



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VÝROBA MODELU PLANETOVÉ PŘEVODOVKY NA 3D
FDM TISKÁRNĚ**

PRODUCTION OF PLANETARY GEAR SET MODEL ON 3D FDM PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Magdon

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: Jan Magdon
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok: 2017/18

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

Výroba modelu planetové převodovky na 3D FDM tiskárně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rešerši v oblasti planetových převodů a jejich výroby v návaznosti na 3D tisk. Navrhne modelové planetové ozubení. Následně provede zhodnocení jeho technologičnosti konstrukce z hlediska 3D FDM tisku. Rovněž zrealizuje jeho výrobu, zhodnotí funkční vlastnosti modelu a provede technicko ekonomické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh modelu
- výroba modelu
- vyhodnocení a doporučení do budoucna

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

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

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

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010. 512 s. ISBN 978-981-27-., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010. 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav a kol. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

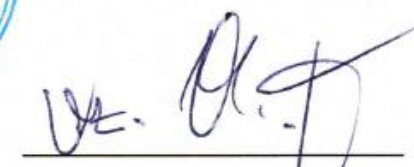
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 11. 10. 2017





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem planetové převodovky a následnou výrobou modelu s využitím technologie Fused Deposition Modeling (FDM). V první části je popsán výrobní proces pomocí aditivních technologií, zaměřený především na technologii FDM, spolu s vlastnostmi materiálů používaných při této technologii, dále teorie planetových převodů s jejich praktickým využitím. Druhá část je věnována výrobě modelu planetové převodovky, která je navržena s ohledem na možnosti FDM tiskárny. Jednotlivé díly byly vymodelovány v 3D programu Autodesk Inventor Professional 2016. Na závěr je výrobek zhodnocen po technické i ekonomické stránce.

Klíčová slova

rapid prototyping, fused deposition modeling, 3D tisk, ABS, planetová převodovka, inventor

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis is looking into designing of a planetary gearbox then subsequent production with using the Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The first part describes the production process using additive technologies, focusing mainly on FDM technology with properties of materials used in this method, then the theory of planetary gears with their practical use. The second part is devoted to production of model planetary gearbox, which is designed with regard to possibilities of FDM printer. Single parts were designed in 3D programme Autodesk Inventor Professional 2016. Finally the product is evaluated technically and economically.

Key words

rapid prototyping, fused deposition modeling, 3D printing, ABS, planetary gearbox, inventor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAGDON, J. *Výroba modelu planetové převodovky na 3D FDM tiskárně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba planetové převodovky na 3D FDM tiskárně** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Magdon

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za jeho čas, cenné připomínky a ochotu při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za pomoc a podporu nejen u této práce, ale v celém průběhu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 Aditivní technologie.....	8
1.1.1 SLA - Stereolitografie.....	10
1.1.2 SLS – Selective Laser Sintering	11
1.1.3 FDM – Fused Deposition Modeling	12
1.2 Planetový mechanismus	16
1.2.1 Princip planetového mechanismu	16
1.2.2 Využití planetových mechanismů.....	18
2 PRAKTICKÁ ČÁST	20
2.1 Návrh planetové převodovky	20
2.2 Výpočtová část	22
2.2.1 Teoretický mezní počet zubů	22
2.2.2 Podmínka smontovatelnosti	23
2.2.3 Podmínka stejných osových vzdáleností	23
2.2.4 Podmínka vůle mezi sousedními satelity.....	23
2.2.5 Síly na planetový převod	24
2.3 Výroba planetové převodovky	25
2.3.1 Slic3r programy	25
2.3.2 RepRap tiskárna SINUHED	27
2.3.3 Příprava před tiskem	28
2.3.4 Tisk jednotlivých dílů	29
2.3.5 Sestavení planetové převodovky	34
2.3.6 Povrchová úprava	35
2.3.7 Technicko – ekonomické zhodnocení.....	35
ZÁVĚR	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	44

ÚVOD

Metoda 3D tisku je poměrně nová technologie pocházející z 80. let 20. století. Za zakladatele je považován Charless Hull, který získává patent na technologii zvanou Stereolitografie (SLA). Od této doby prošel 3D tisk mnoha inovacemi a byly představeny další technologie podobné SLA, Fused Deposition Modeling (FDM) a Selective Laser Sintering (SLS). V dalších letech zažily tyto technologie obrovský rozvoj v mnoha odvětvích průmyslu, kromě leteckého či automobilového, přinesly velký pokrok i v lékařství, kde byla na přelomu tisíciletí na 3D tiskárně vytištěna funkční miniaturní ledvina, úspěšně použitá při transplantaci pro nemocné zvíře. Hitem posledních let je také projekt RepRap, jehož cílem je vytvořit samoreplikační 3D tiskárnu. Mezi nejznámější české zástupce tohoto projektu patří Josef Průša a jeho firma Prusa Research. 3D tisk je považován za technologický převrat, který je spojován s pojmem třetí průmyslová revoluce [1, 3].

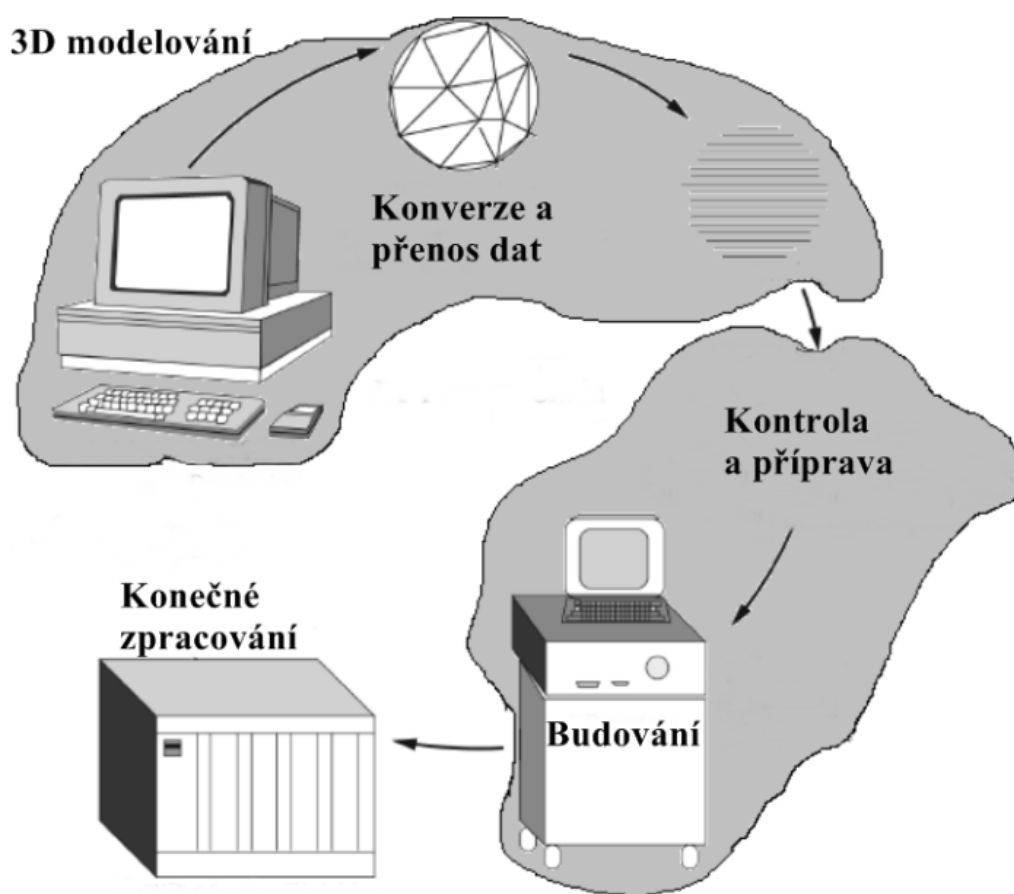
S technologií 3D tisku jsou úzce spojeny i 3D CAD (Computer Aided Design) systémy. V moderních odvětvích průmyslu je potřeba rychlé zhotovení modelu součásti či prototypu, to umožňují právě 3D CAD systémy. Mezi další výhody CAD systémů patří například kontrola smontovatelnosti v sestavách, simulace namáhání nebo snadná oprava chyb. Model je následně potřeba převést z digitální do fyzické podoby, pro tuto kusovou výrobu je vhodné použít některou z aditivních technologií výroby, kterou lze dosáhnout během krátké doby libovolně komplikovaného tvaru dílu [4].

Technologie FDM je dnes nejvíce rozšířenou technologií používanou v domácnostech. Jedná se o nejjednodušší ze všech technologií 3D tisku, proto nedosahuje takové kvality jako SLA či SLS. Tuto nevýhodu však kompenzuje fakt, že náklady na pořízení a provoz tiskárny jsou nízké [2, 3].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Aditivní technologie

Jedná se o technologie výroby fyzického modelu na základě digitálních dat z 3D CAD systému. Při výrobě nedochází k odebírání materiálu, jako je tomu u konvenčních metod, dochází k opačnému procesu a materiál je přidáván. Přidávání materiálu neprobíhá najednou (např. při odlévání), ale po velice tenkých vrstvách, které jsou k sobě vázány. Každá vrstva je průřezem modelu z 3D CAD dat. Aditivní technologie je v dnešní době spojena především s pojmem Rapid Prototyping (rychlé zhotovení prototypu) [5, 6].



Obr. 1 Obecný postup výroby aditivními technologiemi [7].

- Tvorba CAD modelu

Všechny součásti, vyráběné aditivní technologií, začínají právě tímto krokem. CAD model je možné vytvořit v některém z mnoha dostupných 3D softwarů, nebo lze využít 3D skenování. Pro 3D skenování se nejčastěji využívá technologie modrého světla (Blue Light). Hlavní výhodou Blue Light je přesné měření, které je nezávislé na okolních světelných podmínkách, skenovaný díl je poté převeden na 3D model a lze ho reprodukovat v nezměněné podobě. Model popisuje geometrii součásti, může být buďto objemový nebo popsán plochami. Při vytváření modelu vhodného pro 3D tisk musí být dodrženy určité podmínky, mezi hlavní patří např. minimální tloušťka stěny, velikost díry nebo maximální délka převislé strany [5, 7, 8, 9].

- Konverze do formátu STL (Stereolithography)

STL je univerzálním formátem pro většinu zařízení využívající aditivní technologie a každý CAD program dokáže generovat tento typ souboru. Formát STL aproximuje veškeré vnější plochy na malé trojúhelníky popsané normálou a třemi vrcholy, jejichž souřadnice je poté možné přenést do 3D tiskárny. Při konverzi může docházet k chybám, mezi nejčastější patří neuzavřené plochy, tuto vadu však dokáže většina softwarů odhalit. Následnou opravu dat STL souboru lze provést v mnoha programech, vhodnější je ale upravit samotný model v 3D programu, kde byl vytvořen [5, 7, 10, 11].

- Vhodná orientace

Před samotným tiskem je potřeba model správně orientovat. Při tisku více dílů zároveň je nutné jednotlivé kusy přesně rozmístit na tiskovou plochu. Orientace je důležitý faktor, vhodným výběrem lze tisknout bez podpor, navíc, orientace výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobku [5].

- Parametry tisku

Parametry tisku jsou voleny podle možností 3D tiskárny a také požadavků na výsledný výrobek. Zvolené parametry ovlivňují nejenom kvalitu povrchu výrobku, ale i jeho mechanické vlastnosti.

- Tisk objektu (Processing)

Tisk je plně automatizovaný, tudíž do něj není nutné zasahovat. Doba tisku záleží na velikosti modelu a také na nastavených parametrech tisku [7].

- Konečné zpracování (Postprocessing)

Vytisknutý objekt je většinou nutné upravit, je potřeba vyjmout podpory, pokud byly použity. Následně je možné upravit povrch výrobku např. broušením, leštěním, nebo prodloužit jeho životnost nanesením ochranné vrstvy [5].

Vybrané technologie aditivní výroby

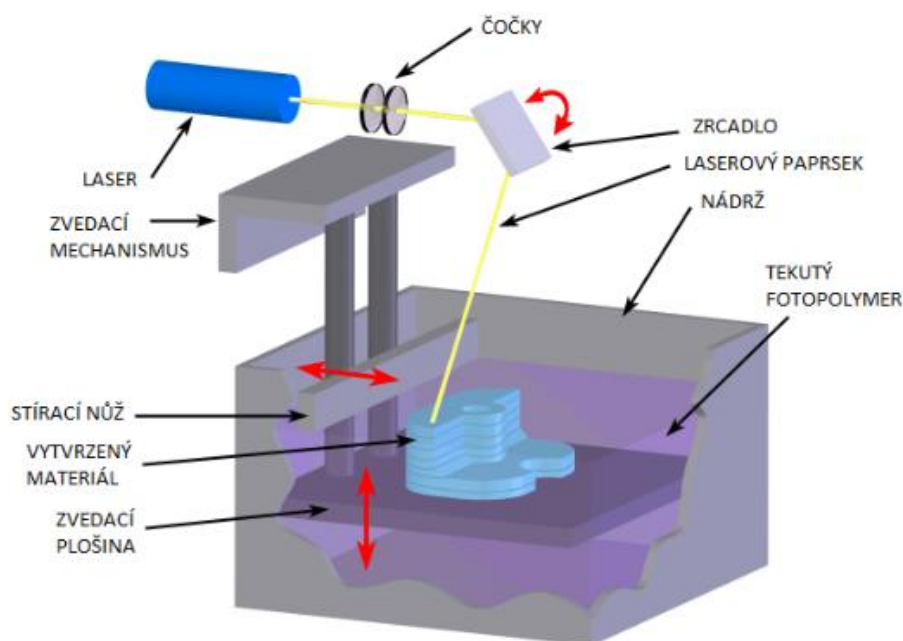
Technologie aditivní výroby jsou rozděleny do tří kategorií v závislosti na použití surového materiálu – tekuté, pevné a práškové. V současné době existuje celá řada technologií aditivní výroby, mezi nejčastěji používané patří SLA, SLS a FDM, které jsou podrobněji v následujících kapitolách [5, 12].

1.1.1 SLA - Stereolitografie

Jedná se o první z technologií aditivní výroby, která využívá tisk z tekutého základu. Princip technologie je založen na citlivém fotopolymeru, který při osvětlení UV zářením mění své mechanické vlastnosti. Výrobek je stavěn na plošině, která je ponořena pod tenkou vrstvou fotopolymeru (0,05 až 0,15 milimetru). Po osvětlení dojde k vytvrzení zasažených částí, nejprve je osvětlena kontura, poté zbytek plochy. Po dokončení vrstvy plošina sestoupí níže o tloušťku jedné vrstvy, fotopolymer je zarovnán stíracím nožem a proces je opakován. Výsledný díl nedosahuje finální pevnosti, po dokončení tisku je potřeba díl vystavit intenzivnímu UV záření [7, 10, 13, 14, 17].

SLA dosahuje relativně vysoké přesnosti ($\pm 0,1$ milimetru), výsledný povrch má nejlepší kvalitu v rovinách rovnoběžných s vrstvou fotopolymeru, na bočních stěnách se může objevit schodovitý profil, především pokud je zvolena vysoká tloušťka vrstvy [5, 13].

Nevýhodou SLA je vysoká pořizovací cena a nároky na údržbu. Pokud chceme zachovat vysokou kvalitu tisku, je potřeba zařízení udržovat v čistém prostředí bez otřesů, aby nedocházelo k vychýlení UV paprsku. Dalším problémem je sensitivita výrobku na vlhká prostředí, materiály používané pro SLA absorbují vlhkost, to může u tenkých stěn způsobovat kroucení a jiné deformace [4, 7, 13, 14].



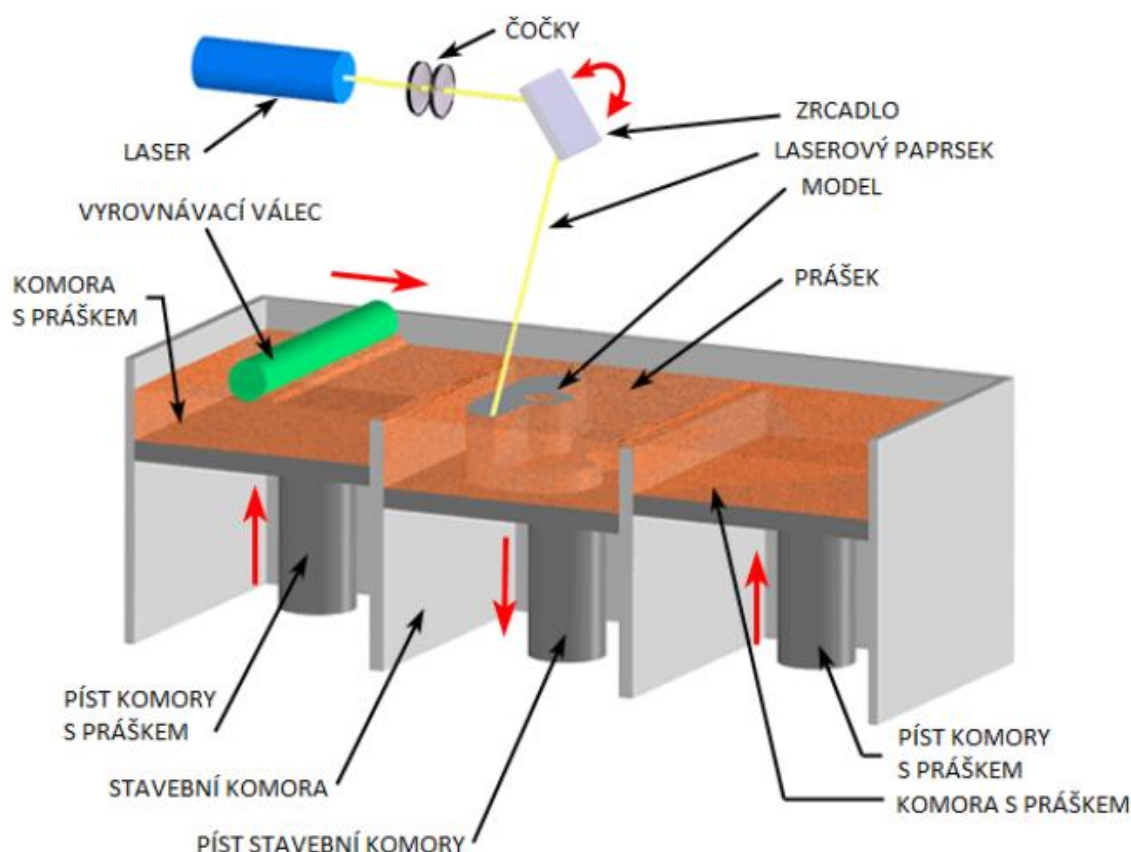
Obr. 2 Princip metody SLA [11].

1.1.2 SLS – Selective Laser Sintering

SLS je technologie založená na tisku z práškového základu. Použitým materiálem mohou být buďto plastové, kovové, nebo keramické prášky. Prášek je spékán pomocí výkonného laseru (většinou CO₂) do jednoho celku. Zařízení je tvořeno dvěma zásobníky s práškovou hmotou, mezi zásobníky se nachází podložka, na které dochází ke spékání částic a tvorbě modelu. Po dokončení vrstvy sestoupí plošina níže o tloušťku jedné vrstvy (0,1 až 0,5 milimetru), následně je ze zásobníku pístem vytlačen práškový materiál, který je válečkem dopraven až na podložku a proces je opakován. Výhodou je, že pro SLS není potřeba žádný podpůrný materiál, jako podpora slouží přebytečný prášek [4, 7, 13, 15, 17].

Při tisku je v komoře udržována teplota těsně pod teplotou tavení materiálu, laseru pak stačí pouze mírné zvýšení teploty a dochází ke spékání prášku. Další výhodou přehřáté komory je ochrana modelu před deformací, způsobenou teplotní roztažností. S vysokou teplotou je však spojeno nebezpečí vznícení, proto je v komoře inertní (nereaktivní) atmosféra, nejčastěji dusíková [4, 5, 13, 14].

Nevýhodou SLS je stejně jako u SLA vysoká pořizovací cena a požadavky na údržbu. Také náklady na provoz jsou vysoké.

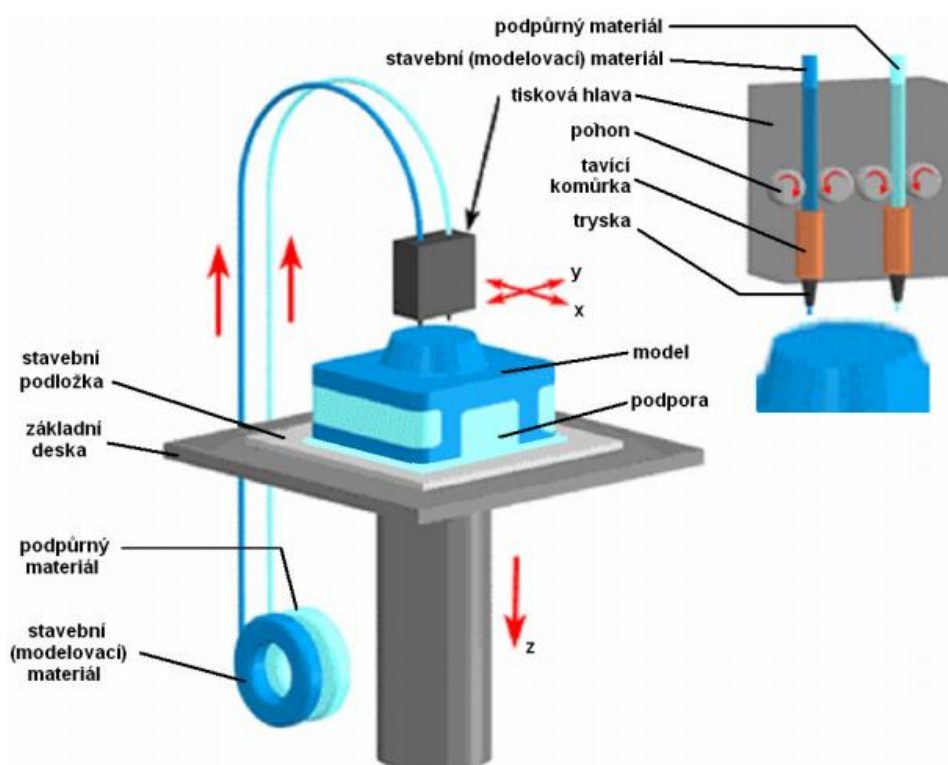


Obr. 3 Princip metody SLS [11].

1.1.3 FDM – Fused Deposition Modeling

Technologie FDM pracuje s materiálem v pevném stavu, ten je buďto ve formě strun namotaných na roli nebo granulí. V případě strun je materiál posunován do systému pomocí hnacích válečků, u granulí je použita násypka. Posun materiálu do systému je prováděn pomocí krokových motorů, ty přesně regulují množství dodaného materiálu. Před výstupní tryskou (extruderem) se nachází zkapalňovací systém, tvořený cívkou pro ohřev. Výška vytlačené vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,35 milimetru. Při tisku se používají dva druhy materiálu, hlavní stavební materiál, ze kterého je tvořen model, a materiál podpurný. Podpory lze z konečného výrobku odstranit chemicky či mechanicky, záleží na použitém materiálu [5, 13, 17, 18].

FDM je oproti SLA a SLS poměrně jednoduchá technologie, proto se stává čím dál více populárnější. Tiskárny založené na FDM se dostávají do běžných domácností díky svým nízkým nákladům, jak pořizovacím, tak i provozním [5, 17].



Obr. 4 Princip metody FDM [11].

Při nastavování FDM tisku je nutné věnovat pozornost následujícím parametrům [19, 20]:

- Výška vrstvy (layer height)

Základní hodnotou bývá 75 procent průměru trysky. Tato hodnota je zároveň maximální, po překročení dochází k volnému pokládání vrstev a nedokonalému spojení. Výška vrstvy ovlivňuje nejvíce vzhled, vyšší vrstvy tvoří viditelnější vroubky, ale tisk trvá kratší dobu. Pokud bude požadován kvalitní detailní tisk, můžeme výšku vrstvy snížit až na hodnotu 0,05 milimetru.

- Tloušťka stěny (wall thickness)

V základním nastavení je tato hodnota rovna 0,8 milimetru. Tloušťka stěny není na výsledném modelu viditelná, ovlivňuje však jeho odolnost. Pro namáhané modely je vhodné tuto hodnotu zvýšit o libovolný násobek průměru trysky.

- Množství vytlačovaného plastu (flow scale)

Nastavení záleží na výšce vrstvy. Při vyšší vrstvě je vhodné zvolit větší množství plastu, dojde k lepšímu propojení jednotlivých vrstev. Při tisku detailního modelu s malou výškou vrstvy malé množství plastu, aby nedocházelo k přeplňování.

- Teplota (printing temperature)

Optimální rozmezí teplot je uvedeno výrobcem a liší se podle materiálu tiskové struny.

- Rychlost (speed)

Ovlivňuje především kvalitu povrchu. Pro model s ostrými rysy je vhodná co nejmenší rychlost, ta ovšem prodlužuje dobu tisku. Při vysoké rychlosti dochází při změně směru hlavičky k vibracím, které ovlivní kvalitu. Některé programy nabízejí možnost rozdílné rychlosti tisku pro viditelné a vnitřní části.

- Výplň (infil)

Záleží na použití výrobku, obvyklá hodnota se pohybuje okolo 15 až 20 %. Tvar výplně je nastavitelný, je možné zvolit např. linie, mřížky či různé 3D útvary. Nejlepších vlastností dosahuje výplň tvaru honeycomb (včelí plástev), tato výplň šestiúhelníkového tvaru dosahuje vysoké pevnosti při relativně malém množství výplně.

- Chlazení (cooling)

Každá tiskárna má poblíž vyústění trysky větrák, který chladí roztavený materiál o několik stupňů ihned po výstupu. Chlazení je důležitá část procesu, při tisku modelu o malé ploše (rychlé vrstvení dalších vrstev na sebe) může docházet k nedostatečnému chlazení a tisknutý model se může deformovat vlastní vahou. Naopak při chlazení velkým množstvím vzduchu materiál ztuhne příliš rychle a jednotlivé vrstvy se dostatečně nepropojí, výrobek ztrácí svoji pevnost.

Materiály používané pro tisk modelu

Jelikož se jedná o metodu využívající univerzální proces natavování, lze použít širokou škálu materiálů. Nejčastěji jsou používány plasty, které mohou být smíchány např. se dřevem či kovovým materiálem, to ovlivňuje mechanické vlastnosti těchto kompozit [7].

ABS (Akrylonitril Butadien Styren)

ABS patří mezi nejpoužívanější materiály FDM tisku kvůli svým dobrým vlastnostem, odolává vysokým teplotám, chemikáliím i vlhkosti. Díky své vysoké pevnosti může být výrobek použit i jako konečný produkt. Nevýhodou ABS je ale teplotní roztažnost, která může způsobit deformaci výrobku, proto je při tisku nutné použít vyhřívanou podložku [7, 21, 22, 23].

ABS má mnoho poddruhů, nejčastěji používané spolu s jejich charakteristickými vlastnostmi jsou uvedeny níže [21, 22, 23]:

- **ABS Plus**

O 40 procent pevnější než standardní ABS, žádné znatelné deformace, smrštění ani absorpce vlhkosti, disponuje také nejširším výběrem barev.

- **ABS M30**

O 25 až 70 procent pevnější než standardní ABS, vyšší odolnost vůči nárazu, lepší propojení jednotlivých vrstev a tím zvýšení živostnosti součástí. Vyrobené díly jsou hladké a mají jemnější detaily, vhodný pro výrobu funkčních součástí.

- **ABS M30i**

Podobné vlastnosti jako ABS M30, navíc je biokompatibilní, aplikace v oblasti farmacie a potravinářství.

- **ABS Si**

Termoplast s vysokou rázovou pevností. Oproti standardnímu ABS je průhledný, této vlastnosti se využívá například v optice (výroba automobilových světel). Materiál také splňuje normu USP (United States Pharmacopeia) třídy IV, je tedy vhodný pro farmaceutický a biotechnologický průmysl.

- **ABS ESD7**

Odolný materiál rozptylující statickou elektřinu. Hlavní použití je pro výrobky náchylné k poškození statickým nábojem (plošné spoje, přípravky na upínání elektronických komponent).

- **Ultem 9085**

Jedná se o termoplast třídy ST – netoxický, nehořlavý. Díky své nízké hmotnosti se hojně využívá v dopravních prostředcích.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti ABS [21, 23, 24].

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Teplotní deformace [°C]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]	Hustota [kg.m ⁻³]
ABS	22	1 628	41	91	6	1 045
ABS M30	36	2 415	62	95	4	1 040
ABS M30i	36	1 908	63	85	4	1 040
ABS Si	37	2 420	61	98	4,4	1 085
ABS ESD7	36	1 910	68	110	3	1 060
Ultem	71	2 205	115	153	6	1 270

PLA (Polylactil Acid)

Oproti ABS je křehký, má také menší teplotní odolnost (do 60 stupňů Celsia), poté se stává plastickým. Kvůli vyššímu koeficientu tření může při tisku docházet k ucpání trysky, tento nedostatek lze odstranit použitím silnějšího motoru. Má nízkou teplotní roztažnost, proto při tisku není nutné používat vyhřívanou podložku. Kvůli nízké teplotě plasticity jsou výrobky z PLA hůře obrobitelné než výrobky z ABS [7, 25].

Materiál PLA je zajímavý tím, že jde o bioplast, pro jeho výrobu není potřeba ropa, ale materiály získané z rostlin (např. kukuřičný škrob a cukrová třtina). Další výhodou PLA je zdravotní nezávadnost (použití v potravinářství) a snadná recyklace na kvalitní biomasu [5, 10, 16].

PC (Polykarbonát)

Jedná se o pravý průmyslový termoplast, který lze opakovaně převádět z taveniny do pevného stavu (možnost recyklace). Díky vysoké pevnosti v tahu, ohybu i rázu je vhodný pro extrémně namáhané výrobky (náradí, upínače). V současnosti se jedná o nejtvrďší materiál, kterým lze tisknout na FDM tiskárnách, zároveň má také nejvyšší teplotní odolnost (130 stupňů Celsia). Nevýhodou PC je velká teplotní roztažnost, která často deformuje modely, proto se PC používá pro tisk malých modelů, kde se teplotní deformace tolik neprojeví [21, 22, 25, 26].

PET (Polyetylen)

Pevný, stálý materiál s nízkou teplotní roztažností. Oproti ABS odolává teplotám vyšším než 100 stupňů Celsia, ale je dostupný pouze v čiré variantě, která je přibližně o třetinu dražší než běžný ABS. Materiál není toxický, proto ho lze využívat v potravinářství [7, 10].

Materiály používané pro tisk podpor**HIPS (High Impact Polystyrene)**

HIPS je rozpustný termoplast (polystyrén s přídavkem kaučuku), využívaný u 3D tiskáren se dvěma tiskovými hlavami (Dual-Extruder). Podpurné konstrukce z HIPS lze chemicky odstranit lemonsollem. Po aplikaci HIPS měkne a lze ho jednoduše vyjmout. Práce s lemonsollem je doporučena ve větraných prostorech. [25, 28].

PVA (Polyvinylalkohol)

PVA je vyroben z polymeru, který je rozpustný ve vodě, je tedy stejně jako HIPS vhodný pro dvouhlavé tiskárny, kde se používá jako snadno odstranitelný podpurný materiál. Výhodou PVA je toxická nezávadnost, je proto bezpečný pro lidi, zvířata i životní prostředí, navíc při tisku nezapáchá. Nevýhodami jsou špatná přilnavost k ostatním materiálům, nízká teplota varu a náchylnost na okolní vlhkost, při které materiál velmi rychle měkne [25, 27].

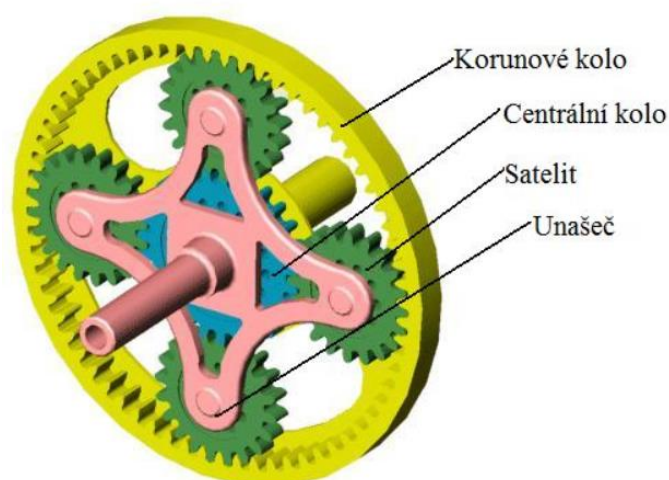
Tab. 2 Doporučené nastavení teplot pro jednotlivé materiály s jejich průměrnou cenou [25, 26, 28].

Materiál	Cena za 1kg filamentu [kč]	Teplota extrudéru [°C]	Teplota podložky [°C]
ABS	600	210 až 230	80 až 100
PLA	550	190 až 210	0 až 50
PC	1 200	250 až 280	100 až 130
PET	750	230 až 260	60 až 80
HIPS	550	210 až 230	90 až 110
PVA	650	170 až 180	40 až 50

V tabulce nejsou záměrně uvedeny doporučené hodnoty rychlosti tisku a výšky vrstvy. Tyto hodnoty nastavuje uživatel v závislosti na požadavcích na model.

1.2 Planetový mechanismus

Planetový mechanismus je využíván především u planetových převodovek, kde umožňuje přenos krouticího momentu mezi vstupním a výstupním členem. Výhodou planetových převodovek je možnost řazení stupně pod zatížením, proto se využívají u obráběcích strojů, automobilů a například i leteckých motorů. Dalším využitím je diferenciál, ve kterém je použit planetový mechanismus s kuželovými koly [30].



Obr. 5 Části planetového mechanismu [33].

1.2.1 Princip planetového mechanismu

Planetový mechanismus se skládá z ozubených kol a unášecí. Ozubená kola, která jsou souosa s unášecí a osou celého mechanismu se nazývají centrální a korunová, ostatní, která se otáčejí na čepech unášecí, označujeme jako satelity. Satelity při pohybu konají složený pohyb, který se skládá z rotačního pohybu kolem své vlastní osy a translačního pohybu po určité trajektorii (často kružnici). Tento složený pohyb je přirovnávaný k pohybu planet kolem Slunce a z něj je také odvozen název mechanismu [29, 32].

Bržděním příslušných kol planetového mechanismu lze získat různé rychlostní stupně. Záleží také, zda jsou vstupní otáčky přiváděny na centrální kolo nebo na unášec. Jestliže jsou vstupní otáčky přiváděny na centrální kolo, vzniká převod dopomala (převodovka se chová jako reduktor), pokud jsou přiváděny na unášec, vzniká převod dorychla (převodovka se chová jako multiplikátor) [29].

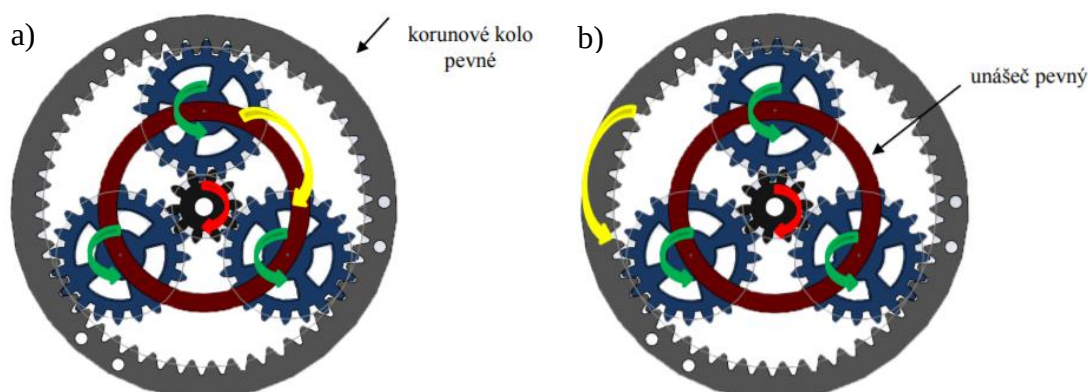
Z jednoho planetového převodu lze tedy získat několik variant rychlostních stupňů, pro tuto bakalářskou práci nejdůležitější první rychlostní stupeň, jako další příklad je popsán zpětný chod, zbylé varianty lze najít v Tab. 3.

- První rychlostní stupeň

Vstupním (hnacím) členem je zde centrální kolo, korunové kolo je bržděno. Výstupním (hnaným) členem je unášec, který spojuje satelity, ty konají v tomto případě složený pohyb z pohybu rotačního kolem své vlastní osy a translačního po kruhové trajektorii kolem osy centrálního kola.

- Zpětný chod

Hnacím členem je opět centrální kolo, brzděn je unášec. Satelity v tomto případě konají pouze rotační pohyb kolem své vlastní osy a mění směr otáčení korunového kola, čímž je dosaženo zpětného chodu.



Obr. 6 Planetový převod [29]: a) první rychlostní stupeň, b) zpětný chod.

Tab. 3 Přehled rychlostních stupňů jednoduchého planetového mechanismu [31].

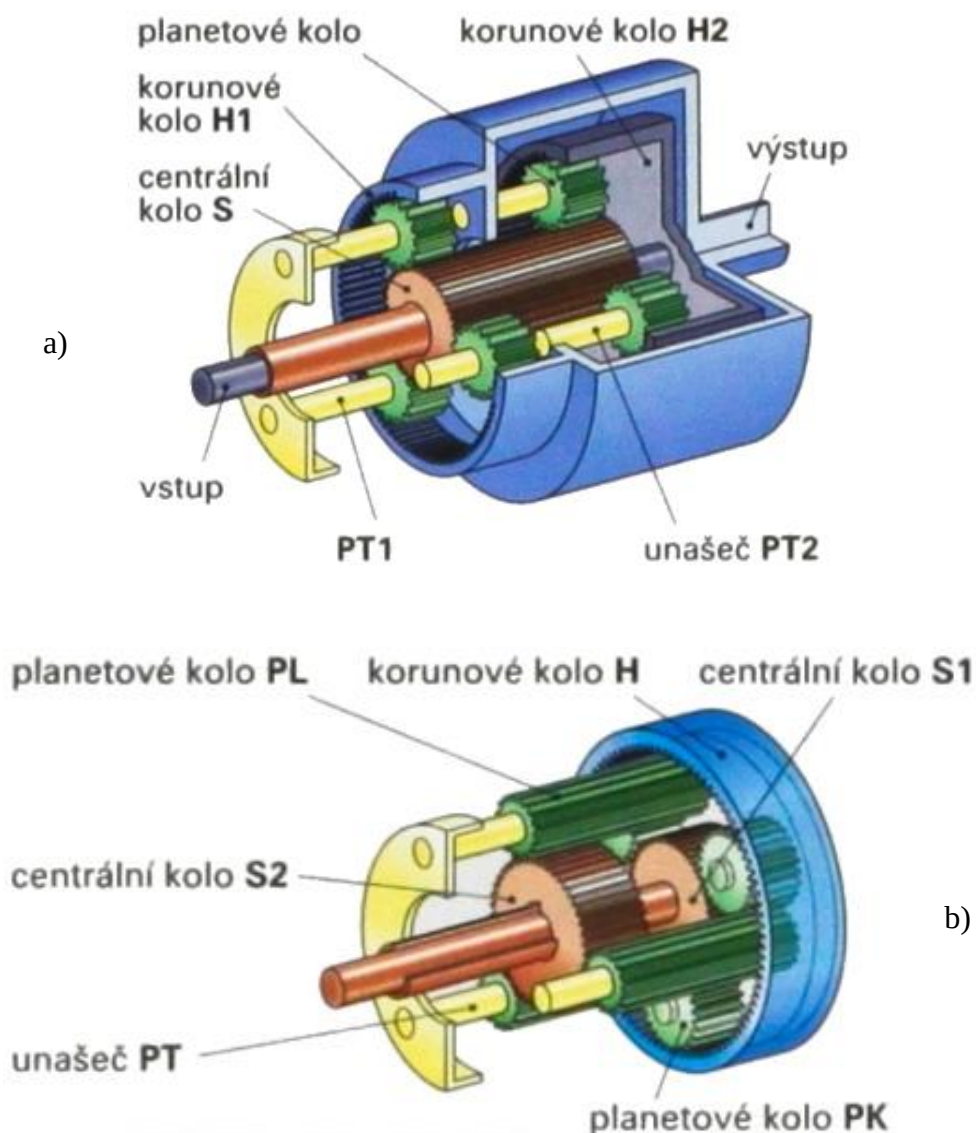
Rychlostní stupeň	Vstup	Bržděné	Výstup
1. rychlostní stupeň	Centrální kolo	Korunové kolo	Unášec
2. rychlostní stupeň	Korunové kolo	Centrální kolo	Unášec
3. rychlostní stupeň	Centrální + Korunové	-	Unášec
Zpětný chod	Centrální kolo	Unášec	Korunové kolo

1.2.2 Využití planetových mechanismů

V praxi se planetový mechanismus využívá především u převodovek, které umožňují stroji optimálně fungovat za všech podmínek. Převodovka je mechanický měnič velikosti točivého momentu, který podle zařazeného rychlostního stupně mění vstupní točivý moment motoru [29].

- Mechanické planetové převodovky

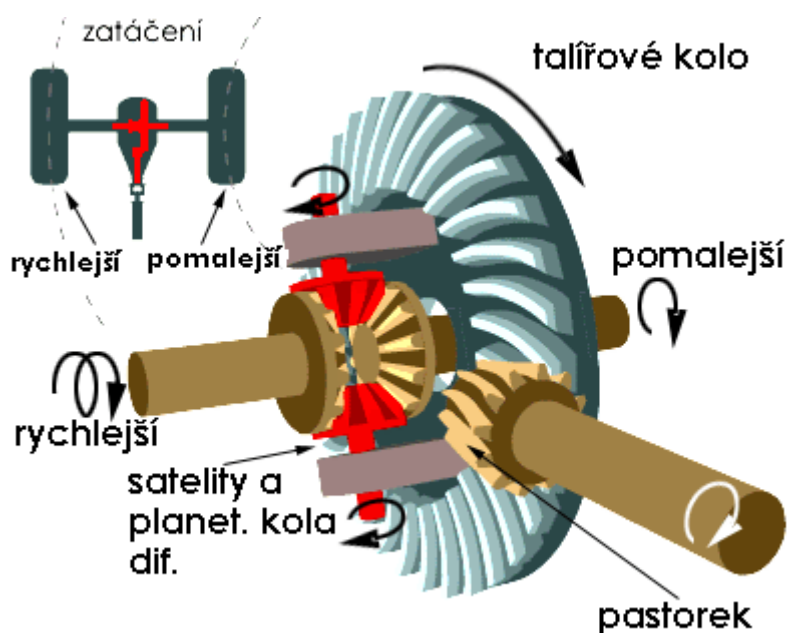
Mezi nejznámější patří převodovky Simpson a Ravigneaux, využívané v automatických převodovkách. Převodovka typu Simpson využívá dlouhého centrálního kola, na kterém jsou umístěny dvě řady satelitů s centrálními koly. Ravigneaux obsahuje dvě centrální kola, dvě řady satelitů se společným unášečem a jedno korunové kolo, které slouží jako výstup [29, 31].



Obr. 7 Převodovka [31]: a) Simpson, b) Ravigneaux.

- Diferenciál

Diferenciál je nedílnou součástí všech dnešních automobilů. Působí při průjezdu zatáčkou, kdy se kola otáčejí různou rychlostí, to je způsobeno odvalováním kol na různém poloměru. Diferenciál zajišťuje vyrovnání otáček hnacích kol a zároveň rozděluje hnací točivý moment na obě kola [29, 31].



Obr. 8 Diferenciál [35].

Výhody planetového mechanismu [30]:

- velký převodový poměr na malé rozměry (dobře využitý prostor pro uložení),
- hnací i hnaný hřídel jsou souosé,
- delší životnost ložisek u točivých částí (při použití většího počtu satelitů),
- tuhá konstrukce,
- tichý chod (díky stálému záběru ozubených kol),
- vysoká účinnost (kolem 97 %).

Nevýhody planetového mechanismu [30]:

- složitá konstrukce, potřebná přesnější výroba i montáž,
- nutnost dobrého mazání,
- při malém převodovém poměru je potřeba více kol než u předlokové převodovky.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Výstupem této bakalářské práce je model planetové převodovky vyrobený pomocí 3D FDM tisku. Cílem bylo zjistit, zda je technologie schopna vyrobit díly s dostatečnou přesností a zajistit tak hladký chod mechanismu. V práci jsou také popsány komplikace, které vznikaly při tvorbě modelu a tisku všech částí s jejich následným řešením. Funkčnost a smontovatelnost modelu je doplněna výpočty.

2.1 Návrh planetové převodovky

Prvotním plánem bylo vyrobit planetovou převodovku použitelnou pro modelářský trh (požadovány malé rozměry a nízká hmotnost). Jako konkrétní příklad byla vybrána planetová převodovka Pro Speed 400, jejíž parametry jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Parametry planetové převodovky Pro Speed 400 [42].

Ozubená kola	Centrální	Korunové	Satelit
Modul – m [-]	0,5	0,5	0,5
Počet zubů – z [-]	18	42	12
Průměr roztečné kružnice – d [mm]	9	21	6
Převodový poměr	3,3		

Od této myšlenky se však muselo ustoupit z důvodu omezených možností 3D FDM tisku, který oproti konvenčním technologiím nedosahuje potřebné přesnosti pro výrobu ozubených kol s malým modulem. Tisknuté části také nedosahují potřebné pevnosti a hůře odolávají mechanickému narušování, proto musí být v kritických místech nahrazeny kovovými, aby nedocházelo k rychlému opotřebení a znehodnocení převodovky.

Kovové díly, které nahrazují vytisknuté části v kritických místech, je možné na zakázku vyrobit běžnými konvenčními metodami. Výroba dílů na zakázku je však drahá, proto je v modelu použit pouze materiál běžně dostupný v každém železářství, což výrazně snižuje náklady na výrobek. Nevýhodou dílů zakoupených v železářství je jejich velikost, kvůli které je potřeba zvětšit i tisknuté části a tím celkové rozměry planetové převodovky.

Oproti kovovým, tisknuté plastové tenkostěnné díly nedosahují vysoké pevnosti a jsou náchylné deformacím. Po konzultaci s Ing. Oskarem Zemčíkem, Ph.D byla stanovena minimální tloušťka stěny na hodnotu 2,5 milimetru. Tato podmínka také nepříznivě ovlivňuje výsledné rozměry planetové převodovky.

Jednotlivé díly jsou navrženy bez nutnosti tisku podpor, tato úprava mírně zvyšuje hmotnost celého modelu. Výhodou tisku bez podpor však je, že nejsou potřeba žádné dokončovací operace, které by mohly vytisknutý díl poškodit.

Pro model je namísto šikmého zvoleno přímé ozubení, a to z následujících důvodů:

- při FDM tisku šikmého ozubení by docházelo k tisku podpor v oblasti zubních mezer, následné mechanické odstranění podpor by byl náročný proces, který by mohl poškodit ozubení,
- šikmé ozubení má sice větší kontaktní plochu pro přenášený krouticí moment, ale při zpětném chodu by mohlo docházet k zasekávání, navíc by zde mohly vznikat komplikace z hlediska axiálních sil, které šikmé ozubení vyvozuje.

Mezi možnosti jak upevnit kovové části do vytisknutých patří např. lepení, lisování či spojení přes tvarový prvek. V tomto projektu byla zvolena možnost lisování spolu s upevněním přes tvarový prvek.

Oproti lepení je lisování náročnější proces, který vyžaduje přesné rozměry otvorů. Pro velké otvory postrádá lisování smysl, pro příliš malé může dojít vlivem velkých sil při lisování k poškození vytisknuté části.

FDM technologie pracuje s tolerancí přibližně $\pm 0,2$ milimetru, proto je nutné správně určit přídatky na rozměry funkčních ploch (délkové rozměry, otvory pro ložiska a šrouby). Nepřesnosti ovlivňuje také teplotní roztažnost tisknutého materiálu, která se nejvýrazněji projevuje především u otvorů, které jsou oproti CAD modelu vždy výrazně menší. Po prvotních neúspěšných pokusech byl zvolen přírůstek 0,3 milimetru pro kruhové otvory a 0,15 milimetru pro délkové rozměry.

Po zhodnocení všech výše uvedených bodů bylo nutné upustit od výroby planetové převodovky podle vzoru Pro Speed 400, a pro model byly zvoleny parametry dle Tab. 5.

Při výpočtu geometrie ozubeného soukolí v Tab. 5 bylo využito následujících vztahů [36]:

$$d = m \cdot z \quad (1)$$

$$h_a = m \quad (2)$$

$$h_f = 1,25 \cdot m \quad (3)$$

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \quad (4)$$

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (5)$$

$$c = h_f - h_a \quad (6)$$

$$p = \pi \cdot m \quad (7)$$

Tab. 5 Zvolené vstupní parametry planetové převodovky.

Ozubená kola	Centrální	Korunové	Satelit
Modul – m [-]	0,8	0,8	0,8
Počet zubů - z [-]	25	59	17
Průměr roztečné kružnice – d [mm]	20	47,2	13,6
Průměr patní kružnice – d_f [mm]	18	45,2	11,6
Průměr hlavové kružnice – d_a [mm]	21,6	48,8	15,2
Šířka ozubení – b [mm]	15	20	15
Výška hlavy zubu – h_a [mm]	0,8		
Výška paty zubu – h_f [mm]	1		
Výška zubu – h [mm]	1,8		
Hlavová vůle – c [mm]	0,2		
Rozteč – p [mm]	2,51		
Úhel profilu zubů – α [°]	20		
Jednotkové posunutí - x [-]	0		

Sudý a lichý počet zubů centrálního a korunového kola je zvolen záměrně, aby nedocházelo k častému záběru stejných zubů.

Nový model dosahuje 2,5 krát větších rozměrů než planetová převodovka Pro Speed 400, proto ztrácí využití v modelářství. Se svou velikostí by byl model vhodný například pro univerzální planetární mixéry, které se používají pro intenzivní provoz. Výkon těchto robotů se pohybuje okolo 750 W, výstupní otáčky v rozmezí od 35 do 250 1/min [43].

Jako ekvivalent zátěže na planetový převod byla použita stolní vrtačka s výkonem 500 W a vstupními otáčkami 890 1/min. Dle vztahu (14) je převodový poměr vyrobeného modelu roven 3,36. Výstupní otáčky po připojení modelu ke stolní vrtačce jsou pak dány vztahem (8) [36].

$$n_{výstup} = \frac{n_{vstup}}{i} \quad (8)$$
$$n_{výstup} = \frac{890}{3,36} = 264,8 \text{ 1/min}$$

kde $n_{výstup}$ [1/min] jsou výstupní otáčky, n_{vstup} [1/min] jsou vstupní otáčky a i [-] převodový poměr.

V následující výpočtové části budou použity parametry stolní vrtačky, jelikož výstupní otáčky se téměř shodují s maximálními výstupními otáčkami prodáváných planetárních mixérů.

2.2 Výpočtová část

Před modelováním v 3D CAD programu je potřeba provést prvotní výpočty a dodržet určité podmínky, aby byl mechanismus funkční. Tato část se skládá z výpočtu mezního počtu zubů ozubených kol a podmínek pro funkčnost planetového mechanismu, dále je zde uveden výpočet momentové a silové zátěže na jednotlivé členy.

2.2.1 Teoretický mezní počet zubů

Při výrobě ozubených kol je potřeba dodržet minimální počet zubů, pokud tato podmínka není splněna, dochází k podřezávání, které oslabuje zub v místě největšího ohybového zatížení (zeslabení v patě zubu) a může dojít k odlomení. Podmínka pro výpočet minimálního počtu zubů je dána vztahem (9). Nejčastěji volený záběrový úhel je 20°, tento úhel je zvolen i pro všechna ozubení ve vyrobeném modelu. Pro tuto hodnotu je teoretický mezní počet zubů roven [34, 35, 37].

$$z_t = \frac{2}{(\sin \alpha)^2} \quad (9)$$
$$z_t = \frac{2}{(\sin 20^\circ)^2} = 17$$

kde z_t [-] je teoretický mezní počet zubů, α [°] je záběrový úhel.

V praxi je možné dopustit mírného podřezání, proto lze mezní počet zubů snížit až na 14. Pokud bychom chtěli zabránit podřezání, je možné provést korekci ozubení, při které dochází k posunutí profilu kola. V případě výroby ozubení technologií FDM je však zbytečné řešit výpočet korekce, technologie nedosahuje takové přesnosti, aby se korekce výrazně projevila [34, 35, 37].

2.2.2 Podmínka smontovatelnosti

Podmínka smontovatelnosti zaručuje, že všechna kola do sebe zapadají a dokáží přenášet krouticí moment. Po dosazení do vztahu (10) lze vidět, že podmínka smontovatelnosti je splněna [35].

$$\frac{z_k + z_c}{q} = \text{celé číslo} \quad (10)$$
$$\frac{59 + 25}{3} = 28$$

kde z_k [-] je počet zubů korunového kola, z_c [-] představuje počet zubů centrálního kola a q [-] je počet satelitů.

2.2.3 Podmínka stejných osových vzdáleností

Podmínka osové vzdálenosti je dána vztahem (11)

$$\frac{d_k}{2} = \frac{d_c}{2} + d_s \quad (11)$$

kde d_k [m] představuje průměr roztečné kružnice korunového kola, d_c [m] je průměr roztečné kružnice centrálního kola a d_s [m] značí průměr roztečné kružnice satelitu.;

Dosazením vztahu (1) do vztahu (11) lze získat vztah (12) pro výpočet počtu zubů satelitu

$$z_s = \frac{z_k - z_c}{2} \quad (12)$$
$$z_s = \frac{59 - 25}{2} = 17$$

kde z_k [-] představuje počet zubů korunového kola, z_c [-] je počet zubů centrálního kola a z_s [-] značí počet zubů satelitu.

2.2.4 Podmínka vůle mezi sousedními satelity

Zajišťuje umístění několika satelitů podél společného kruhu v jedné rovině bez kontaktu vrcholů zubů sousedních satelitů. Podmínka sousedství je stanovena pro planetové ozubení, ve kterém jsou satelity rovnoměrně rozloženy podél obvodu unášeče. Po dosazení do vztahu (13) lze vidět, že podmínka vůle mezi sousedními satelity je splněna [35].

$$q < \frac{\pi}{\sin^{-1} \left(\frac{z_c + x + 2 \cdot \bar{h}_a}{z_c + z_s} \right)} \quad (13)$$

$$3 < \frac{\pi}{\sin^{-1} \left(\frac{25 + 0 + 2 \cdot 1}{25 + 17} \right)}$$

$$3 < 4,499$$

kde z_s [-] je počet zubů satelitu, z_c [-] představuje počet zubů centrálního kola a q [-] je počet satelitů, x [-] je jednotkové posunutí a $\bar{h}_a$ [-] součinitel výšky hlavy zubu.

2.2.5 Síly na planetový převod

Pro záběh mechanismu byla použita stolní vrtačka s výkonem 500 W a otáčkami 890 ot/min, pro tyto hodnoty se stanoví krouticí moment a obvodová síla pomocí následujících vztahů. Výpočet životnosti ložisek není třeba provádět, dříve dojde k opotřebením vytisknutých částí [36].

Převodový poměr i pro zabrzdné korunové kolo lze stanovit ze vztahu (14),

$$i = 1 + \frac{z_k}{z_c} = \frac{z_c + z_k}{z_c} \quad (14)$$

$$i = \frac{25 + 59}{25} = 3,36 [-]$$

kde z_k [-] je počet zubů korunového kola, z_c [-] představuje počet zubů centrálního kola.

Moment M_c v ozubení centrálního kola je dán vztahem (15),

$$M_c = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{vstup}}{60}} \quad (15)$$

$$M_c = \frac{500}{2 \cdot \pi \cdot \frac{890}{60}} = 5,36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde P [W] je výkon a n_{vstup} [1/min] otáčky vrtačky.

Moment M_k v ozubení korunového kola je dán vztahem (16),

$$M_k = M_c \cdot \frac{z_k}{z_c} \quad (16)$$

$$M_k = 5,36 \cdot \frac{59}{25} = 12,66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Moment M_u na unášечи je dán vztahem (17),

$$M_u = M_c \cdot \frac{(|z_c| + |z_k|)}{z_c} \quad (17)$$

$$M_u = 5,36 \cdot \frac{(|25| + |59|)}{25} = 18,03 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Obvodovou sílu F_{oc} v ozubení centrálního kola lze stanovit ze vztahu (18),

$$F_{oc} = \frac{2 \cdot M_c}{q \cdot d_c} \quad (18)$$

$$F_{oc} = \frac{2 \cdot 5,36}{3 \cdot 0,02} = 178,66 \text{ N}$$

kde q [-] je počet satelitů a d_c [m] je průměr centrálního kola.

Obvodovou sílu F_{ok} v ozubení korunového kola lze stanovit ze vztahu (19),

$$F_{ok} = \frac{2 \cdot M_k}{q \cdot d_k} \quad (19)$$

$$F_{ok} = \frac{2 \cdot 12,66}{3 \cdot 0,0472} = 126,28 \text{ N}$$

kde d_k [m] je průměr korunového kola.

Obvodovou sílu F_{ou} v ozubení unášече lze stanovit ze vztahu (20),

$$F_{ou} = \frac{2 \cdot M_u}{q \cdot (d_c + d_s)} \quad (20)$$

$$F_{ou} = \frac{2 \cdot 18,03}{3 \cdot (0,02 + 0,0136)} = 363,09 \text{ N}$$

2.3 Výroba planetové převodovky

2.3.1 Slic3r programy

Funkcí slic3ru je příprava souborů STL. na 3D tisk. Mezi nejznámější slic3r programy patří například Kisslicer nebo Prusa Slic3r, které umožňují rozmístit jednotlivé díly na tiskovou plochu, nastavit základní parametry 3D tisku a následně vygenerovat soubor typu *.gcode, podporovaný 3D tiskárnou. Na Obr. 10 je znázorněno rozmístění jednotlivých dílů na tiskovou plochu, pro polohování nabízí program jednoduché posouvání po podložce, ze složitějších úkonů např. otočení kolem všech os, nastavení měřítka tisknutého dílce nebo jeho řez.

File Plater Object Window Help

Plater Print Settings Filament Settings Printer Settings

General

Layer height: 0.3 mm

Perimeters: 3 (minimum)

Solid layers: Top: 3 Bottom: 3

Infill

Fill density: 20 %

Fill pattern: Honeycomb

Top/bottom fill pattern: Rectilinear

Support material

Generate support material: ☐

Pattern spacing: 2.5 mm

Contact Z distance: 0.2 (detachable) mm

Don't support bridges: ☒

Raft layers: 0 layers

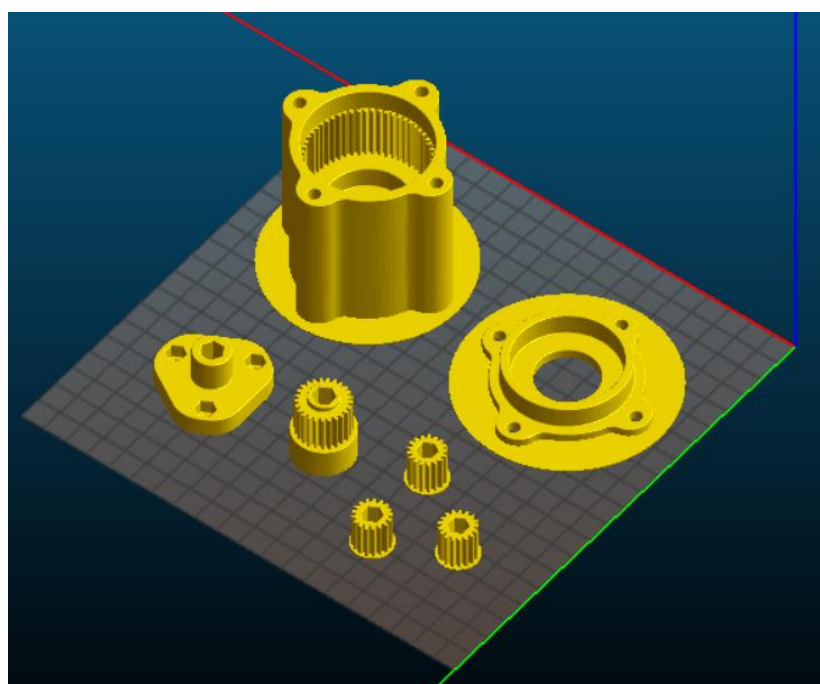
Speed

Perimeters: 60 mm/s

Infill: 80 mm/s

Travel: 130 mm/s

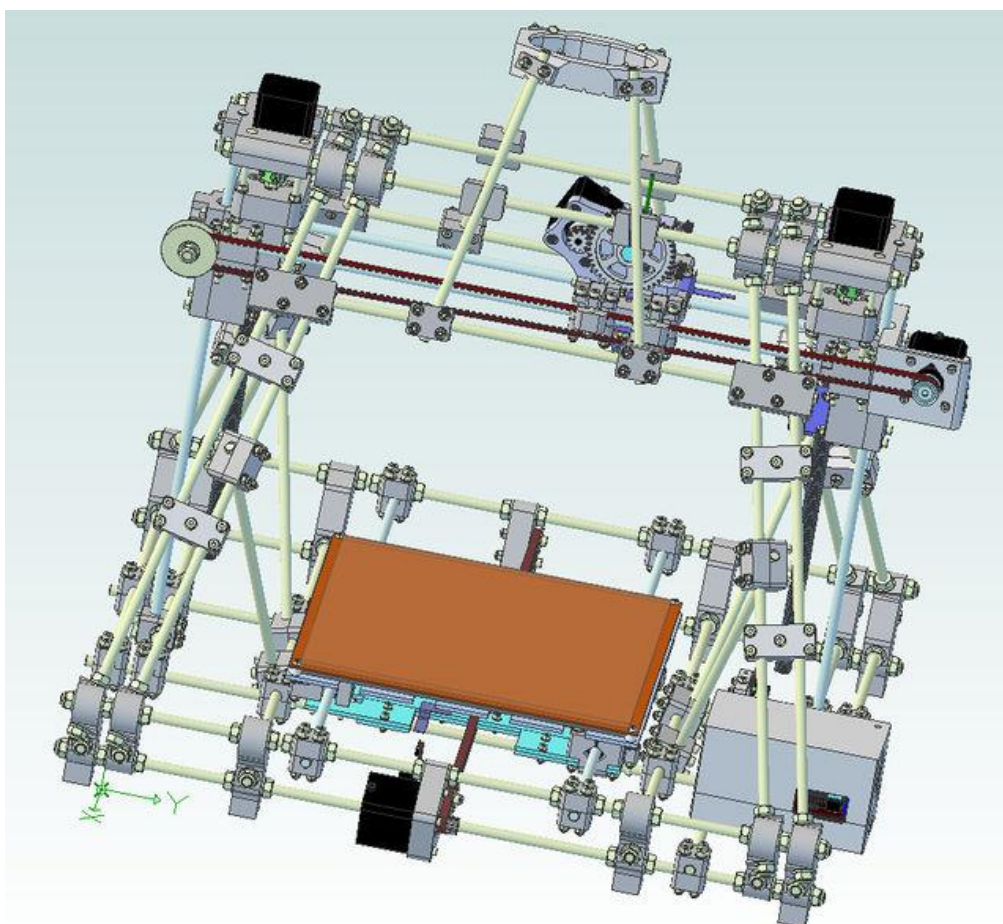
Obr. 9 Nastavení parametrů tisku.



Obr. 10 Rozmístění jednotlivých dílů na tiskovou plochu.

2.3.2 RepRap tiskárna SINUHED

Pro tisk byla použita RepRap tiskárna typu SINUHED, která vychází z konstrukce tiskárny Mendel (2009), má však složitější, ale o to pevnější rám. Většina dílů je vyrobena za pomoci 3D tisku, dále jsou použity kovové tyče, šrouby, krokové motory a hlavice. Tiskárna je přímo propojena s počítačem, ze kterého jsou data ve formátu *.gcode exportována do tiskárny [39, 40].



Obr. 11 RepRap tiskárna Sinuhed [38].

Tab. 6 Parametry 3D tiskárny SINUHED [39, 40].

Rozměry tiskárny (š x d x v) [mm]	700 x 600 x 700
Max. velikost tisknutého dílce (X x Y x Z) [mm]	250 x 250 x 210
Hmotnost [kg]	22
Maximální příkon [W]	350
Napájení [V]	230
Průměr struny [mm]	3
Rychlost tisku [mm/s]	80 až 120
Rychlost posuvu [mm/s]	150
Maximální teplota tisku (trysky) [°C]	300
Maximální teplota podložky [°C]	150

2.3.3 Příprava před tiskem

Před tiskem je potřeba řádně připravit tiskovou podložku. Vyhřívaná podložka zabraňuje teplotním deformacím, vlivem ochlazování objektu, také zvyšuje přilnavosti první tisknuté vrstvy. Při nízké přilnavosti materiálu k podložce může dojít k odlepení od podložky a následné deformaci. Jednou z možností, jak zvýšit přilnavost, je vytvoření technologických podstav v kritických místech (nejvíce náchylné jsou tenké protáhlé části). Tyto podstavy zvyšují stykovou plochu mezi tisknutým předmětem a podložkou a zabraňují tak odlepení. Tloušťka technologické podstavy se obvykle volí jednu až dvě tisknuté vrstvy, po dokončení tisku je pak snadné technologickou podstavu odstranit za pomoci kleští či nůžek.

Další možností je použití folie nebo pásky, které se lepí přímo na podložku. Tato operace musí být provedena v čistém prostředí, jinak může dojít k vyboulení, a při následném tisku k znehodnocení dílce. Nejčastěji používané jsou kaptonové pásky na Obr. 12 a) [44].

Jako levnou náhradu folie či pásky lze použít libovolné tuhé lepidlo (např. Kores), důležité je, aby bylo lepidlo řádně rozetřeno po celém povrchu a nezanechalo na podložce nerovnosti, poté dostatečně zaschlo.

Další náhradou folie či pásky může být ABS juice. Jedná se o roztok acetonu s rozpuštěnými zbytky ABS. Po nanesení na podložku aceton rychle vysychá a zanechává na podložce vrstvu ABS, která napomáhá přilnavosti tisknutého filamentu. Pro snadnější aplikaci a rovnoměrné nanesení je vhodné použít rozprašovač [44].

Při samotném tisku je tedy vhodné vždy zkontrolovat pokládání první vrstvy, právě při tomto kroku dochází nejčastěji k chybám. Po kontrole lze tiskárnu opustit, předpokládá se, že další tisk bude probíhat bezproblémově. Potřeba je také zkontrolovat, zda je v podavači dostatek filamentu potřebného pro tisk dílce. Pokud by filament došel, tisk by byl přerušen a při následné výměně filamentu by mohlo dojít například k posunutí tiskové hlavy, nebo ke špatné návaznosti vláken. Tato chyba by vedla k deformaci tisknutého dílu.

a)



b)



Obr. 12 a) Kaptonová páska [45], b) ABS juice s lepidlem Kores [46].

2.3.4 Tisk jednotlivých dílů

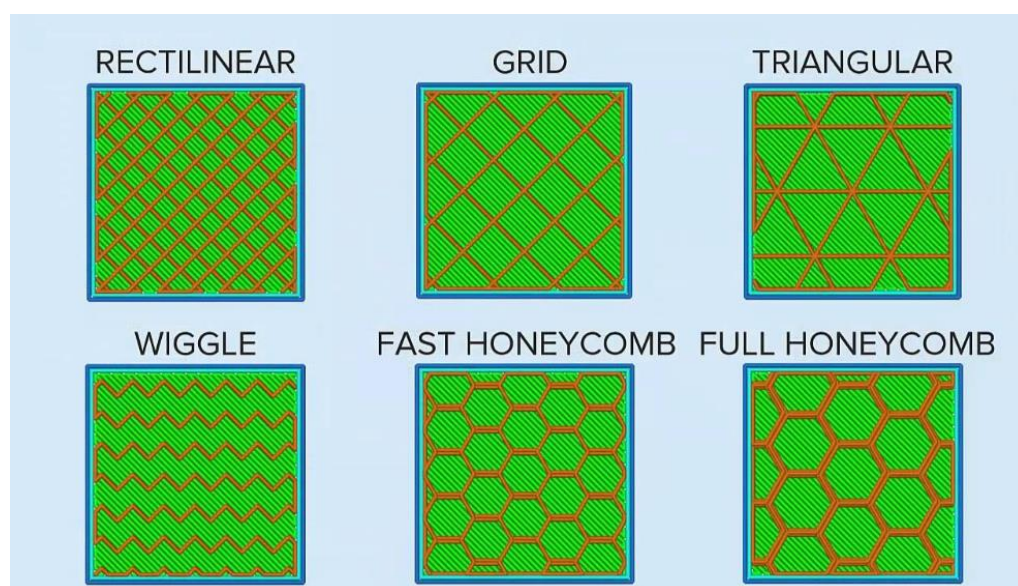
Pro jednotlivé části byly nastaveny parametry tisku dle Tab. 7. Části s ozubením byly tisknuty s nižší tloušťkou vrstvy a nižší rychlostí, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality. Výjimkou je korunové kolo, jelikož se jedná o největší část, která tvoří podstatnou část nákladů, byla zde volena rychlost jako pro dílce bez ozubení. Styl výplně je rectilinear (rovnoběžný), který lze vidět na Obr. 13. Oproti výplni honeycomb (šestiúhelník) má sice menší pevnost, samotný tisk je však rychlejší.

Tab. 7 Nastavení tisku jednotlivých dílů.

Součást	Výška vrstvy [mm]	Tloušťka housenky [mm]	Množství výplně [%]	Styl výplně [-]	Rychlost [mm.s ⁻¹]
Korunové kolo	0,25	0,45	50	rectilinear	45
Centrální kolo	0,25	0,45	50	rectilinear	32
Unášeč	0,33	0,6	50	rectilinear	45
Satelit	0,25	0,45	50	rectilinear	32
Příruba	0,33	0,6	50	rectilinear	45

Tab. 8 Hmotnost, objem a čas tisku jednotlivých dílů.

Součást	Hmotnost [g]	Objem [cm ³]	Čas tisku [min]
Korunové kolo	81	108,8	341
Centrální kolo	12	8,5	52
Unášeč	11	7,8	43
Satelit	3	4,8	21
Příruba	19	13,1	83
SOUČET	126	143	582

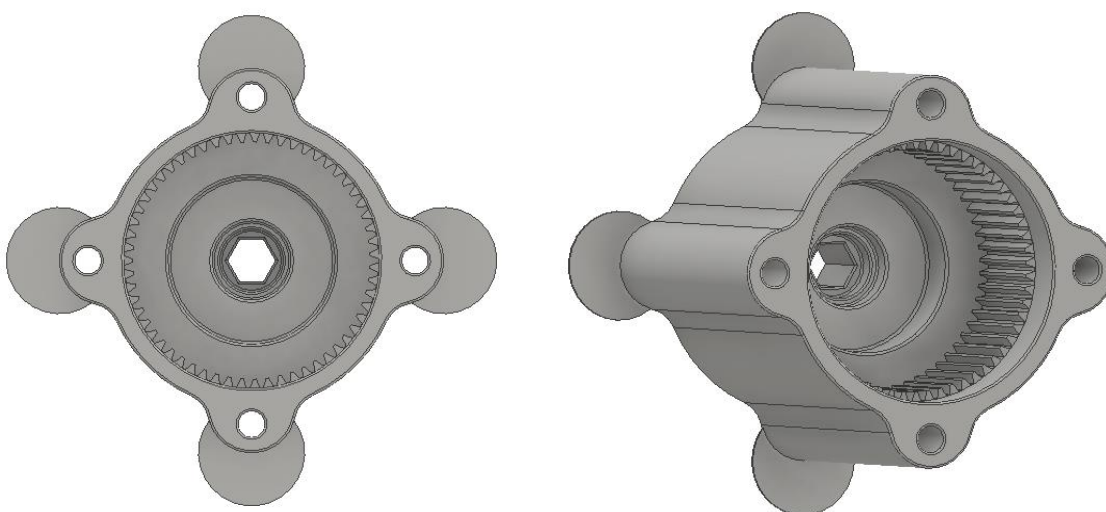


Obr. 13 Možnosti tvaru výplně [41].

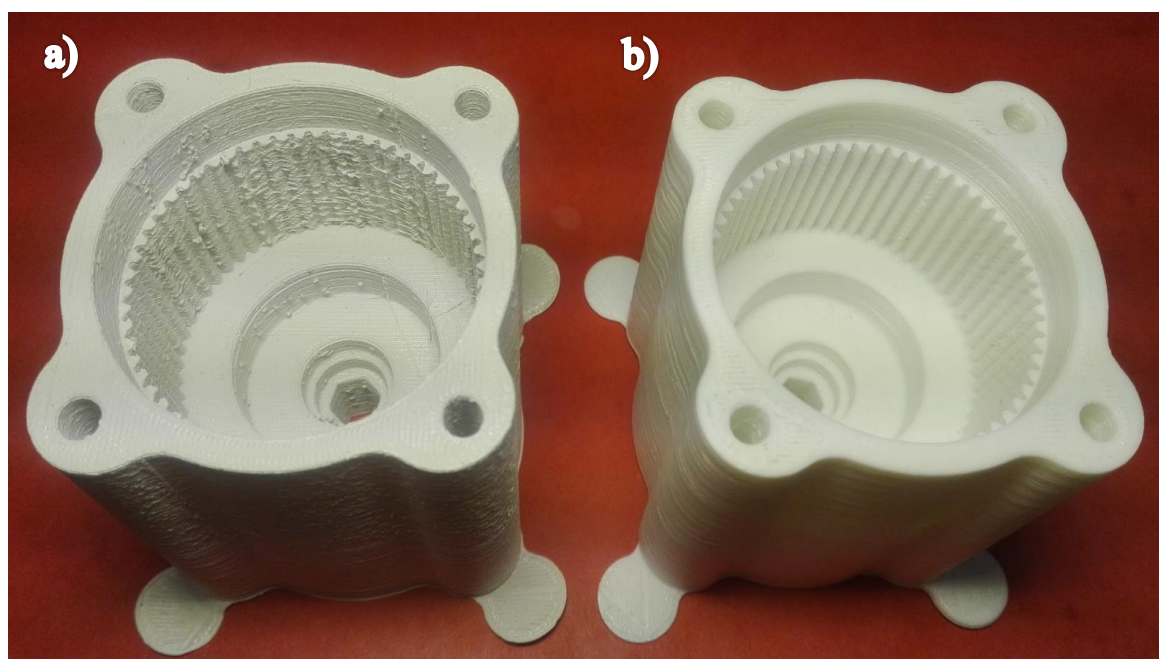
- Schránka s korunovým kolem

Schránka korunovým kolem byla tisknuta dvakrát. Při prvním tisku byla zvolena vysoká rychlost tisku, která neměla vliv na vnější tvary, bohužel při tisku vnitřního ozubení došlo k tažení vlákna a znehodnocení, to lze vidět na Obr 15 a). Druhý tisk s menší rychlostí byl úspěšný, po odstranění technologické podstavy nebyla potřeba žádná další úprava.

Otvory pro šrouby po obvodu schránky, které drží celý mechanismus pohromadě, jsou voleny záměrně tak, aby procházely skrz jednotlivé vrstvy. Po následném spojení šrouby dojde ke zpevnění celé schránky ve směru nejslabší soudržnosti vláken a tím větší odolnosti výrobku.



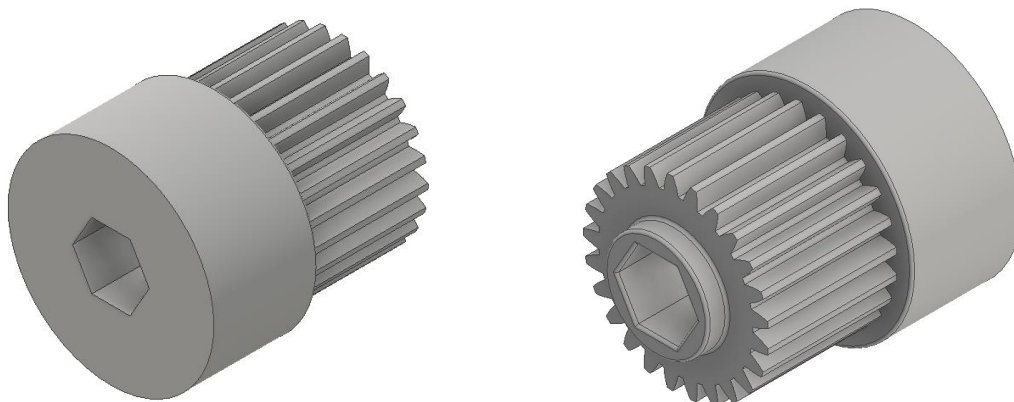
Obr. 14 Model schránky s korunovým kolem.



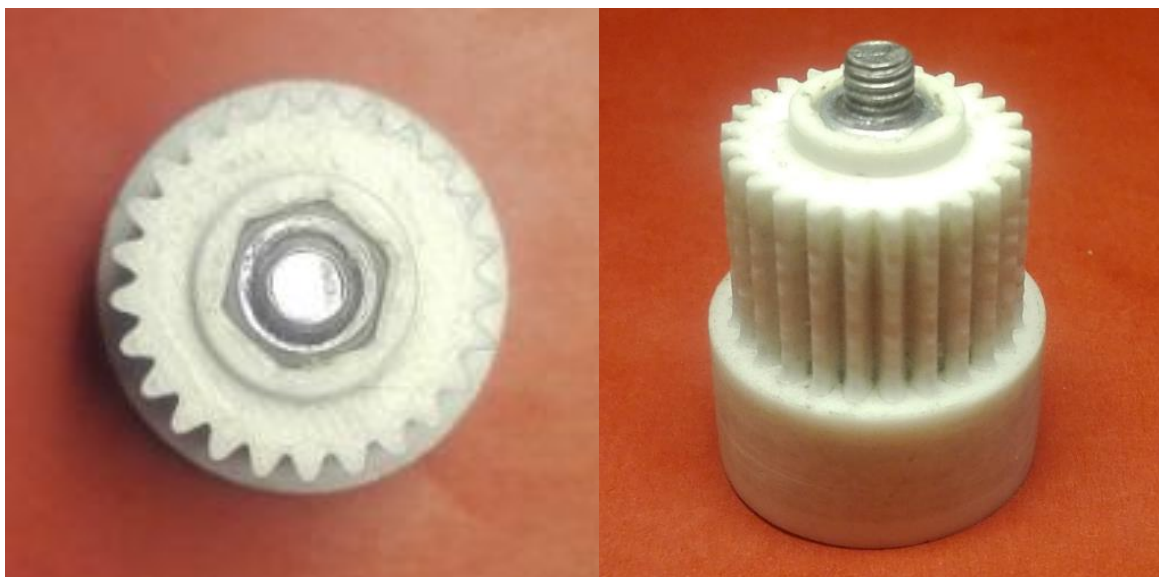
Obr. 15 Vytisknutá schránka s korunovým kolem: a) vyšší rychlost tisku, b) nižší rychlost tisku.

- Centrální kolo

Tisk proběhl bez problémů a na centrálním kole nebyly provedeny žádné další úpravy.



Obr. 16 Model centrálního kola.

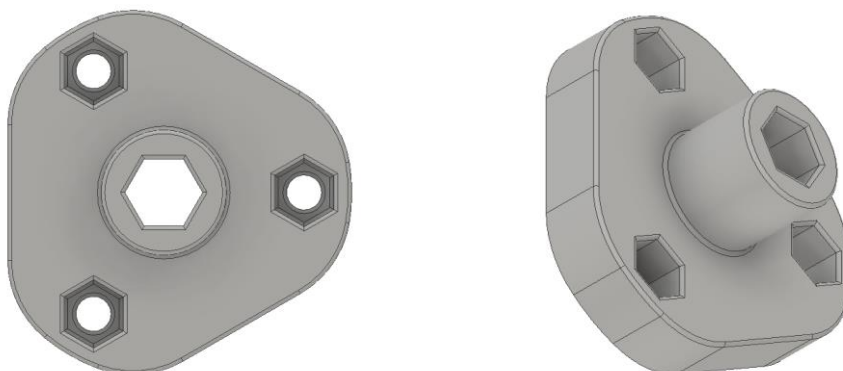


Obr. 17 Vytisknuté centrální kolo.

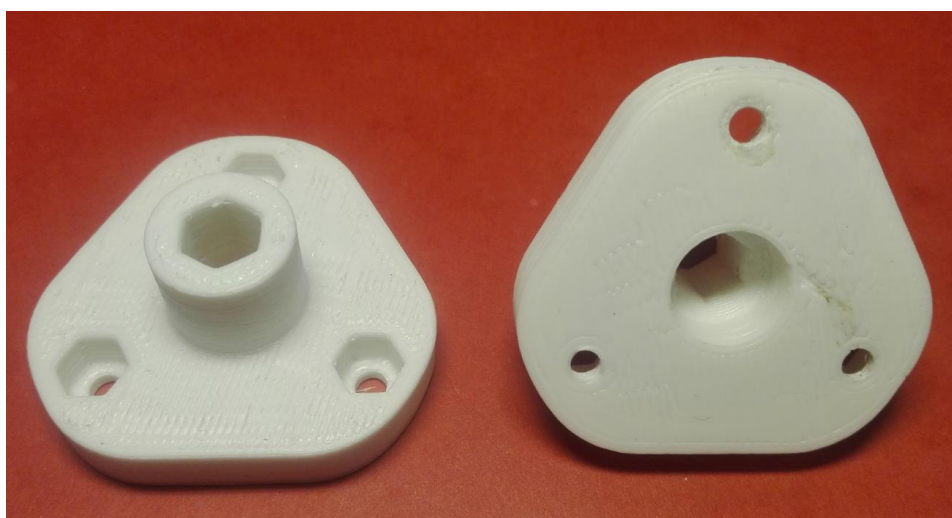
- Unášeč

Při tisku unášeče se vyskytly problémy, které bylo potřeba vyřešit. Unášeč byl tisknut bez přidání technologické vrstvy (jeho podstava se blíží jednoduchému kruhovému tvaru bez kritických míst). Při prvním tisku došlo k odlepení jednoho rohu unášeče, tato vada by vedla k vyosení děr na unášeči a měla by vliv na funkčnost mechanismu, díl musel být vyřazen. Při druhém tisku bylo chybně zvoleno množství výplně, které vedlo k drsnému vrásnitému povrchu. Úspěšný byl až třetí tisk, který proběhl bez komplikací.

V unášeči byl potřebný přechod z většího otvoru do menšího, pro který se běžně používají podpory. Tento konstrukční prvek byl vyřešen za pomoci přechodu z širší do užší části pod úhlem 45 stupňů, díky kterému nebylo potřebné použití podpor. Výsledný tvar lze vidět v pravé části na Obr. 19.



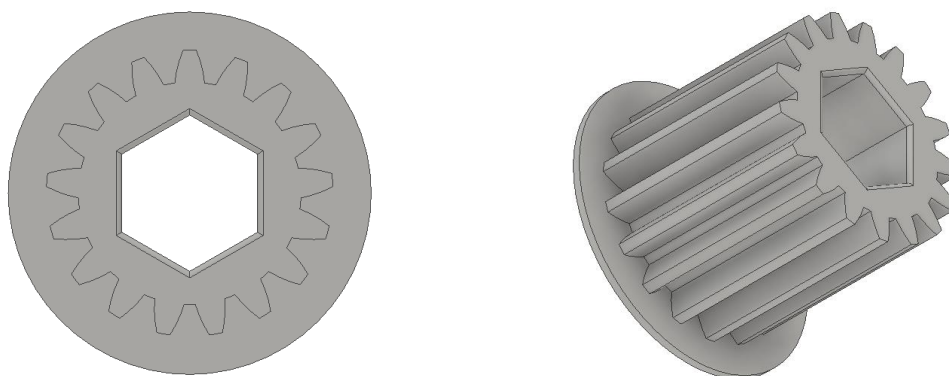
Obr. 18 Model unášeče.



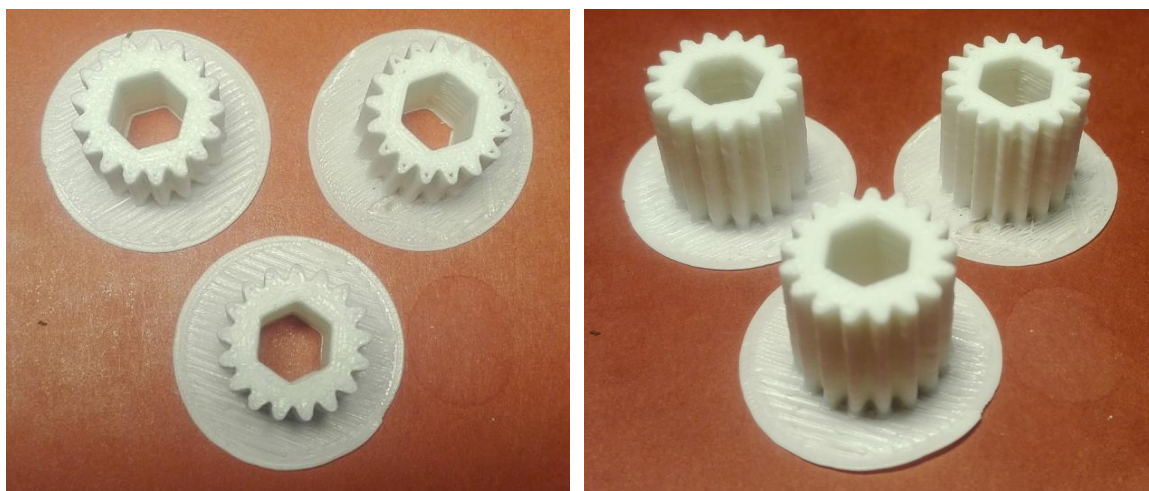
Obr. 19 Vytisknutý unášeč.

- Satelity

Tisk všech satelitů proběhl bez problémů, jedinou úpravou bylo odstranění technologických podstav a následné zabroušení. Technologické podstavy byly pro tisk satelitů důležitým prvkem, při tisku ozubení přímo na podložku může dojít ke špatnému uchycení nataveného filamentu a tím pádem znehodnocení ozubení.



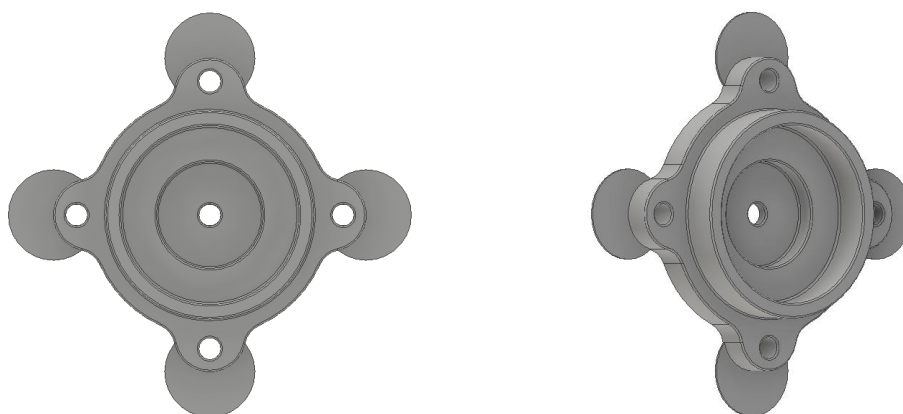
Obr. 20 Model satelitu.



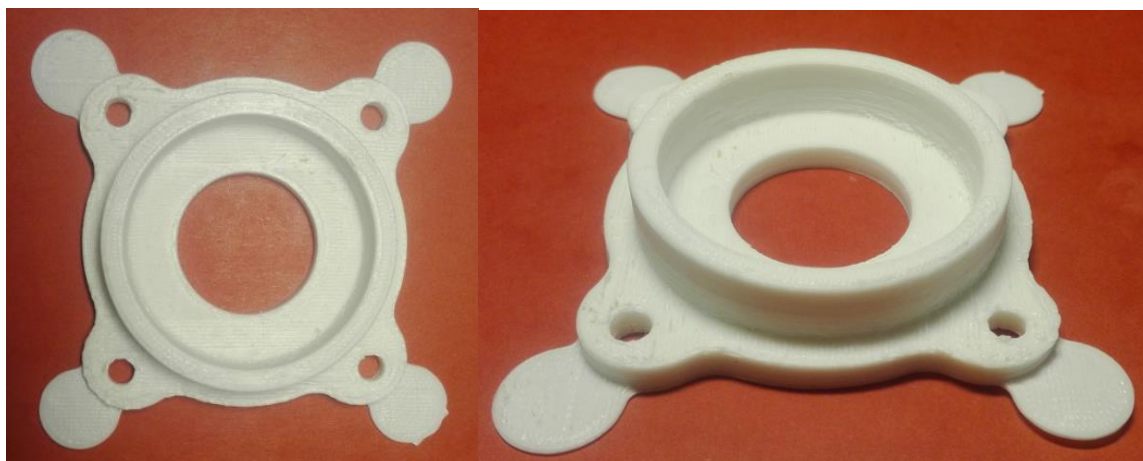
Obr. 21 Vytisknuté satelity.

- Příruba

Tisk příruba proběhl stejně jako tisk centrálního kola bez problémů, jedinou úpravou bylo odstranění technologických podstav.



Obr. 22 Model příruba.

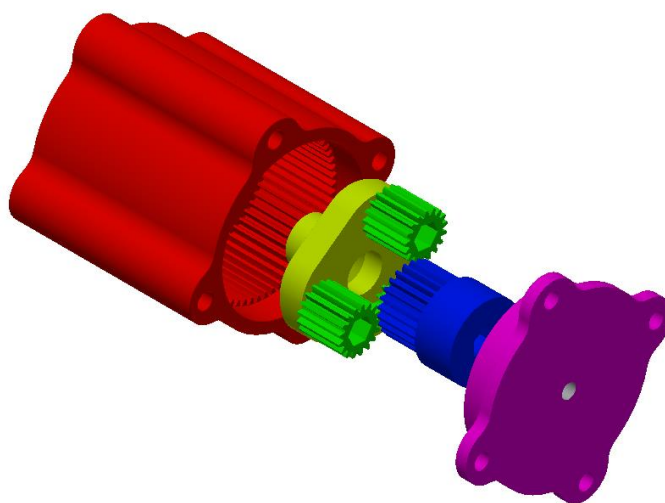


Obr. 23 Vytisknutá příruba.

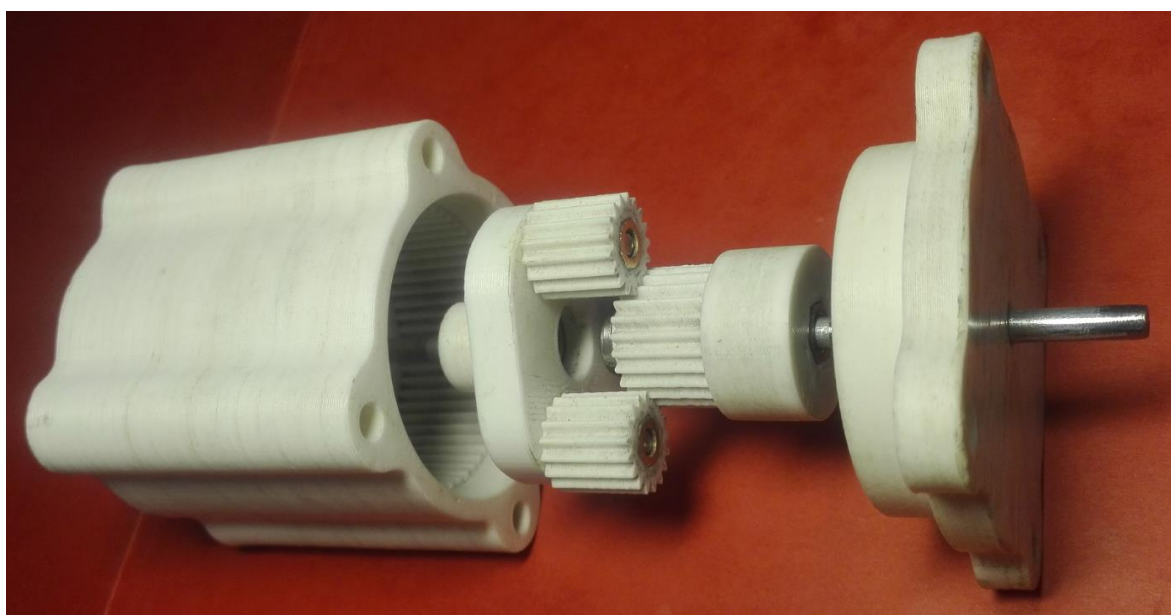
2.3.5 Sestavení planetové převodovky

Nejprve bylo nutné vlisovat kovové části do vytisknutých. Tato operace byla provedena pomocí svěráku. Následně byly k unášeči a centrálnímu kolu připevněny hřídele, a to tak, že byly našroubovány do kovových částí a za pomoci lepidla na závity LOCTIVE zajištěny na svém místě. Po zatvrdnutí lepidla mohla být planetová převodovka složena.

Po sestavení byl pohyb s mechanismem velice obtížný, bez použití kleští na uchycení hřídele téměř nemožný. Hladký chod mechanismu byl zajištěn až po několika minutách připojení k vrtačce (parametry uvedeny v kapitole síly na planetový převod). Při záběhu mechanismu vrtačkou byl použit silikonový olej ve spreji, který je šetrný téměř ke všem materiálům, tudíž i k ABS, ze kterého jsou vyrobeny všechny díly. Celková hmotnost sestavy s kovovými díly činí 303 gramů.



Obr. 24 Model sestavy.



Obr. 25 Vytisknutá sestava.

2.3.6 Povrchová úprava

Povrch výsledného modelu je schodovitý (schodovitost záleží na výšce tisknuté vrstvy), tento nepříznivý vzhled lze odstranit povrchovými úpravami, které povrch vyhladí. Princip povrchové úpravy spočívá v mechanickém či chemickém narušování. Mezi nejčastější mechanické úpravy patří např. tryskání broky a broušení, základní chemické jsou napařování či máčení v látkách, které rozpouští povrch dílce a slévají ho do hladké vrstvy.

- Broušení

Broušení je nejdostupnější povrchová úprava, lze ho provádět např. za pomoci smirkového papíru nebo různých pilníků. Smirkové papíry se prodávají v mnoha drsnostech, výběr vhodného smirkového papíru záleží na požadavcích na drsnost výrobku. Brousit lze i elektronicky za pomoci pásových brusek, i tak se ale jedná o časově náročný proces, který je vhodný spíše pro kusovou výrobu [51, 52].

- Tryskání

Tryskání je nejrozšířenější metodou mechanické povrchové úpravy. Pro vyhlazení povrchu se používají abrazivní částice (např. písek nebo olovené broky), které jsou meteny na dílec. Nevýhodou tryskání je nutnost tryskací komory, která je limitována svými rozměry. Hlavní výhodou oproti broušení je rychlost, výsledkem tryskání je hladký matný povrch [51, 53].

- Napařování

Pro napařování je nutná uzavřená komora s acetonovými parami. Důsledkem acetonových par dochází k rozpouštění povrchové vrstvy, která vlivem gravitace stéká dolů a tvoří hladký povrch. Po vyjmutí z komory je dílec stále měkký a lze ho jednoduše poškodit neopatrnou manipulací. Původní tvrdosti dílce je dosaženo až přibližně po dvou dnech, kdy se odpaří všechno napařený aceton [51].

Pro úpravu modelu planetové převodovky byla použita mechanická i chemická metoda. Nejdříve byly nejvíce viditelné nerovnosti zabroušeny smirkovým papírem, poté byly na povrch nanесeny zbytky ABS rozpuštěné v acetonu (ABS juice), které zacelily drobné nedokonalosti a odstranily vroubkovaný povrch.

2.3.7 Technicko – ekonomické zhodnocení

Náklady na výrobu planetové převodovky jsou shrnuty v následujících tabulkách.

Tab. 9 Cena spojovacího materiálu.

Název	Povrchová úprava	Cena [Kč]	Počet [ks]
Šroub M5/80	Pozinkovaný	1	4
Šroub M5/50	Pozinkovaný	0,6	2
Matice M5/15 dlouhá	Pozinkovaná	1,3	4
Matice křídlová M5	Pozinkovaná	1	4
Podložka M5.4	Nerez	0,3	4
Šroub M4/20	Nerez	1	3
Matice M4	Nerez	0,5	3
Podložka M4.3	Nerez	0,2	3
Distanční sloupek M4	Niklovaný	5	3
SOUČET	-	36	30

Tab. 10 Cena ložisek.

Název	Cena [Kč]	Počet [ks]
Radiální ložisko 6002 2RS	12	1
Radiální ložisko 6905 2RS	45	1
Axiální ložisko F 5-12M	54	2
SOUČET	164	4

Všechna ložiska byla kvůli snížení nákladů pořízena od čínského výrobce FK. Pro vysoce kvalitní ložiska s dlouhou životností by byl vhodný japonský výrobce EZO, při porovnání cen jsou však ložiska od firmy EZO několikanásobně dražší než ložiska firmy FK [49, 50].

Tab. 11 Seznam vytisknutých dílů.

Název	Materiál	Počet [ks]
Schránka s korunovým kolem	ABS	1
Centrální kolo	ABS	1
Satelit	ABS	3
Unášeč	ABS	1
Příruba	ABS	1
SOUČET	-	7

Zde bych chtěl ještě jednou poděkovat panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D, který na své náklady vytiskl všechny díly.

Náklady na výrobu prototypu metodou Fused Depositing Modeling se skládají z nákladů na vlastní tisk modelů, dále nákladů na použitý spojovací materiál, ložiska a nákladů na dokončovací operace. Celkové náklady jsou poté dány vztahem (21).

$$N_C = N_T + N_F + N_P + N_S + N_L \quad (21)$$

Kde:	N_C	-	Celkové náklady [Kč]
	N_T	-	Náklady na provoz tiskárny [Kč]
	N_F	-	Cena spotřebovaného filamentu [Kč]
	N_P	-	Náklady na dokončovací operace (post processing) [Kč]
	N_S	-	Cena spojovacího materiálu [Kč]
	N_L	-	Cena ložisek [Kč]

- Náklady na provoz tiskárny

Do nákladů na provoz tiskárny je zahrnuta cena za spotřebovanou energii, obsluhu tiskárny a opotřebení. Cena jedné hodiny byla stanovena na 25 Kč. Celkové náklady na provoz jsou dány vztahem (22), celkový čas potřebný pro tisk lze najít v Tab. 8.

$$N_T = N_H \cdot t_c \quad (22)$$

$$N_T = 25 \cdot 9,7 = 242,5 \text{ Kč}$$

Kde:	N_T	-	Náklady na provoz tiskárny [Kč]
	N_H	-	Hodinová sazba [Kč]
	t_c	-	Celkový čas pro tisk všech dílů [hod]

- Cena spotřebovaného filamentu

Cena za filament se odvíjí od spotřebovaného objemu (viz. Tab. 8). Všechny díly jsou tisknuty z ABS, jehož cena se pohybuje okolo 500 Kč/kg. Hustota ABS je 1 045 kg/m³, proto lze říct, že cena za 1g je přibližně rovna ceně za 1 cm³ materiálu. Cena za 1 cm³ spotřebovaného materiálu je pak 0,5 Kč. Cena za filament je dána vztahem (23).

$$N_F = N_M \cdot V_c \quad (23)$$

$$N_F = 0,5 \cdot 143 = 71,5 \text{ Kč}$$

Kde:	N_F	-	Cena spotřebovaného filamentu [Kč]
	N_M	-	Cena za 1 cm ³ filamentu [Kč]
	V_c	-	Celkový objem všech dílů [cm ³]

- Náklady na dokončovací operace

Náklady na dokončovací operace jsou složeny z nákupu acetonu a brusného papíru.

$$N_P = N_A \cdot N_B \quad (24)$$

$$N_P = 30 + 21 = 51 \text{ Kč}$$

Kde:	N_P	-	Náklady na dokončovací operace [Kč]
	N_A	-	Cena za použitý aceton [Kč]
	N_B	-	Cena brusného papíru [Kč]

- Ceny za spojovací materiál a ložiska jsou uvedeny v Tab. 9 a Tab. 10.

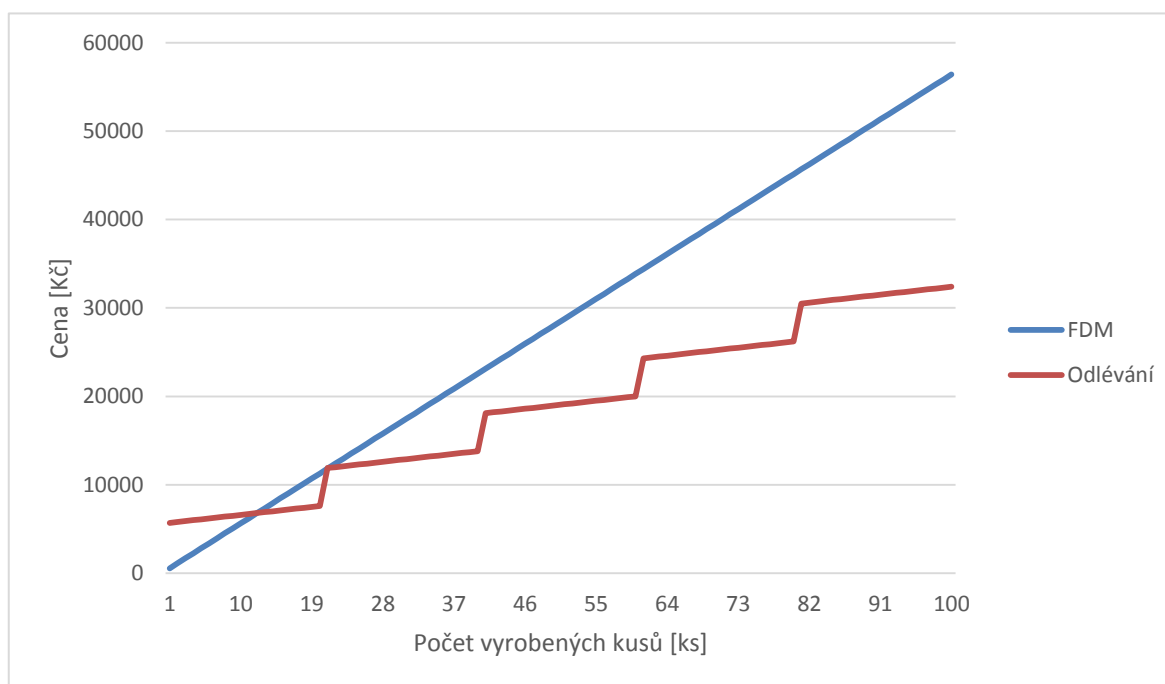
Celková cena je pak získána dosazením do vztahu (21).

$$N_C = 242,5 + 71,5 + 51 + 36 + 164 = 564 \text{ Kč}$$

Metoda FDM je vhodná pro výrobu modelu (masteru), který může být později použit při odlévání do silikonových forem. Z Obr. 26 lze vidět, že po vyrobení určitého počtu kusů se odlévání do silikonu stává výhodnější než výroba za pomoci FDM.

Cena jednoho kilogramu silikonu pro výrobu forem se pohybuje okolo 1 000 Kč. Jedná se ovšem o levnější formu silikonu, ze kterého samovolně neodchází vzduchové bubliny, proto je potřeba použít vakuové formy, které vzduch ze silikonu odstraní. Lze použít i dražší silikon, ze kterého odchází vzduchové částice samovolně a není třeba používat vakuové formy. Cena takového silikonu se ale pohybuje okolo 5 000 Kč za kilogram [47].

Cena formy se odvíjí od složitosti odlévaného dílce a byla pro všechny formy stanovena firmou 3D station v rozmezí 4 000 až 6 000 Kč. Pro tvorbu grafu je brána střední hodnota 5 000 Kč za všechny formy, které vydrží přibližně dvacet odlití a poté je potřeba vyrobit nové. Počet odlití záleží na odlévaném materiálu, odlévat lze například z PUR pěny, pryskyřice, laminátu, termoplastu a dalších. Druh odlévaného materiálu také ovlivní výslednou cenu, oproti nákladům na výrobu forem jsou však náklady na odlitý materiál nízké [47, 48].



Obr. 26 Cenové porovnání metody FDM a lití do silikonových forem

Z grafu lze vidět, že výroba odléváním do silikonových forem se vyplatí již od jedenáctého kusu. Dalším průsečíkem obou křivek je dvacátý první vyrobený kus, jehož náklady jsou kvůli výrobě nových forem pro odlévání totožné pro obě možnosti výroby. Od tohoto bodu je však odlévání do silikonových forem vždy výhodnější než technologie FDM.

Výhody a nevýhody FDM, odlévání do silikonových forem a obrábění:

- FDM

Hlavní výhodou FDM tisku je vyrobitelnost libovolně složitého tvaru (pro tisk mohou být použity podpory). Nevýhodou je, že vyrobený díl nedosahuje takové přesnosti jako díly vyrobené běžnými konvenčními metodami, také výrobní časy se mohou vyšplhat k desítkám hodin v závislosti na velikosti dílu a nastavené kvalitě tisku.

- Odlévání do silikonových forem

Odlévání do silikonových forem je vhodná metoda pro sériovou výrobu. Touto metodou lze stejně jako u FDM vyrobit tvarově složité prvky, nevýhodou jsou však počáteční náklady na výrobu forem.

- Obrábění

Výhodou je vysoká přesnost vyrobeného dílu. Mezi nevýhody patří například potřeba mnoha obráběcích nástrojů a upínacích přípravků, s tím spojený delší výrobní čas potřebný pro jejich výměnu. Další nevýhodou je také větší spotřeba materiálu (při obrábění vzniká odpad v podobě třísky).

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá návrhem a následnou výrobou modelu planetové převodovky za použití technologie FDM.

Rešeršní část se skládá z úvodu do historie 3D tisku a jeho současným využitím. Dále je zde popis aditivních technologií, blíže zaměřený na technologie SLS, SLS a FDM. Pro technologii FDM jsou také popsány používané materiály (jejich hlavní přednosti) a nastavení parametrů tisku.

V praktické části je popsán návrh planetové převodovky s ohledem na možnosti FDM tisku, který má určitá omezení. Na základě těchto údajů byly zhotoveny modely v aplikaci Autodesk Inventor Professional 2016, které byly následně vytisknuty na RepRap tiskárně Sinuhed.

Výpočet momentové a silové zátěže na mechanismus byl proveden na základě dostupných informací o planetárních mixérech, ve kterých lze vyrobenou sestavu použít. Jako ekvivalent zátěže byla použita stolní vrtačka.

Poslední kapitola je věnována technicko – ekonomickému zhodnocení vyrobené sestavy. Jsou zde přehledně v tabulkách uvedeny ceny za spojovací materiál, ložiska a náklady na tisk jednotlivých dílů planetové převodovky. Výsledná cena FDM tisku je poté porovnána s cenou výrobku při odlévání do silikonových forem.

Na závěr je zde uvedeno srovnání FDM technologie, odlévání do silikonových forem a obrábění s jejich hlavními výhodami a nevýhodami. Hlavní Výhodou FDM je kusová výroba prototypů, pro větší série je tato technologie nahrazována odléváním do silikonových forem z důvodu zkrácení výrobních časů a tím snížení nákladů.

Shrnutí dosažených výsledků:

- vypracování rešerše literatury dané problematiky,
- návrh všech dílů je uzpůsobený technologii FDM, tisk bez potřeby podpor,
- vyřešení problematiky spojené s tiskem jednotlivých dílů,
- výsledkem práce je funkční mechanismus,
- použití spojovacího materiálu ze železářství přineslo velkou úsporu nákladů,
- z ekonomického hlediska je pro kusovou výrobu výhodnější metoda FDM, při sériové výrobě je však výhodnější odlévání do silikonových forem, a to již od jedenáctého vyrobeného kusu.

Výsledným otestováním bylo zjištěno:

- metoda FDM je použitelná pro tisk ozubení s modulem 0,8,
- reálná sestava potvrzuje podmínky uvedené ve výpočtové části,
- model vyrobený technologií FDM lze použít jako funkční prvek, nejen jako prototyp.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 9788021440258.
2. BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.
3. CHLEBO, Martin. *Budoucnost materiálů pro 3D tisk: Časová linie 3D tisku* [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
4. FRÉLICH, T. *Výroba funkčního náhradního dílu metodou FDM tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
5. KOČÁREK, Karel. *Vyrobení prototypu součásti metodou rapid prototyping*. Brno 2013. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 36 s., Ing. Milan Kalivoda.
6. ZEMČÍK, Oskar. *TECHNOLOGICKÉ PROCESY: část obrábění*. Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno, 2007 [vid. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnProcesy.pdf>
7. FRÁTRIK, M. *Výroba modelu ozubeného soukolí metodou FDM tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
8. MCAE SYSTEMS, S.R.O. *ATOS Triple Scan* [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/atos-triple-scan/>
9. G4D, S. R. O. *3D skenování součástek* [online]. 2013 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <https://www.g4d.cz/laserove-skenovani/3d-skenovani-soucastek>
10. DVOŘÁK, Jan. *Technologické možnosti aditivních technologií* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní. Vedoucí práce Libor Beránek, Ing., Ph.D.
11. PEŠEK, O. *Využití CAD aplikací pro rapid prototyping*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 37s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
12. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nekonvenční technologie: Rozvoj a současná úloha aditivní výroby* [online]. 2016 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-a-soucasna-uloha-aditivni-vyroby.html>
13. ALL ABOUT 3D PRINTING. *The Types Of 3D Printing* [online]. 2018 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing>

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	41
---------	------------------	------	----

14. ŘASA, Jaroslav, Zuzana Kerečaninová. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. 2008 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
15. HOMOLA, Jan. *Selective Laser Sintering* [online]. 30.4.2013 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
16. EKO-PLASTY.CZ. *Informace o bioplastu PLA* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.eko-plasty.cz/bioplasty-pla/>
17. ABC3D. *3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2018-0-15]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
18. ZEMÁNEK, P. *Výroba funkčního prototypu úchytu sedla kola metodou FDM 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
19. KOVÁČIK, Miroslav. *3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE* [online]. 2017 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/12/25/nastaveni-kvalita-3d-tisk/>
20. POHOŘELSKÝ, Zbyněk. *3D tisk – Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. 2017 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
21. MATERIALISE. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
22. EVEKTOR. *Rapid prototyping* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
23. TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE S.R.O. *Srovnání materiálů_FDM* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.objet.cz/uploads/files/Srovn%C3%A1n%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF_FDM.pdf
24. SVĚTLÍK, David. *Povrchová úprava ABS součástí po 3D FDM tisku. Brno 2015*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 68 s. 6 příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
25. MATERIALPRO 3D. *TISKOVÉ STRUNY - FILAMENTY* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>
26. CYBERSOFT S.R.O. *3D tiskové struny* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: https://www.nc.cz/3d-tiskarny-tiskove-struny_c1445311.html
27. FELIX PRINTERS. *3D tiskové materiály – jak fungují* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
28. 3D STRUNY. *3D tiskový materiál* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://www.3dstruny.cz/Prodavane-materialy-a5_9.htm

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	42
---------	------------------	------	----

29. KUDLÁČOVÁ, Barbora. *Aplikace metody Fused Deposition Modeling pro vyhotovení návrhu modelu planetového mechanismu*. Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 66 s., 5 s. příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
30. SVOBODOVÁ, Magdalena. *Převody a mechanismy* [online]. 2013 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_15-07.pdf
31. ŠULC, Petr. *Skupina převodovky dopravního prostředku – pevnost a únavu* [online]. Pardubice, 2017 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/68701/SulcP_SkupinaPřevodovky_PT_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Petr Tomek, Ph.D.
32. LAMBERSKÝ, V. *Planetové převodovky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.
33. BLOG.CZ. *Planetová převodovka* [online]. 2013 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/planetova-prevodovka>
34. PALÁT, Hynek. *Podřezání zubů a korekce ozubení* [online]. 2012 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablon/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-07.pdf
35. *Princip práce diferenciálu* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://vladimir.josek.sweb.cz/praxe/04-05/otazky04-05/diferencialy-6.htm>
36. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE, Richard G BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTUUM, 2010, 1159 s. ISBN 9788021426290.
37. BLOG.CZ. *Korigování soukolí* [online]. 2013 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/korigovani-soukoli>
38. ZEMČÍK, Oskar. *3D model of rerap Sinuhed* [online]. 2012 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:Sinuhed-1.jpg>
39. ZEMÁNEK, P. *Výroba funkčního prototypu úchyty sedla kola metodou FDM 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
40. ŘEZNÍČEK, Vojtěch. *Výroba náhradního dílu atypického větráku metodou 3D FDM tisku*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 40s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
41. *Infill Pattern Basics | Simplify3D* [online]. 2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BMWTK2ZgJCM&feature=share>
42. TOPMODEL.CZ. *Příslušenství k převodovkám* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.topmodelcz.cz/index.php?&desktop=eshop&set_menu_eshop_id=938

43. ELECTROLUX. *Planetární mixéry* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://professional.electrolux.cz/pd/dynamick%C3%A1-p%C5%99%P3TO%CAR/B/C?ADprava/planet%C3%A1rn%C3%AD-mix%C3%A9ry/20-litr%C5%AF/xbm20-20-litr%C5%AF/planet%C3%A1rn%C3%AD-mix%C3%A9ry-xbm20-20l-stoln%C3%AD-model-600238/>
44. LOUDÁT, Jakub. *Modrá páska je nový Kapton!* [online]. 2016 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://fotopohotovost.cz/technologie/3d-tisk/modra-paska-je-novy-kapton-2/>
45. VŠE PRO 3D TISK. *Kaptonová páska 10mm* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/p/kaptonova-paska-10mm>
46. 3D TISKÁRNA – REBELIX. *Příprava podložky pro tisk z ABS* [online]. 2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://regrap4u.cz/priprava-podlozky-tisk-abs/>
47. MCAE SYSTEMS, S.R.O. *Vakuové lití* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/sluzby/vakuove-liti/>
48. MPF DESIGN. *Výroba silikonových forem na zakázku* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.metalplastform.cz/index.php?route=information/information&information_id=12
49. FK. *Bearing Units Expert* [online]. 2016 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.fk-bearing.com/>
50. EZO. *Main production system* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.ezo-brg.co.jp/english/product/index.html>
51. FRIDRICH, R. Výroba prototypu zpětného zrcátka na 3D FDM tiskárně. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 45 s., 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
52. ELUC. *Broušení* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1825>
53. NEDVÍDEK, Roman. *Tryskání pískem - povrchová úprava materiálu* [online]. 2018 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.tryskani-piskovani.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	Trojdimenzionální
ABS	[-]	Akrylonitril butadien styren
CAD	[-]	Computer aided design
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
HIPS	[-]	High Impact Polystyrene
PC	[-]	Polykarbonát
PET	[-]	Polyetylen
PLA	[-]	Polylactic acid
PVA	[-]	Polyvinylalkohol
REPRAP	[-]	Replicating Rapid-Prototyper
RP	[-]	Rapid Prototyping
SLA	[-]	Stereolithography
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
STL	[-]	Stereolithography
USP	[-]	United States Pharmacopeia

Symbol	Jednotka	Popis
F_O	[N]	Obvodová síla
M	[N.m]	Krouticí moment
N_A	[Kč]	Cena za použitý aceton
N_B	[Kč]	Cena brusného papíru
N_C	[Kč]	Celkové náklady
N_F	[Kč]	Cena spotřebovaného filamentu
N_H	[Kč]	Hodinová sazba
N_L	[Kč]	Cena ložisek
N_M	[Kč]	Cena za 1 cm ³ filamentu
N_P	[Kč]	Náklady na dokončovací operace
N_S	[Kč]	Cena spojovacího materiálu

N_T	[Kč]	Náklady na provoz tiskárny
P	[W]	Výkon
V_C	[cm ³]	Celkový objem všech dílů
b	[mm]	Šířka ozubení
c	[mm]	Hlavová vůle
d	[mm]	Průměr roztečné kružnice
d_a	[mm]	Průměr hlavové kružnice
d_f	[mm]	Průměr patní kružnice
h	[mm]	Výška zubu
h_a	[mm]	Výška hlavy zubu
h_f	[mm]	Výška paty zubu
i	[-]	Převodový poměr
m	[-]	Modul
n_{vstup}	[1/min]	Vstupní otáčky
$n_{\text{výstup}}$	[1/min]	Výstupní otáčky
p	[mm]	Rozteč zubů
q	[-]	Počet satelitů
t_c	[hod]	Celkový čas pro tisk všech dílů
x	[-]	Jednotkové posunutí
z	[-]	Počet zubů
α	[°]	Úhel profilu zubů
β	[°]	Úhel sklonu zubů
π	[-]	Konstanta

