musí pracovník vykonat k dosažení konečného produktu s finálním nákladem 1216 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠVEC, Vladimír, 1999. Části a mechanismy strojů: Mechanické převody. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01934-9.
2. BOHÁČEK, František. Části a mechanismy strojů. III, Převody. Vyd. 2., upr. Brno: Vysoké učení technické, 1987. Celostátní učební texty vysokých škol.
3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9
4. VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to SLA 3D printing [online]. + [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
5. Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing, c2021. Formlabs [online]. Formlabs, c2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
6. MURPHY, James, 2019. Selective Laser Melting (SLM): 3D Printing Simply Explained. ALL3DP [online]. ALL3DP, 28.března.2019 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
7. SHAIKH, Shaafi, 2020. 2020 Best SLM 3D Printing Services. ALL3DP [online]. ALL3DP [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/best-slm-3d-printing-services/>
8. GRAMES, Emmett, 2019. SLA vs SLS: The Differences: Simply Explained. ALL3DP [online]. ALL3DP, 1.dubna.2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/sla-vs-sls-3d-printing-technology-shootout/>
9. Why choose Multi Jet Fusion?, c2021. Materialise [online]. Headquartered: Materialise [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/multi-jet-fusion>
10. Laminated Object Manufacturing (LOM), c2021. Custompart [online]. Custompart [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
11. VAROTSIS, Alkaios Bournia, c2021. Introduction to FDM 3D printing. HUBS [online]. HUBS [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
12. MARTEL, Alexandre, 2017. The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). 3D natives [online]. 3Dnatives, 15.prosince 2017 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>
13. O'CONNELL, Jackson, 2020. FDM 3D Printers Explained: Cartesian, Delta, CoreXY, & More. ALL3DP [online]. ALL3DP, 18. října 2022 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
14. GRAMES, Emmett, 2020. FDM 3D Printing: Simply Explained. ALL3DP [online]. ALL3DP, září 2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

-
15. ANDERSON, Tyler, 2016. Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work? MatterHackers [online]. MatterHackers, 4. února. 2016 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>
 16. 3D printing technology – Delta versus Cartesian, c2020. Tractus 3D [online]. Waardenburg: Tractus 3D [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian/>
 17. WALSH, Niall Patrick, 2017. This 6-Axis Robot Arm Can 3D Print Fiberglass Composites. ArchDaily [online]. ArchDaily, 25. března. 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/867696/atropos-this-6-axis-robot-arm-can-3d-print-fiberglass-composites>
 18. 3D tisk v kostce, c2021. Material pro 3D [online]. Material pro 3D [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
 19. Material pro 3D: Materiálový slovník [online], c2021. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
 20. GUTIERREZ, Rocío Jaimes, 2020. PLA Plastic/Material: All You Need to Know. ALL3DP [online]. 11. ledna. 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/pla-plastic-material-poly-lactic-acid/>
 21. CAROLO, ucas, 2021. ABS Filament: The Basics & Best Brands. ALL3DP [online]. březen. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/abs-filament-brands-compared/>
 22. O'CONNELL, Jackson, 2021. ASA Filament: The Basics & Best Brands in 2021. ALL3DP [online]. leden. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/asa-filament-explained-and-compared/>
 23. Nylon, c2021. Simplify3D [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/nylon/>
 24. Prusament PETG, c2021. Prusament [online]. Prusa Polymers [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
 25. GRAMES, Emmett, 2020. 3D Printing Layer Height: How Much Does It Matter? ALL3DP [online]. 12. ledna. 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter/>
 26. Introduction to FFF technology and its most important parameters, 2018. BCN3D [online]. Barcelona, 18. července. 2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/introduction-fff-technology-3d-printing-important-parameters/>
 27. GREGURIĆ, Leo, 2021. 3D Printing Post-Processing: 10 Easy Techniques. ALL3DP [online]. leden. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>
 28. SCHWARZ, David, 2018. Postprocessing 3D výtisků krok za krokem. Blog.prusaprinters [online]. 16. listopadu. 2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/postprocessing-3d-vytisku-krok-za-krokem_29270/
 29. Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+, c2021. Shop Prusa 3D [online]. Praha [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3->
-

- mk3s.html?gclid=Cj0KCQjwkZiFBhD9ARIsAGxFX8ARfmDwL_5IxtXuoJ0006mV0ddPyrvB1iBwBK0hIRQ_COMmuzZLuoAaAqN_EALw_wcB
30. MakerBot Replicator 5. generace, c2021. Alza [online]. Praha [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/makerbot-replicator-5-generace-d2170871.htm>
31. LulzBot TAZ Glass/PEI Print Bed, c2021. MatterHackers [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store//lulzbot-taz-glass-pe-print-bed/sk/MN5CLE8L>
32. 3d Printer Hot End, c2018. Circuits diagram imagines [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://circuitdiagramimages.blogspot.com/2018/05/3d-printer-hot-end.html>
33. The Selection of 3D Printer Nozzle Size & Material, 2020. Facdox [online]. 30.července 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://facfox.com/docs/kb/the-selection-of-3d-printer-nozzle-size-material>
34. ANYCUBIC Predator, c2021. Anycubic [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-predator-fdm-printer>
35. ESUN eBOX 3D Printing Filament Storage Box, c2021. Amazon [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.amazon.ae/Printing-Filament-Storage-Dehydrating-Weighing/dp/B07HQCIFY4S>
36. NÁHRADNÍ OCHRANNÉ SKLO NA ŠTÍT VZOR PRŮŠA RESEARCH, c2021. Multiplast [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.multiplast.cz/eshop/oblicejove-stity-124/ochranné-sklo-na-stit-vzor-prusa-research-824>
37. PLEWA, Kat, 2017. Transparent 3D Printing: what are your options? Sculpteo [online]. 27.lisopad 2019 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/11/27/transparent-3d-printing-what-are-your-options/>
38. GOLDSCHMIDT, Benjamin, 2019. Transparent/Clear 3D Printing: 4 Ways to Do It. ALL3DP [online]. 2. srpna 2019 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/transparent-3d-printing-create-transparent-parts/>
39. KOČÍ, Jakub, 2020. 3D tištěné optické čočky a další průhledné díly. Blog prusaprinters [online]. 14.února 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/3d-tistene-opticke-cocky-a-dalsi-pruhledne-dily_31231/
40. MAŤÁTKO, Jan, 1997. Elektronika: [učební text pro střední průmyslové školy s výukou předmětů Elektronika a Elektronika a elektronická zařízení ve studijních oborech skupiny 26-Elektrotechnika a 37-Doprava, Pošty ...]. 4. vyd., v Idea servis 2. vyd. Praha: Idea servis. ISBN 80-859-7020-1.
41. FROHN, Manfred, 2006. Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-730-0123-3.
42. BH1750 – Ambient Light Senso, 2019. Components101 [online]. 6.srpna.2019 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://components101.com/sensors/bh1750-ambient-light-sensor>
43. Modul měření intenzity světla [online], c2017. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/465/1420672425.pdf>

44. Fotorezistor LDR5516, c2021. GME [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/fotorezistor-ldr5516>
45. Fototranzistor THT 5mm LTR-3208 (IRE5), c2021. GME [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/ltr-3208-ire5>
46. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK, 2013. Základy konstruování. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-839-7.
47. LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA, 1999. Strojnické tabulky. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia. ISBN 80-7183-164-6.
48. GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. P. 459. ISBN 14-419-1120-0.
49. Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
50. KOČÍ, Jakub. Vše, co potřebujete znát o tiskových výplních. Blog Prusa Printers [online]. 2021, 22. ledna 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuje-znat-o-tiskovych-vyplnich_43579/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
i	-	Převodový poměr
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	Obvodová rychlost
Ra	μm	Střední aritmetická odchylka profilu
SLA	-	Stereolitografie
3D	-	Trojdimenzionální
SLM	-	Selective laser melting
SLS	-	Selective laser sintering
MJM	-	MultiJet modeling
LOM	-	Laminated object manufacturing
UV	-	Ultraviolet
FDM	-	Fused deposition modeling
FFF	-	Fused filament fabrication
PLA	-	Ploylactic acid
ABS	-	Acrylonitrile butadiene styrene
ASA	-	Acrylonitrile styrene acrylate
PET	-	Polyethylene terephthalate
COVID19	-	Coronavirus disease 2019
HIPS	-	High Impact Polystyrene sheet
PVA	-	Polyvinylalkohol
THF	-	Tetrahydrofuran
MEK	-	Methylethylketon
PMMA	-	Polymethylmethakrylát
PC	-	Polycarbonate
Lux	Lx	Fotometrická jednotka intenzity
I2C	-	Multi-masterová počítačová sériová sběrnice
VCC	-	Voltage Common Collecto
GND	-	Ground
SCL	-	Seriál clock line
SDA	-	Seriál data assress
ADDR	-	Device address pin
i_c	-	Převodový poměr
n_i	min^{-1}	Otáčky na vstupním hřídeli
n_o	min^{-1}	Otáčky na výstupní hřídeli
z_1	-	Počet zubů pastorku
z_2	-	Počet zubů druhý převodový stupeň
m	mm	Modul
h	mm	Výška zubu
D_1	mm	Průměr roztečné kružnice pastorku
D_2	mm	Průměr roztečné kružnice druhého převod. Stup.
c_{12}	mm	Hlavová vůle ozubených kol
h_{a12}	mm	Výška hlavy zubu
h_{f12}	mm	Výška paty zubu
D_{a1}	mm	Hlavová kružnice pastorku
D_{a2}	mm	Hlavová kružnice druhého kola
D_{f1}	mm	Patní kružnice pastorku
D_{f2}	mm	Patní kružnice druhého kola
a_{12}	mm	Osová vzdálenost

b	mm	Šířkaozubení
N _c	Kč	Celkové náklady
N _T	Kč	Náklady na provoz tiskárny
N _M	Kč	Náklady na spotřebovaný materiál
N _{PP}	Kč	Náklady na dodatečné opracování součásti
N _S	Kč	Náklady na spojovací materiál
N _{CPLP}	Kč	Náklady na lidskou práci
N _L	Kč	Náklady na ložiska
N _p	Kč	Náklady na pohon
N _{OP}	Kč	Zbylé náklady
N _{EN}	Kč	Náklady na spotřebovanou energii za hodinu
t _t	h	Doba tisku
N _{ASA}	Kč	Náklady za spotřebovaný materiál ASA
N _{PETG}	Kč	Náklady za spotřebovaný materiál PETG
N _{ABS-T}	Kč	Náklady za spotřebovaný materiál ABS-T
N _{aceton}	Kč	Náklady za spotřebované ředidlo aceton
N _{BP}	Kč	Náklady za spotřebovaný brusný papír
N _{šrouby}	Kč	Cena šroubů M3x12 DIN933
n _{šrouby}	ks	Počet šroubů
N _{matice}	Kč	Cena matice M3 DIN934
n _{matice}	Ks	Počet matic
N _P	Kč	Náklady na pracovníka za hodinu
t _p	h	Doba práce pracovníka na jednu součást
n _s	ks	Počet vyráběných součástí
t _{pp}	h	Doba práce pracovníka na post-processingu
t _k	h	Doba práce pracovníka při kompletaci převodovky
