



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA MODELU OZUBENÉHO SOUKOLÍ METODOU FDM TISKU

PRODUCTION OF GEARS MODEL ON FDM PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Frátrik

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Frátrik

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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 ozubeného soukolí metodou FDM tisku

v anglickém jazyce:

Production of gears model on FDM printer

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis funkce a požadovaných vlastností zvoleného dílu. Zhodnocení možností výroby zvolených dílů s orientací na metodu FDM. Návrh 3D modelu. Posouzení technologičnosti konstrukce jednotlivých dílů s ohledem na 3D tisk. Výroba ozubeného soukolí a technicko-ekonomické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky
- volba metody řešení
- návrh 3D modelu
- zhodnocení technologičnosti konstrukce
- výroba zvolených dílů
- technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam odborné literatury:

1. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
2. CHOI, S.H. a S. SAMAVEDAM. Modelling and otimisation of Rapid Prototyping. Computers in industry. č. 47, s. 39-53. ISSN 166-3615.
3. NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.
4. YAN, Xue a P GU. A review of rapid prototyping technologies and systems. Computer-Aided Design. roč. 28, č. 4, s. 307-318. ISSN 0010-4485.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou 3D tisku ozubeného soukolí. V první části jsou stručně shrnuty procesy 3D tisku, vybrané druhy Rapid Prototyping s ohledem na metodu FDM a vlastnosti materiálů používaných při této metodě. Druhá část práce se zabývá návrhem modelu ozubeného soukolí, vycházející z převodovky kuchyňského mixéru. Převodovka byla navržena v 3D modelovacím programu Autocad inventor 2013 a vytištěna na Reprap tiskárně Sinuhed. Na závěr je uvedeno technicko-ekonomické zhodnocení výroby modelu.

Klíčová slova

rapid prototyping, FDM, 3D tisk, ABS, ozubené kolo

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with an issue of 3D printing of gears. In the first part are concisely summarized processes of 3D printing, selected types of Rapid Prototyping considering the FDM and properties of materials used in this method. The second part deals with a suggestion of gears model based on the gearbox of the kitchen blender. Gearbox was designed in 3D modeling program Autocad inventor 2013 and printed on the Reprap printer Sinuhed. There is techno-economic appreciation of production of the model in conclusion.

Key words

rapid prototyping, FDM, 3D printing, ABS, gear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba modelu ozubeného soukolí metodou FDM tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Michal Frátrik

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskarovi Zemčíkovi, Ph.D. za jeho čas a ochotu při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Radoslavu Cikánkovi za jeho šlechtnost a úsilí při zpracování cenové nabídky. Poděkování patří i Martinu Košinovi za pomoc při realizaci mého praktického projektu. Na závěr bych chtěl taktéž poděkovat mé rodině a svým známým za pomoc a podporu nejen u této práce, ale v celém průběhu studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 RAPID PROTOTYPING.....	9
1.1 Řetězec procesu	9
1.2 Vybrané metody Rapid Prototyping	11
1.2.1 Stereolitografie.....	11
1.2.2 Selective Laser Sintering	12
1.2.3 Fused Deposition Modeling.....	13
2 KONVENČNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY OZUBENÍ.....	20
2.1 Frézování dělicím způsobem	20
2.2 Frézování odvalovacím způsobem.....	20
2.3 Obrázení hřebenovým nožem	21
2.4 Obrázení kotoučovým nožem	22
3 NÁVRH OZUBENÉHO SOUKOLÍ	23
3.1 Parametry a popis výchozí předlohy.....	23
3.2 Návrh ozubených kol s šykými zuby	26
3.3 Návrh hřídelů	28
3.4 Návrh převodové skříně.....	29
4 VÝROBA OZUBENÉHO SOUKOLÍ.....	31
4.1 Předvolby tisku	31
4.2 Nastavení tisku a tisk součástí	33
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	37
5.1 Zhodnocení výroby ozubených kol konvenčními technologiemi.....	37
5.2 Zhodnocení výroby ozubených kol metodou FDM.....	38
5.3 Porovnání obou metod	38
ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	45
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

ÚVOD

Technologie 3D tisku už sice existuje bezmála třicet let, ale v porovnání s konvenční technologií je na trhu stále novinkou. Nejen proto však přitahuje další zájemce, kteří v tomhle odvětví objevují nové cesty skrytých možností a dosud nevyužitého potenciálu. 3D tisk se již rozšířil do mnohých oblastí výroby jako například automobilový průmysl, letecký průmysl, elektrotechnika nebo i dokonce zdravotnictví [1]. Za celou dobu si už ale prošel jistým vývojem. Od první tiskárny vyrobené v roce 1992 firmou 3D systems fungující na principu stereolitografie, přes úspěšný projekt RepRap v roce 2005 až po nejmodernější 3D tiskárny makerbot. Původní myšlenkou bylo, že tiskárny budou sloužit, jak už sám název Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů) napovídá, k výrobě a vývoji nových součástí, k čemuž se doposud spolehlivě využívají. V mnoha společnostech tak v průběhu několika let nahradili dražší výrobu prototypů prostřednictvím konvenčních strojů. Tímto ale využití tiskáren stále nekončí. Postupem času byly dokonce zařazeny do malosériových výrobních procesů, kde slouží k produkci součástí malých rozměrů a složitých tvarů nebo dokonce forem pro následné odlévání dalších výrobků. Využití tím ale stále nekončí a nabízí další možnosti v oblasti personalizované výroby, kde je každý kus přizpůsoben zákazníkovi. Tiskárny mohou být také využity k výrobě nedostupných náhradních dílů [2,3]. Možnosti 3D tiskáren jsou tak stále lukrativní a nepřeborné, na což bych chtěl v této práci poukázat.

1 RAPID PROTOTYPING

Označení Rapid prototyping (RP) v sobě ukrývá souhrn metod, sloužících k tvorbě fyzických modelů (prototypů), které napomáhají vývoji součástí již v předprodukci jejich výroby. Tyto modely jsou pak testovány jak z funkčního tak z ergonomického hlediska. Slouží taktéž k upřesnění a návrhu konečného designu a v neposlední řadě k reklamním účelům. Metody 3D tisku tak obecně fungují na principu tvorby plastového modelu nanášením materiálu vrstvou po vrstvě v horizontální rovině (layer manufacturing) podle geometrických dat, získaných z CAD programů. Z tohoto důvodu jsou rozměry součástí velmi přesné v rovině (x-y), ale už o něco méně v rovině (z), ve které jsou na sobě vrstvy naskládány a nemusí tak tvořit plynulý přechod. Zpravidla už je ale pomocí skenování dosahováno plynulých přechodů, kdy se nanášejí pokud možno co nejtenčí vrstvy materiálu. Výsledný model pak vypadá jako originál [4,5,6].

1.1 Řetězec procesu

Všechny metody RP spojuje dohromady obdobný řetězec procesu (viz. Obr. 3). Obsahuje pět částí vycházející z výrobního plánování [4,6,7].

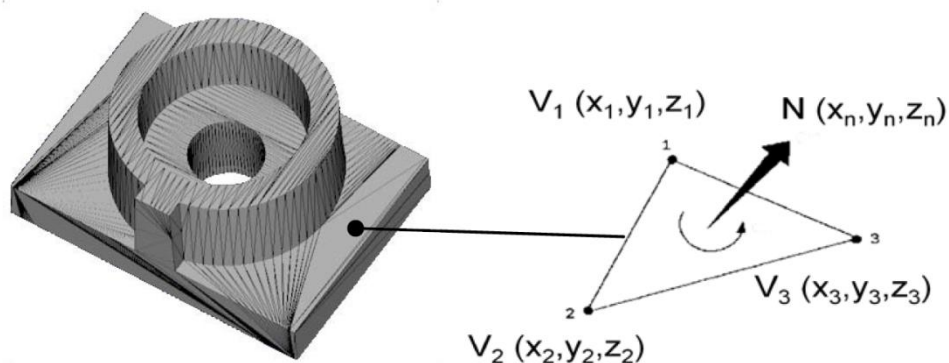
Pre-processing:

- **3D modelování**

Prvním krokem je vytvoření 3D modelu prostřednictvím CAD systému, což je většinou časově nejnáročnější část. Modeláři přitom musí počítat s takovými omezeními, jako jsou například minimální tloušťka stěny, minimální velikost štěrbin nebo díry či převislé části. Poté tyto grafické modely procházejí mnoha úpravami, analýzami a také zkouškami [6,7].

- **Konverze a přenos dat (Data conversion and transmission)**

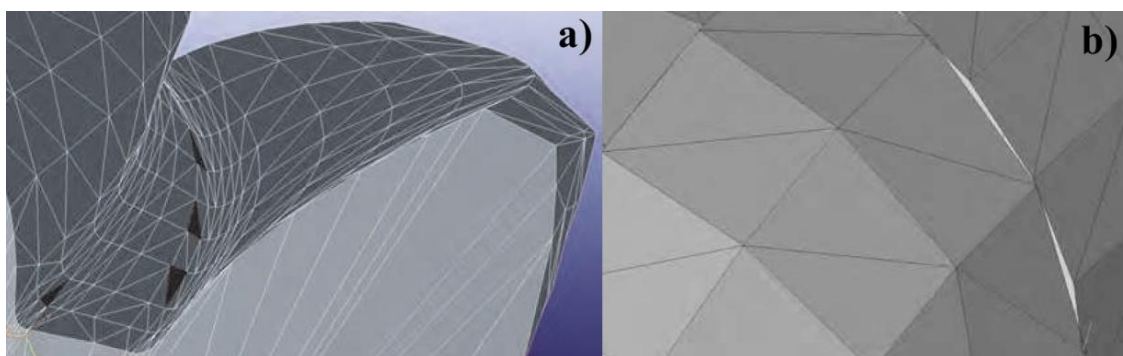
Grafický model je poté konvertován do formátu **.STL** (stereolithography). Tento formát aproximuje křivosti povrchu modelu na malé trojúhelníky a každý z nich je definován normálovým vektorem a třemi body reprezentující vrcholy (viz. Obr. 1). Tento krok je zpravidla tím nejkratším v celém procesu. Data jsou poté převedena z jednoho počítače na druhý prostřednictvím přenosných hardwarů nebo po místní síti [6,7].



Obr. 1 Součást v STL formátu [6].

- **Kontrola a příprava (Checking and preparing)**

V této části modeláři odstraňují chyby vzniklé při konverzi modelu do STL formátu. Na ploše modelu tak vznikají různé díry, mezery nebo trhliny způsobené nedokonalou transformací původní plochy na trojúhelníky (viz. Obr. 2). Trojúhelníky jsou pak například špatně natočené, překrývající se nebo dokonce chybějící. Tyto nedostatky modeláři opravují pomocí softwarů, které tento proces poněkud automatizují. Samozřejmě mohou opravy zabrat i delší čas, zvláště jedná-li se o náročné součásti či sestavy. Na závěr ještě modeláři navrhují rozložení součásti při tisku, editují potřebné podpory, navrhují tloušťku vrstev, optimalizují celý proces a připravují tak model na jeho konečné zhotovení [4,6,7].



Obr. 2 Chyby vzniklá při konverzi do STL formátu [19]. a) chybějící trojúhelníky, b) škvíry ve spojích.

Processing:

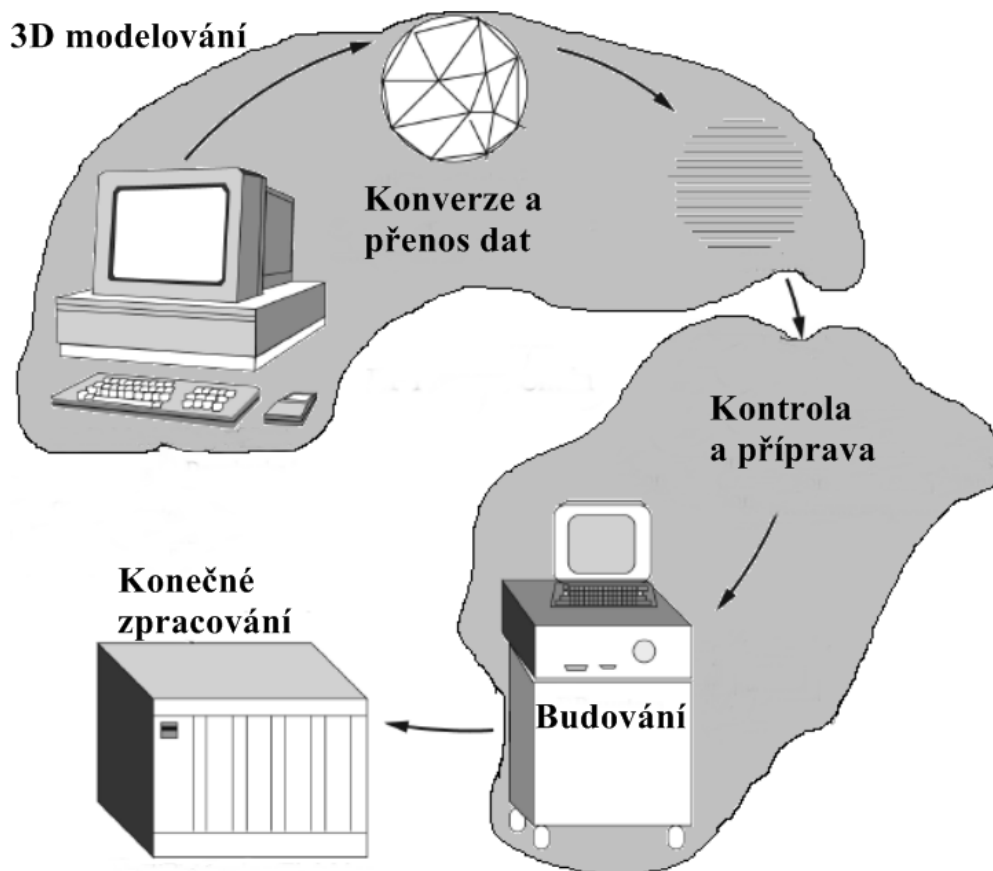
- **Budování (Building)**

Tento proces spočívá v tvorbě samotného modelu. Je plně automatizovaný a může trvat až několik hodin v závislosti na velikosti a počtu částí modelu [7].

Postprocessing:

- **Konečné zpracování**

Závěrem je u některých metod potřeba provést dané manuální úkony k dokončení výroby modelu. Jeden z nich je tzv. čištění, kdy se odstraňuje přebytečný materiál (podpory, otoky) buď pomocí rozpouštědel, nebo manuálně. Navíc se může také součást barvit, brousit, pískovat nebo vrtat či frézovat [4,6,7].



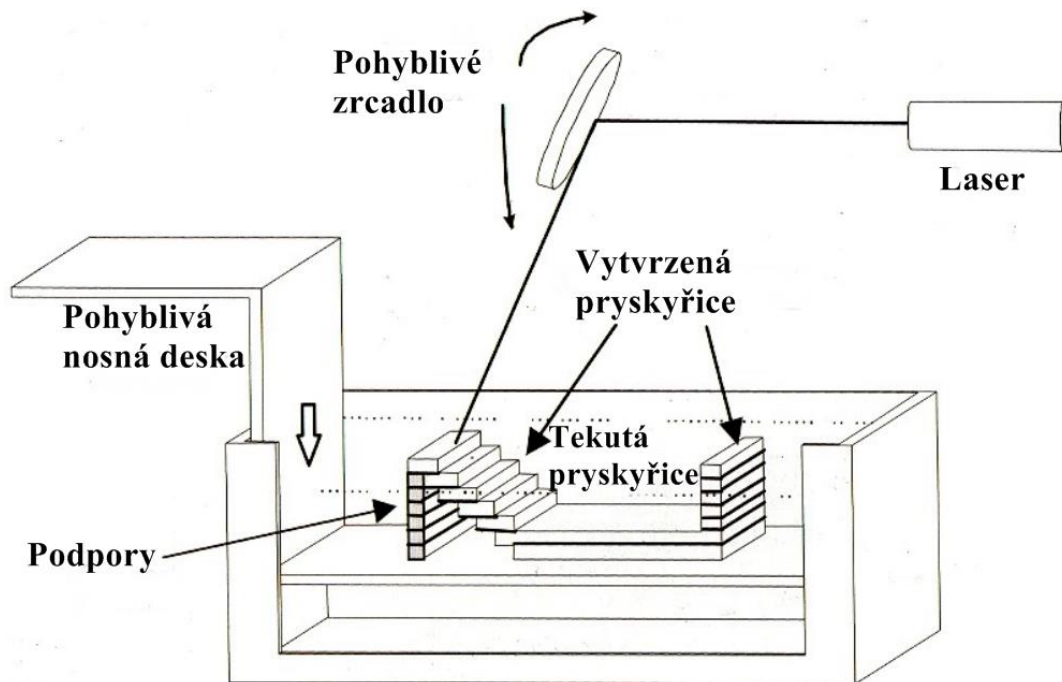
Obr. 3 Řetězec procesu [4].

1.2 Vybrané metody Rapid Prototyping

Jednotlivé metody RP se obecně rozdělují podle fáze, v jaké se vstupní materiály nacházejí. Tyto materiály mohou být v tuhém i v tekutém stavu nebo dokonce ve formě prášku. Tuhé materiály jsou pak zpracovávány ve formě drátů, svitků, kuliček nebo prášku a při tvorbě modelů se taví na tekutou fázi (Selective Laser Sintering, Fused Deposition Modeling, Three Dimensional Printing). Tekuté materiály se při procesu na druhou stranu vytvrzují na fázi pevnou (Stereolitografie) [6].

1.2.1 Stereolitografie

Metoda spočívá ve vytvrzování (polymerizaci) tekuté pryskyřice, která je umístěna v nádobě, prostřednictvím ultrafialového záření z laseru (viz. Obr. 4). Tloušťka vytvrzené vrstvy může být v závislosti na intenzitě záření nebo druhu pryskyřice 0,05 až 0,15 mm. Směr laseru je ovládán pomocí zrcadla, které je řízeno daty získaných z daného CAD programu. Po vytvrzení se spouští čepel, která vrstvu srovná na požadovanou tloušťku. Na závěr úkonu se v ose „Z“ posune nosná deska, na které je model vystavován a celý proces se opakuje, až do zhotovení součásti. Tato metoda vyžaduje stavbu podpor [4,6,8].



Obr. 4 Princip stereolitografie [4].

- **Výhody:**

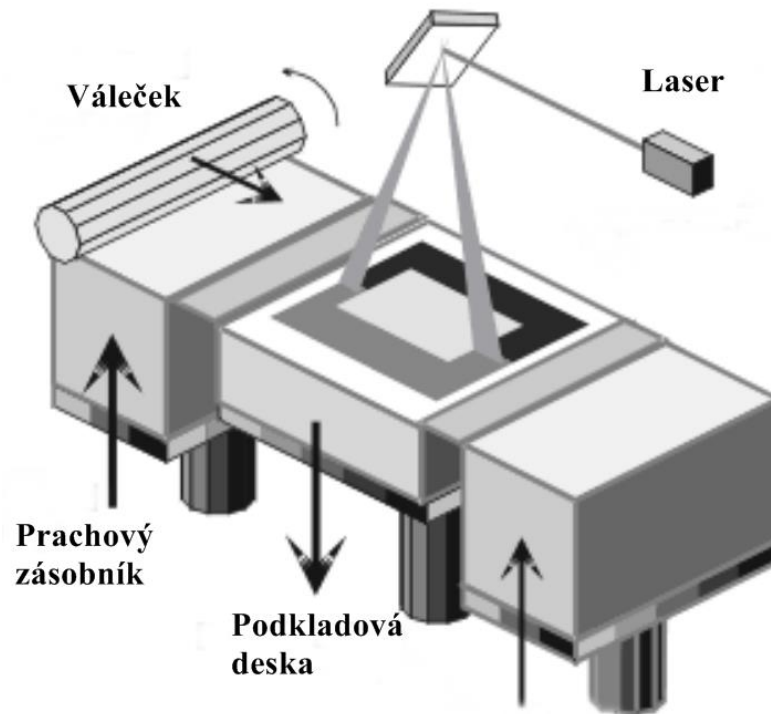
- Výroba rozměrnějších součástí,
- Jakost povrchu,
- Vysoká přesnost,
- Plynulý průběh procesu,

- **Nevýhody:**

- Velké náklady na vanu s pryskyřicí,
- Díly jsou poněkud křehké => postprocessing (vytvrzování, sušení),
- Viditelné krokování vrstev => horší jakost bočních ploch [8,9].

1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS je metoda spočívající v tavení a následném spékání částecek prášku. Ten může být na bázi plastu, kovu, pryže či keramiky. Přístroj se skládá z laseru (většinou na bázi CO₂), zrcadla, které ho usměřňuje a podkladové desky, na které je model vystavován (viz. Obr. 5). Materiál je zde nanášen prostřednictvím válečku, který rozprostře vrstvu prášku (0,1 až 0,15 mm) na podkladovou desku, která je umístěna v komoře. Ta bývá zpravidla předehřátá na teplotu těsně pod teplotu tavení prášku, aby nedocházelo k deformacím modelu. Do komory se při procesu taktéž vpouští plynný dusík jako ochrana před oxidací. Laser poté nataví daný průřez, přičemž okolní materiál zůstává nespečen a slouží zároveň jako podpora. Materiál se po dokončení recykluje a znovu používá. Po spečení první vrstvy se podkladová deska sníží o danou hodnotu a proces se opakuje až do zhotovení součásti [4,6,8,9].



Obr. 5 Princip SLS [4].

- **Výhody:**

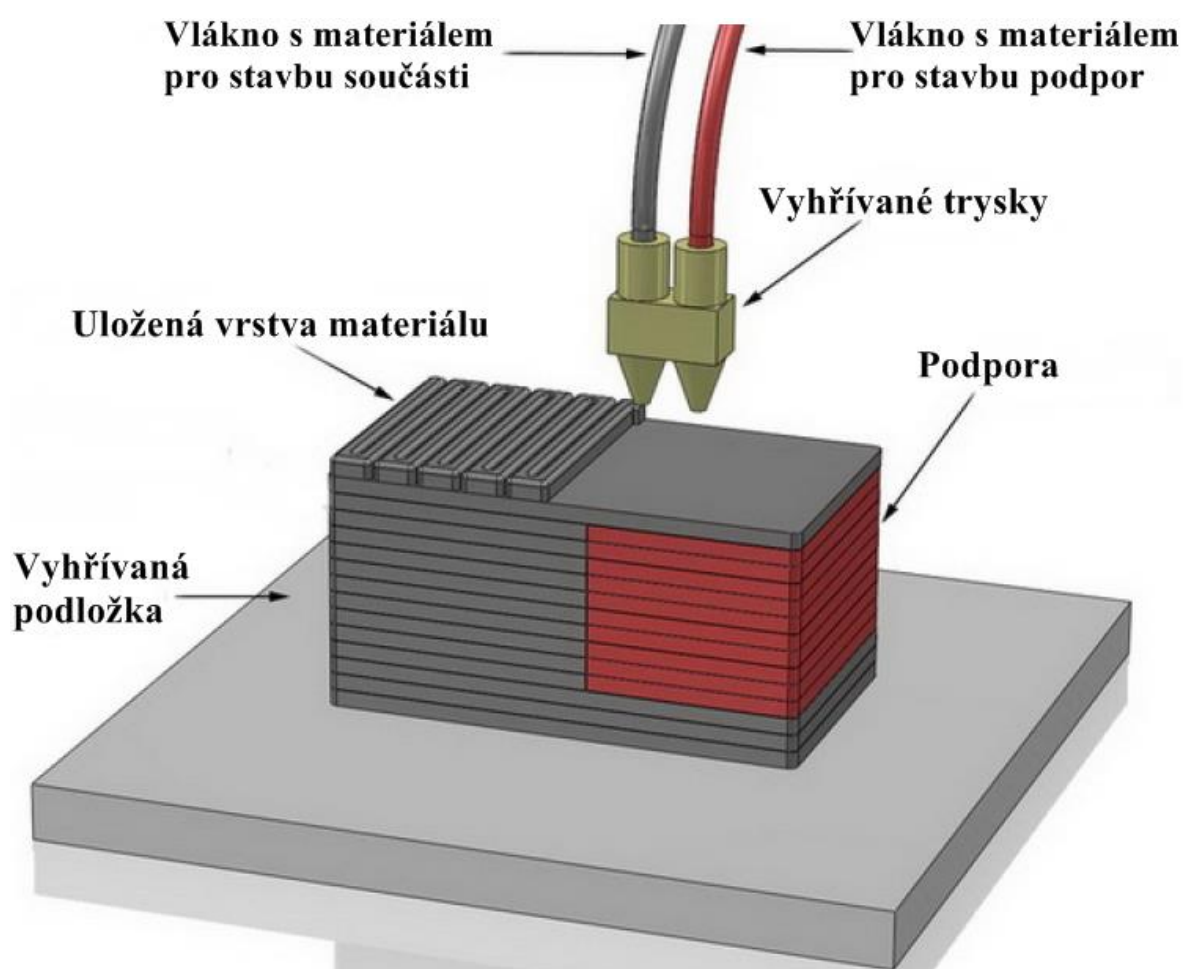
- Široké rozhraní materiálů => široké použití (např. zdravotnictví),
- Součásti jsou pevné,
- Netřeba podpor,

- **Nevýhody:**

- Velké náklady na zařízení,
- Kvalita povrchu souvisí s velikostí práškového materiálu (20 až 100 μm) [8,9].

1.2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

Princip metody spočívá ve vtláčování plastového materiálu (ABS, polykarbonát, elastomer, vosk, atd.) ve formě vlákna do vyhřívané trysky (viz. Obr. 6). Zde se materiál ohřívá na teplotu o něco vyšší, než je jeho teplota tavení (o 0,5 až 1 $^{\circ}\text{C}$), takže když projde otvorem trysky (0,3 mm) ztuhne přibližně do desetiny sekundy. Materiál je pokládán na podložku nebo na předešlou ztuhlou vrstvu, ke které se okamžitě váže. Podložka bývá zpravidla vyhřívaná a to z důvodu udržení konstantní teploty součásti v průběhu její stavby, aby nedocházelo ke vzniku deformací. Po nanesení jedné vrstvy se o danou hodnotu (0,05 až 0,4 mm) v ose „z“ posune buď nosná deska dolů, nebo celá tisková hlava nahoru a začne se nanášet další vrstva. Součástí tiskové hlavy je i druhá nezávislá hlavice, která slouží pro stavbu podpor. Ty jsou užívány pod převislé části a skládají se z podružného materiálu. Mohou být odstraněny manuálně po dokončení procesu nebo chemicky (vodou rozpustné materiály) [4,6,8,9].



Obr. 6 Princip FDM [10].

- **Výhody:**

- Nižší cena stroje,
- Lze použít více druhů materiálů,
- Nízká cena výrobků,
- Výroba funkčních součástí,
- Minimální odpad,
- Snadné odstraňování podpor (mechanicky, chemicky),
- Bezpečnost procesu => žádné škodlivé emise,

- **Nevýhody:**

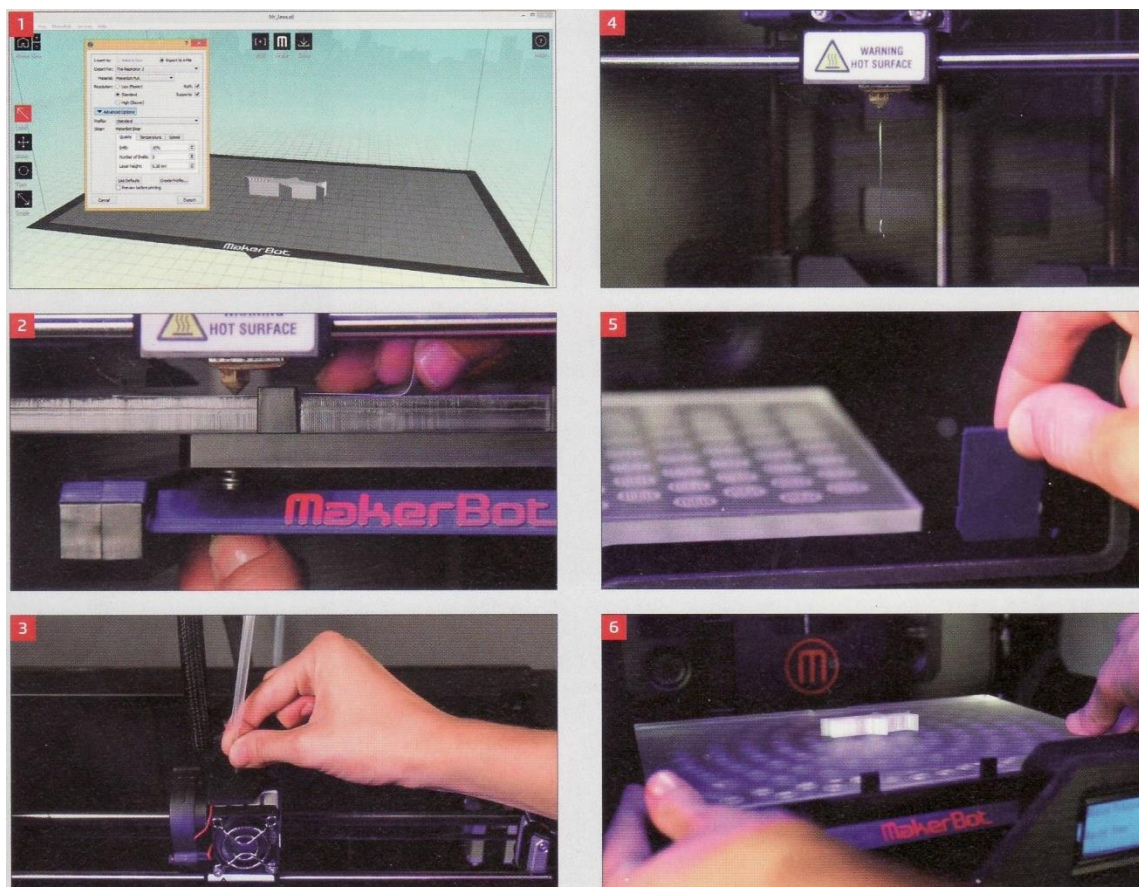
- Přesnost omezená průměrem výstupní trysky,
- Pomalý proces stavby modelu,
- Nepředvídatelné smrštění materiálu vlivem rychlého ochlazování,
- Různé mechanické vlastnosti v různých směrech [7,8,9].

- **FDM tiskárny**

Předním výrobcem FDM tiskáren je americká firma Stratasys, která na konci 80. let taktéž metodu FDM navrhla. V současnosti se pyšní svými moderními 3D tiskárnami Makerbot, které jsou jedny z nejkvalitnějších a taky cenově dostupných (do sto tisíc korun) tiskáren na trhu. Jejich ovládání je nenáročné, tudíž mohou sloužit i jako učební pomůcka [3].

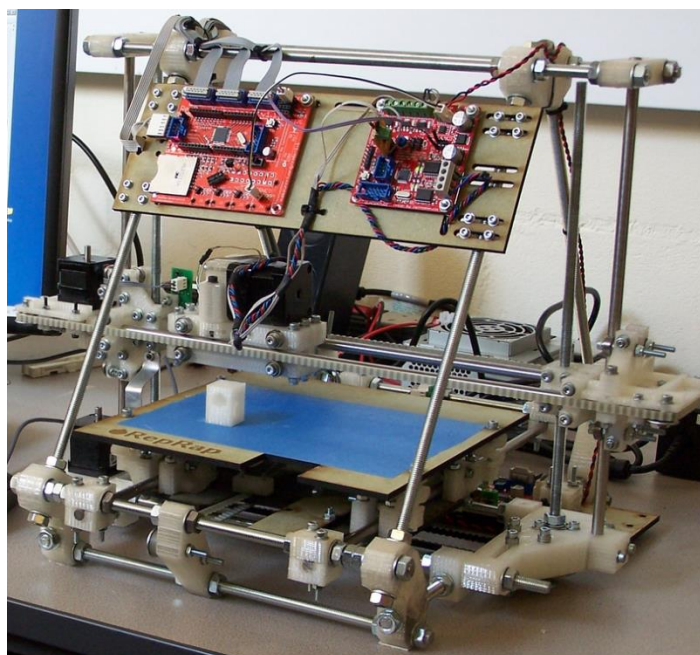
Kroky pro ovládání 3D tiskárny Makerbot Replicator 2 (viz. Obr. 8):

1. Model se vytvoří v libovolném CAD systému, uloží se do STL formátu a načte se v aplikaci dodávané k tiskárně (MakerWare),
2. Vyrovnání stavební podložky pomocí aretačních šroubů a distanční vložky,
3. Do tiskové hlavy se zavede tiskový materiál,
4. Nechá se protéct malé množství materiálu, aby se odstranily zbytky z předchozích úloh
5. Tisková úloha se odešle do tiskárny prostřednictvím USB kabelu, Wi-Fi nebo přes paměťovou kartu, na které je model uložen. Tiskárna poté začne ihned tisknout anebo se ještě na interaktivním displeji nastavují možnosti tisku,
6. Po dokončení tisku přejde stroj do klidového režimu [3].



Obr. 8 Proces tisku na MakerBot Replicator 2 [3].

V roce 2005 vznikl projekt RepRap. Jedná se o projekt zaměřený na vývoj 3D tiskáren, na kterých lze vytisknout co nejvyšší počet vlastních součástí. Jedná se tedy o „samoreplikující“ stroje pracující na principu metody FDM, kterou autoři z důvodu ochranné známky přejmenovali na FFF (Fuse Filament Fabrication). Pod touto záštitou tak vzniklo již několik významných 3D tiskáren (viz. Obr. 10). Postup při tisku bude uveden v následujících kapitolách [2,11].



Obr. 10 Mendel (2009) [12].

- **Materiály pro FDM tisk**

Pro výrobu součástí na FDM tiskárnách se používají především materiály na bázi plastů nebo vosku. Jelikož jde ale o univerzální proces natavování, využívá se řada dalších materiálů. Plasty pak mohou být smíchány například s dřevem, mědí nebo železem, což pak dále ovlivňuje mechanické vlastnosti těchto kompozit. Materiály jsou dodávány ve formě drátu (od průměru 1,7 až 3 mm) navinutého na cívce, která se ukládá na elektrický motor, pomocí kterého je drát vtlačován do vyhřívané trysky [2,11,13,14].

PLA (Polylactic Acid)

PLA je biologicky odbouratelný, jelikož se vyrábí z kukuřičného škrobu. Teplota tavení je od 180 až po 220 °C. Má nízkou teplotní roztažnost, tudíž se při modelování nemusí používat vyhřívaná podložka. Využívá se ale pouze do 60 °C, pak se materiál stává plastickým. Oproti ABS je také více křehký a má vyšší koeficient tření, což může zapříčinit ucpání trysky. To se dá ale odstranit použitím silnějšího motoru [2,11].

PET (Polyetylen):

PET je pevný a stálý materiál s nízkou teplotní roztažností. Není tedy třeba vyhřívané podložky. Teplota tavení je kolem 250 °C a odolává teplotám i vyšším, než 100 °C. Je dostupný ale pouze v čiré variantě a je zhruba o třetinu dražší, než ABS [2].

PVA (Polyvinil alkohol):

Tento materiál se používá především pro stavbu podpor, jelikož je rozpustný ve vodě. Jeho teplota tavení je 180 až 230 °C [2,11].

ABS (Akrylonitril-butadien-styren)

ABS je materiál disponující nejvyššími kvalitami pro FDM tisk. Odolává teplotám (až do 80 °C), chemikáliím a vlhkosti. Má vysokou pevnost a proto může být použit i jako konečný produkt. Jeho tisková teplota se pohybuje okolo 250 °C. Jeho největší nevýhodou však je jeho vysoká tepelná roztažnost. Kvůli tomu materiál potřebuje vyhřívanou podložku, aby při tisku nedocházelo k deformacím součástí [2,11,13].

Vybrané druhy ABS:

- ABSplus – o 40 % pevnější, než standartní ABS,
- ABS-M30 – o 25-75 % pevnější, než standartní ABS a lépe se k sobě váže,
- ABS-M30i – biokompatibilní materiál pro lékařské účely,
- ABSi – průsvitný materiál, dobré mechanické a estetické vlastnosti,
- PC-ABS – spojení mech. a estetických vlastností polykarbonátu a ABS,
- Ultem 9085 – jedny z nejlepších mech. vlastností, odolný vůči hoření [13,27].

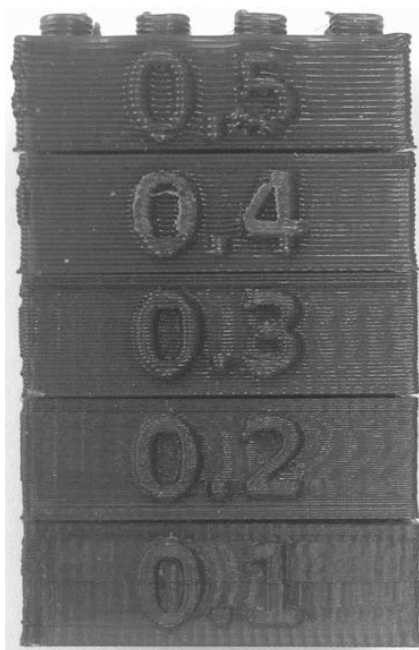
Tab. 1 Mechanické vlastnosti ABS [18,27].

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Teplota tání [°C]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]	Hustota [kg.m ⁻³]
ABS	22	1627	41	90	6	1050
ABS-M30	36	2413	61	96	4	1040
ABSi	37	1915	62	86	4,4	1080
ABS-M30i	36	2413	61	96	4	1040
PC-ABS	41	1917	68	110	-	1200
Ultem 9085	71,6	2200	115	186	6	

- **Optimalizace procesu**

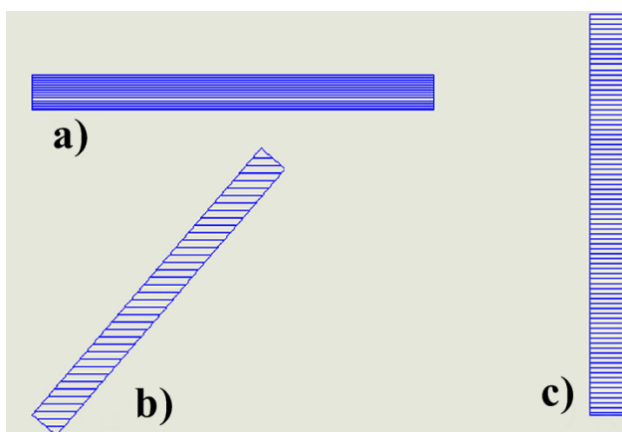
Po získání G-kódu, který 3D tiskárně udává informace o tvaru součásti, se taktéž nastavují jisté parametry, které mohou značně ovlivnit mechanické vlastnosti výsledné součásti.

- **Tloušťka vrstvy** je jedním z prvních parametrů, které se nastavují, přičemž je experimentálně zjištěno, že čím je zvolena tenčí vrstva, tím pevnější je poté výsledný model. Většinou se volí tloušťka vrstvy od 0,3 až po 0,4 mm v závislosti na požadované pevnosti a kvalitě (drsnoti) povrchu (viz. Obr. 11) [11,15].



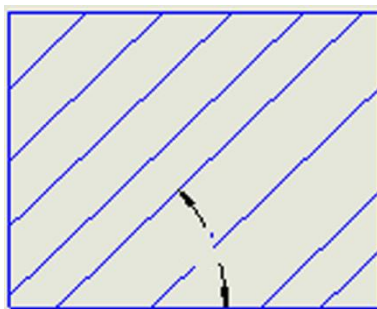
Obr. 11 Odstupňované velikosti nanesených vrstev [11].

- Kvůli rozdílným mechanickým vlastnostem v různých směrech výsledné součásti je nutné zvolit její správnou **orientaci** ještě před tiskem. Různé studie ukazují, že nejlepší mechanické vlastnosti by měla mít součást vždy podél vláken a nejhorší zase napříč nimi, protože jsou v tomto směru vlákna pouze slepená k sobě. Příkladem jsou zkušební tyče (viz. Obr. 12), kdy nejvyšší pevnost v tahu vykazuje tyč „a“ ($R_{m_a} = 30,5$ MPa) a nejnižší pak tyč „c“ ($R_{m_c} = 25,5$ MPa) [11,13,15,16,17].



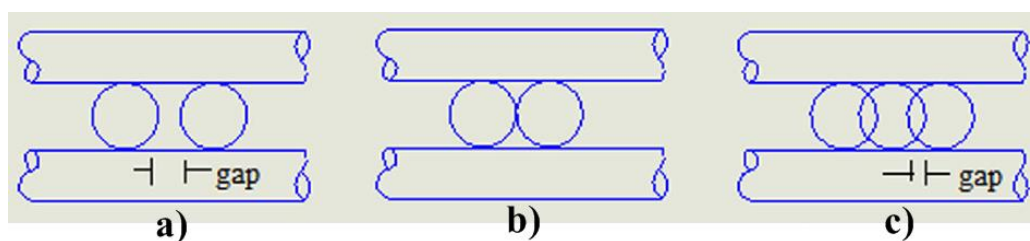
Obr. 12 Orientace zkušebních tyčí [15]. a) 0°, b) 39°, c) 90°.

- **Rastrový úhel** je další parametr určující vnitřní strukturu vytisknuté součásti. Je to úhel mezi osou „x“ a směrem vláken právě položené vrstvy (viz. Obr. 13). Pro své dobré mechanické vlastnosti by měl být rastrový úhel každé vrstvy kolmý k rastrovému úhlu vrstvy předešlé [15,16].



Obr. 13 Rastrový úhel [15].

- **Rastrová šířka** je šířka právě položeného vlákna. Většinou to bývá od 0,25 mm do 0,68 mm. Platí, že čím je vlákno tenčí, tím je výsledná pevnost vyšší [15,16].
- Pro pevnost jsou taktéž důležité **vzduchové mezery** mezi jednotlivými vlákny. Tyto mezery mohou být nastaveny jako pozitivní i jako negativní (viz. Obr. 14), přičemž větších pevností dosahují součásti s negativními vzduchovými mezerami. Hodnota by ale neměla překročit -0,05 mm, aby tak byla dodržena požadovaná jakost povrchu a celková přesnost součásti [15,17].



Obr. 14 Vzduchové mezery [15]. a) pozitivní, b) neutrální, c) negativní.

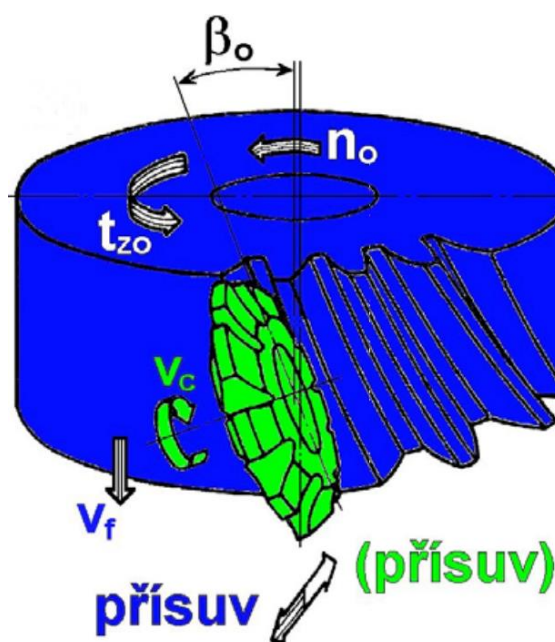
- **Rychlost vtláčení** materiálu do hlavičky závisí na velikosti tištěné součásti a taky na rychlosti hlavičky, což ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu. Většinou se používají rychlosti 20 až 25 mm/s pro komplikovanější součásti a 10 mm/s pro ty jednodušší [11].
- U nastavení **teploty tisku** je důležité vycházet z teploty tavení použitého materiálu. Teplota by neměla být příliš nízká, aby nedošlo k ucpaní trysky, ale ani příliš vysoká, aby zase materiál samovolně nevytékal. U první vrstvy je dobré nastavit teplotu o 5 °C vyšší pro dobré natavení materiálu. Podložka by měla být u ABS nahřátá na 100 °C [11].

2 KONVENČNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY OZUBENÍ

Výroba šikmého ozubení patří mezi náročnější technologické procesy. Existuje však několik možností výroby lišící se kinematikou obráběcího procesu, použitým nástrojem a strojem či způsobem upnutí. Šikmé ozubení se tedy zpravidla vyrábí frézováním či obrážením [20].

2.1 Frézování dělicím způsobem

U tohoto způsobu výroby se pracovní stůl (univerzální nebo speciální frézky) natáčí o úhel sklonu zubů (β_o) vůči ose nástroje. Nástrojem je zde modulová nebo stopková fréza, která má přesný tvar zubové mezery. Frézy se proto dodávají v sadách s danými moduly (0,2 až 16 mm), pro určité rozsahy počtu zubů. Nástroj vždy obrobí jednu zubovou mezeru, poté se obrobek upnutý v dělicím přístroji otočí o jednu zubovou (t_{zo}) rozteč a proces se opakuje (viz. Obr. 15). Metoda je vhodná pro kusovou výrobu s menšími nároky na přesnost [20].



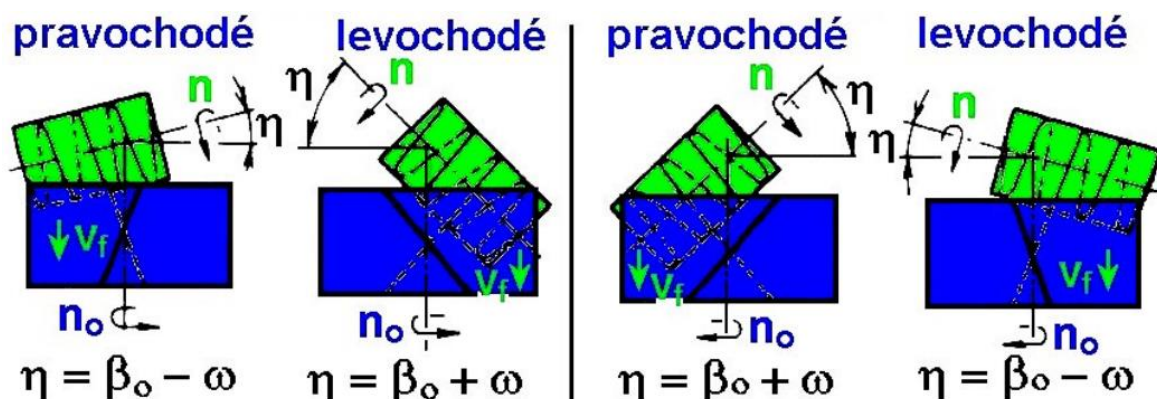
Obr. 15 Frézování šikmého ozubení dělicím způsobem [20].

2.2 Frézování odvalovacím způsobem

U odvalovacího způsobu je v záběru odvalovací fréza (pravochodá nebo levochodá) ve tvaru evolventního šneku a vyráběné ozubené kolo. Nástroj a obrobek se mezi sebou navzájem otáčejí (n , n_o), přičemž se fréza ještě posouvá směrem dolů rychlostí v_f . Vzájemný vztah mezi otáčkami a počtem zubů je uveden ve vztahu (2.1). Jednu odvalovací frézu lze použít pro libovolný počet zubů, ale pouze pro jeden modul. Při výrobě šikmého ozubení se poté dle úhlu sklonu zubů (β_o) a úhlu stoupání šroubovice frézy (ω) počítá úhel natočení frézy η (viz. Obr. 16). Proces výroby ozubení je oproti frézování dělicím způsobem plynulý a tudíž vhodný pro velkosériovou výrobu [20].

$$\frac{n_o}{n} = \frac{z}{z_o} \quad (2.1)$$

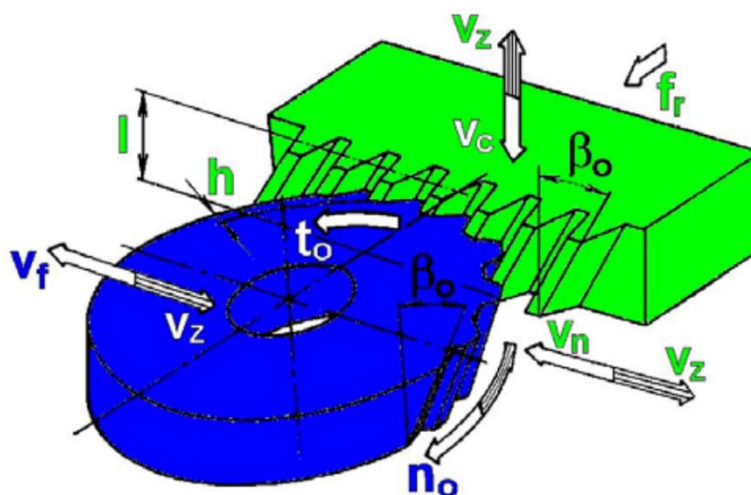
kde: n, n_o [min^{-1}] – otáčky frézy, obrobku,
 z, z_o [-] – počet zubů frézy, obrobku.



Obr. 16 Výroba šikmého ozubení odvalovacím způsobem [20].

2.3 Obrázení hřebenovým nožem

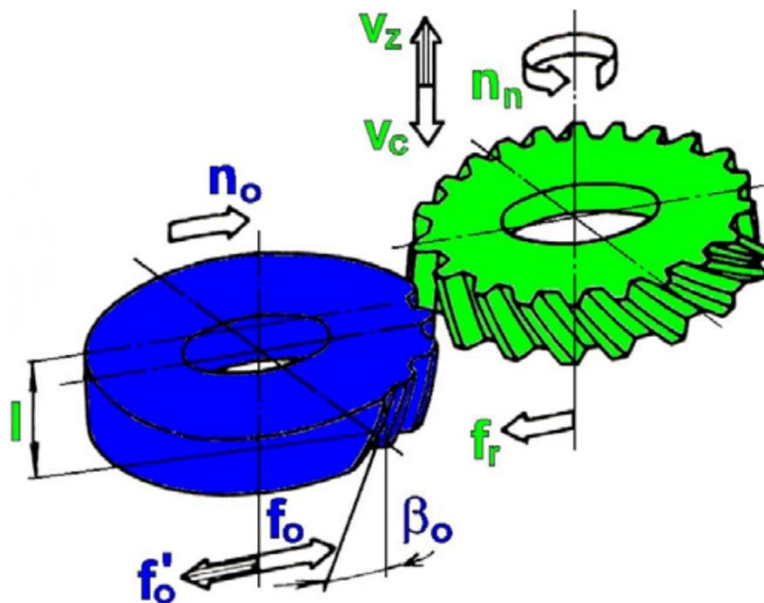
Metoda se označuje jako systém Maag. Nástrojem je hřebenový nůž, který je nastaven na hloubku zubu (h) a svým přímočarým vratným pohybem tak přichází rychlostí (v_c) do záběru s obrobkem a rychlostí (v_z) ze záběru odchází (l – délka zdvihu). Výroba šikmého ozubení zde probíhá prostřednictvím otáčivého pohybu obrobku (n_o) a posuvového pohybu jak obrobku, tak nástroje (v_f, v_n), jež se po sobě odvalují a vytváří ozubení (viz. Obr. 17). Pokud má nástroj přímé zuby, vyklání se smykadlo stroje o úhel sklonu zubů obrobku (β_o). Hřebenové nože se vyznačují nejjednodušší konstrukcí a zároveň nejpřesnější výrobou ozubení, přičemž je tato výroba časově poněkud náročná [20].



Obr. 17 Obrázení šikmého ozubení hřebenovým nožem (Maag) [20].

2.4 Obrážení kotoučovým nožem

Tato metoda se označuje jako Fellows a její princip je podobný metodě Maag (viz. Obr. 18). Nástroj je však obdobou ozubeného kola a do záběru přichází právě tak, jako by spolu zabírala dvě ozubená kola. Navíc však koná přímočarý vratný pohyb. Nástroje se vyrábí ve stopkové či nástrčné variantě, tudíž mohou sloužit i pro výrobu vnitřního ozubení. Výroba probíhá na odvalovacích obrážkách [20].



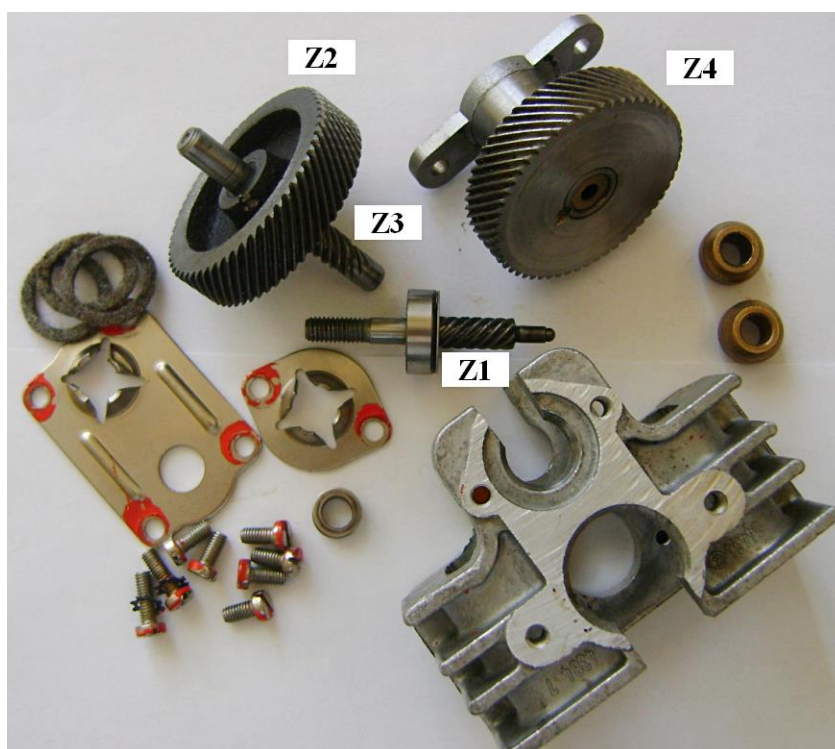
Obr. 18 Obrážení šikmého ozubení kotoučovým nožem (Fellows) [20].

3 NÁVRH OZUBENÉHO SOUKOLÍ

Předlohou modelu byla konstrukce převodovky z kuchyňského hnětače na těsto ETA 0010 s maximálním výkonem 380 W. Návrh soukolí s šikmým ozubením a převodové skříně pro následný tisk probíhal v prostředí programu Autodesk Inventor Professional 2013. Hřídele pod ozubená kola byly z pevnostních důvodů vyrobeny prostřednictvím konvenční výroby.

3.1 Parametry a popis výchozí předlohy

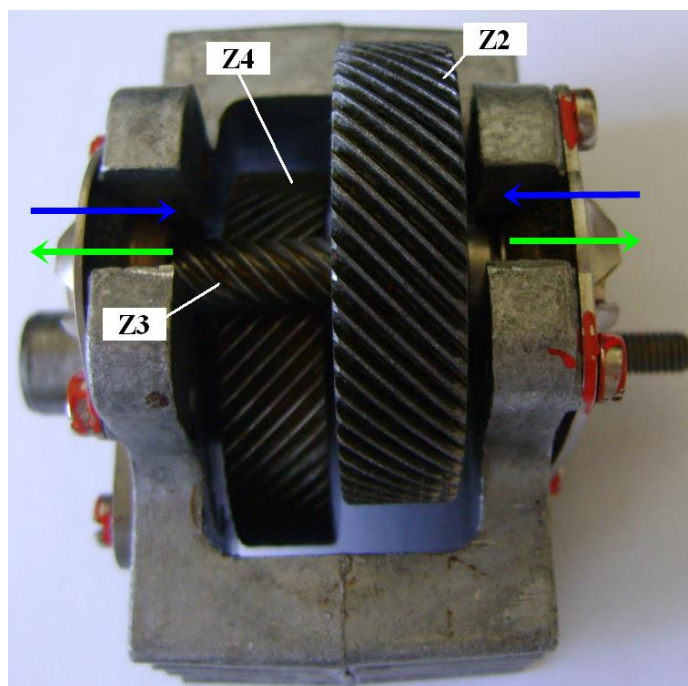
Převodovka z kuchyňského hnětače se skládá ze čtyř ozubených kol z_1 , z_2 , z_3 a z_4 (viz. Obr. 19) uložených v převodové skříně. Ozubená kola z_1 a z_3 jsou vyrobená přímo z hřídelů a kola z_2 a z_4 jsou nalisována. Na vstupní hřídeli je závit pro uchycení motoru a nalisované valivé ložisko. Tato hřídel je, prostřednictvím kloubu ve formě kuličky, nepřímou spojena s výstupní hřídelí, na které je ozubené kolo z_4 . Otáčky se ze vstupní hřídele přenáší na ozubená kola z_2 a z_3 , jejichž hřídel je na obou koncích uložena v kluzných pouzdrech. Na závěr se otáčky přenáší na výstupní hřídel s ozubeným kolem z_4 , kde jsou (oproti vstupu) otáčky sníženy až o 98%. Jedná se tedy o převod „do pomala“ pro vyvození velké hnětací síly.



Obr. 19 Jednotlivé části převodové skříně z kuchyňského mixéru.

Kluzná pouzdra jsou v axiálním směru zajištěna pomocí vík upevněných na bocích převodové skříně. Tato víka taktéž eliminují axiální síly, které při záběru kol s šikmým ozubením vznikají. Ozubená kola z_2 a z_3 jsou navíc skládaná tak, že axiální síly každého kola působí vždy opačným směrem (pravé a levé). To samé platí i pro ozubená kola z_1 a z_4 (viz. Obr. 20). Vysoké převodové poměry jsou pravděpodobně voleny z důvodu

vyvození velkého krouticího momentu na výstupu při použití motoru s nízkým výkonem. Úhel sklonu zubů je poté volen 45°, aby byl při vyšším počtu zubů v záběru krouticí moment spolehlivě přenášen.



Obr. 20 Smontovaná převodová skříň z kuchyňského hnětače.

Tab. 2 Naměřené hodnoty (posuvné měřítko značky Somet).

Ozubená kola	Počet zubů z [-]	Průměr hlavové kružnice d_a [mm]	Úhel sklonu zubů β [°]	Šířka ozubení b [mm]
1	7	7,2	45	17
2	57	49,6	45	12,2
3	8	8	45	18
4	56	48,8	45	12

$$i_{1,2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{57}{7} = 8,143 \quad (3.1)$$

$$i_{3,4} = \frac{z_4}{z_3} = \frac{n_3}{n_4} = \frac{56}{8} = 7 \quad (3.2)$$

kde: i [-] – převodový poměr,
 n [s⁻¹] – otáčky.

Př. 1 Výpočet snížení otáček ze vstupu na výstup, přičemž $n_2 = n_3$.

- Maximální otáčky mixéru jsou $n_1 = 200 \text{ s}^{-1}$.

$$i_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow n_2 = \frac{n_1}{i_{1,2}} = \frac{200}{8,143} = 24,56 \text{ s}^{-1} \quad (3.3)$$

$$i_{3,4} = \frac{n_3}{n_4} \rightarrow n_4 = \frac{n_3}{i_{3,4}} = \frac{24,56}{7} = 3,5 \text{ s}^{-1} \quad (3.4)$$

Z původních 200 s^{-1} se otáčky na výstupu snížili až na $3,5 \text{ s}^{-1}$.

- Teoretický výpočet **modulu**.

$$\begin{aligned} d_{a1} = d_1 + 2 \cdot h_{a1} = m_1 \cdot z_1 + 2 \cdot m_1 = m_1 \cdot (z_1 + 2) \rightarrow m_1 &= \frac{d_{a1}}{z_1 + 2} = \frac{7,2}{7 + 2} = \\ &= 0,8 [-] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} d_{a2} = d_2 + 2 \cdot h_{a2} = m_2 \cdot z_2 + 2 \cdot m_2 = m_2 \cdot (z_2 + 2) \rightarrow m_2 &= \frac{d_{a2}}{z_2 + 2} = \frac{49,6}{57 + 2} = \\ &= 0,84 [-] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dle ČSN 01 4608 byl na základě výpočtu zvolen modul 0,8 pro všechna ozubená kola výchozí převodovky [21,22].

Př. 2 Výpočet krouticího momentu M_k a obvodové síly F_o [30].

- Maximální otáčky mixéru jsou $n_1 = 200 \text{ s}^{-1}$ při výkonu $P = 380 \text{ W}$.

$$M_{K1} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{380}{2 \cdot \pi \cdot 200} = 0,3 \text{ Nm} \quad (3.7)$$

$$M_{K2} = M_{k1} \cdot i_{1,2} = 0,3 \cdot 8,143 = 2,46 \text{ Nm} \quad (3.8)$$

$$M_{K3} = M_{k2} \cdot i_{3,4} = 2,46 \cdot 7 = 17,2 \text{ Nm} \quad (3.9)$$

- Pro pastorky jsou voleny roztečné kružnice $d_1 = 5,4 \text{ mm}$ a $d_3 = 6,2 \text{ mm}$.

$$F_{o1} = \frac{2 \cdot M_{K1}}{d_1} = \frac{2 \cdot 0,3}{0,0054} = 112 \text{ N} \quad (3.10)$$

$$F_{o3} = \frac{2 \cdot M_{K2}}{d_3} = \frac{2 \cdot 2,46}{0,0062} = 794,3 \text{ N} \quad (3.11)$$

Krouticí moment se zvyšuje až o 98 % a několikanásobně roste i obvodová síla.

3.2 Návrh ozubených kol s šikmými zuby

Návrh byl proveden pomocí generátoru ozubených kol v programu Autodesk Inventor Professional 2013, kde byl zadán pouze modul, převodový poměr, počet zubů pastorku, úhel sklonu zubů, šířky ozubených kol a zbytek rozměrů se automaticky vytvořil. Ozubená kola byla navržena s ohledem na přesnost, funkčnost a výrobnost celé součásti (viz. Tab. 3). Nepatrné rozdíly mezi dvěma malými a dvěma velkými koly z předlohy byly z důvodu zachování parametrů (osová vzdálenost) stmeleny a byla tak navržena dvě malá a dvě velká identická kola s opačnou orientací sklonu zubů. Tyto čtyři kola budou i s převodovou skříní vytištěna na 3D tiskárně.

Tab. 3 Navržené hodnoty pro ozubená kola.

Ozubená kola	Pastorek	Kolo
Převodový poměr – i [-]	7,5	
Modul – m [-]	1	
Výška hlavy zubu – h _a [mm]	1	
Výška paty zubu – h _f [mm]	1,25	
Výška zubu – h [mm]	2,25	
Počet zubů – z [-]	9	67
Šířka ozubení – b [mm]	21	18
Úhel profilu zubů – α [°]	20	
Úhel sklonu zubů – β [°]	45	
Rozteč – p [mm]	3,142	
Osová vzdálenost – a [mm]	53,8	
Průměr roztečné kružnice – d [mm]	12,73	94,75
Průměr základní kružnice – d _b [mm]	11,32	84,25
Průměr patní kružnice – d _f [mm]	10,4	92,27
Průměr hlavové kružnice – d _a [mm]	14,9	96,77
Jednotkové posunutí - x	0,0864	0,0108
Orientace zubů	Pravé i levé	

Kontrolní výpočet rozměrů:

- Pro odlišení znaků vůči ozubeným kolům z předlohy bude pro výpočet využito indexů 5 pro pastorek a 6 pro kolo. Nejprve je dobré určit tečný modul (m_t) vycházející z čelní (tečné) roviny.

$$m_t = \frac{m}{\cos\beta} = \frac{1}{\cos 45^\circ} = 1,414 \text{ mm} \quad (3.12)$$

- A dále už výpočet pokračuje standardně [21].

$$d_5 = z_5 \cdot m_t = 9 \cdot 1,414 = 12,73 \text{ mm} \quad (3.13)$$

$$d_{a5} = d_5 + 2 \cdot h_a = 12,73 + 2 \cdot 1 = 14,73 \text{ mm} \quad (3.14)$$

$$d_{f5} = d_5 - 2 \cdot h_f = 12,73 - 2 \cdot 1,25 = 10,23 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$d_6 = z_6 \cdot m_t = 67 \cdot 1,414 = 94,75 \text{ mm} \quad (3.16)$$

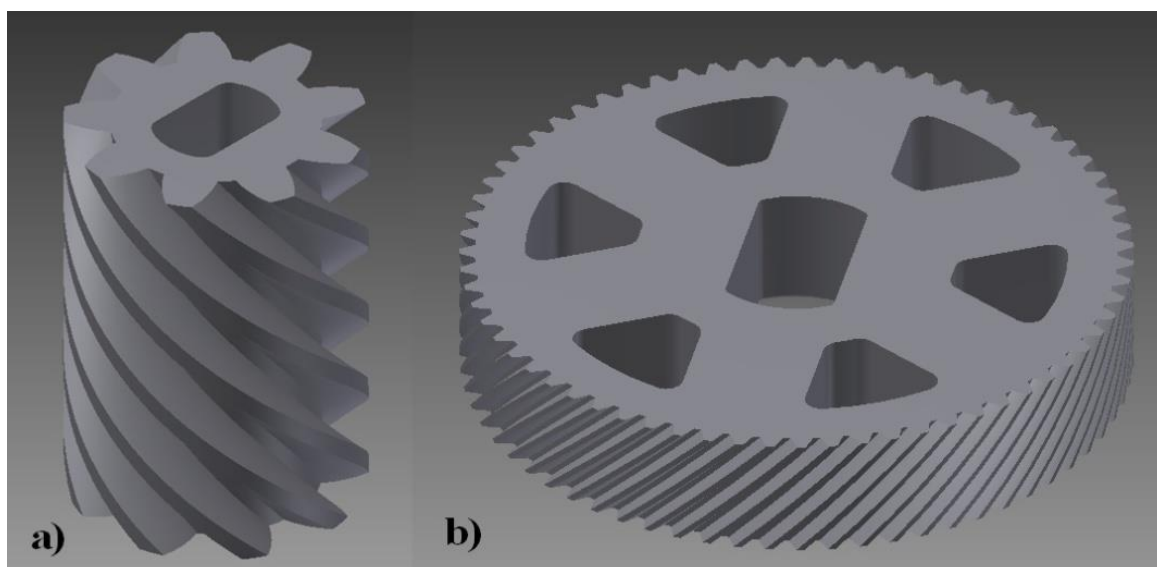
$$d_{a6} = d_6 + 2 \cdot h_a = 94,75 + 2 \cdot 1 = 96,75 \text{ mm} \quad (3.17)$$

$$d_{f6} = d_6 - 2 \cdot h_f = 94,75 - 2 \cdot 1,25 = 92,25 \text{ mm} \quad (3.18)$$

$$a = \frac{d_5 + d_6}{2} = \frac{12,73 + 94,75}{2} = 53,74 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Hodnoty až na nějaké drobné výjimky odpovídají vygenerovaným kolům.

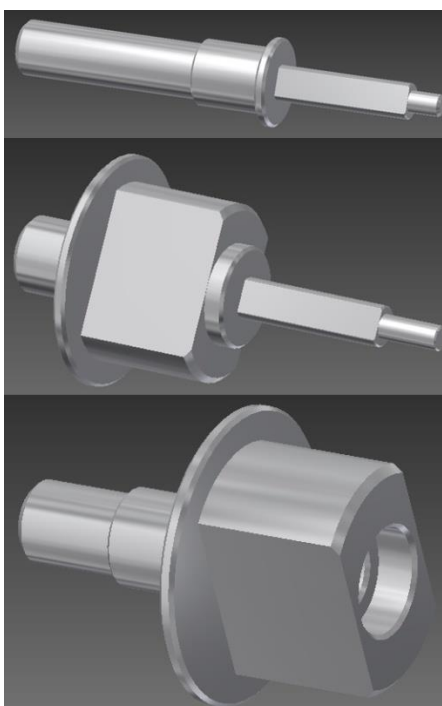
Ozubená kola byla navržena s jednotným převodovým poměrem $i = 7,5$ (viz. Obr. 21). Modul byl z výrobních možností 3D tiskárny povýšen na $m = 1$ a počet zubů pastorku se zvedl z původních 7 na 9 a to především z důvodu malých rozměrů ozubených kol. Několikrát tak byly zvažovány velikosti ozubených kol a to především z důvodů úspory materiálu, času a v neposlední řadě, kvůli deformacím použitého materiálu (ABS) při výrobě. I když se totiž může zdát, že čím větší je plocha pro tisk, tím lépe, opak je pravdou. Rozměrné součásti se tisknou spíše jinými metodami (např. Stereolitografie). Prostřednictvím metody FDM se mohou tisknout součásti s rozměry pouze okolo 200 mm v jedné ose, ale to jen dokonce při využití materiálu PLA, který navíc ztrácí své mechanické vlastnosti už při teplotách nad 60 °C. Pro materiál ABS, který bude při výrobě použit, se doporučuje tisknout součásti s rozměry pouze do 150 mm a navíc s použitím vyhřívané podložky. V jiném případě by mohlo dojít k větším deformacím modelu a k jeho následnému znehodnocení. Proto jsou rozměry malého a velkého kola, které na sobě skrz převodový poměr závisí, voleny tak, aby spolehlivě přenášeli krouticí moment a zároveň svými rozměry nepřesahovali 100 mm v průměru. Otvory v ose kol jsou navrženy tak, aby přenášeli krouticí moment z hřídelů na obvod kol. Jejich rozměry jsou k tomu navrženy o 0,2 mm větší z důvodu smrštění materiálu (viz. Přílohy 1,2). Ozubená kola pak budou na hřídele nalisována a budou tak zajištěny proti působení axiálních sil. Velké kolo je navíc z důvodu úspory materiálu odlehčeno o otvory vytvořené po jeho obvodě. Veškerá zaoblení jsou volena tak, aby žádný materiál „nevisel ve vzduchu.“ Tyto úpravy jsou výsledkem optimalizace procesu výroby ozubených kol na 3D tiskárně [2].



Obr. 21 Modely ozubených kol. a) pastorek, b) kolo.

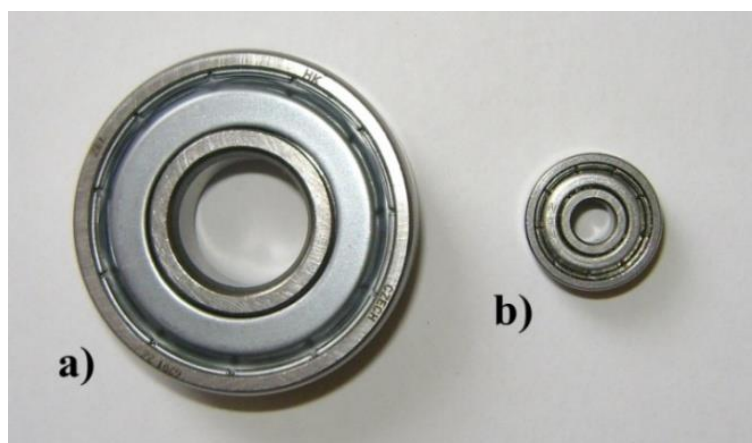
3.3 Návrh hřídelů

Rotační prvky hřídelů budou vyrobeny na hrotovém soustruhu. Pro přenos krouticího momentu budou na každém průměru pod ozubeným kolem, pomocí univerzální frézky, vyfrézovány plošky s tloušťkou přibližně 60 % z průměru (viz. Obr. 22). Rozměry hřídelů jsou navrženy a přizpůsobeny vygenerovaným ozubeným kolům (nejmenší a největší průměr, šířka ozubených kol), přičemž z konstrukčního hlediska stále vychází z předlohy (viz. Přílohy 4,5,6). Vstupní a výstupní hřídele však budou (oproti předloze) nepřímo spojeny valivým kuličkovým ložiskem.



Obr. 22 Modely hřídelů do převodové skříně.

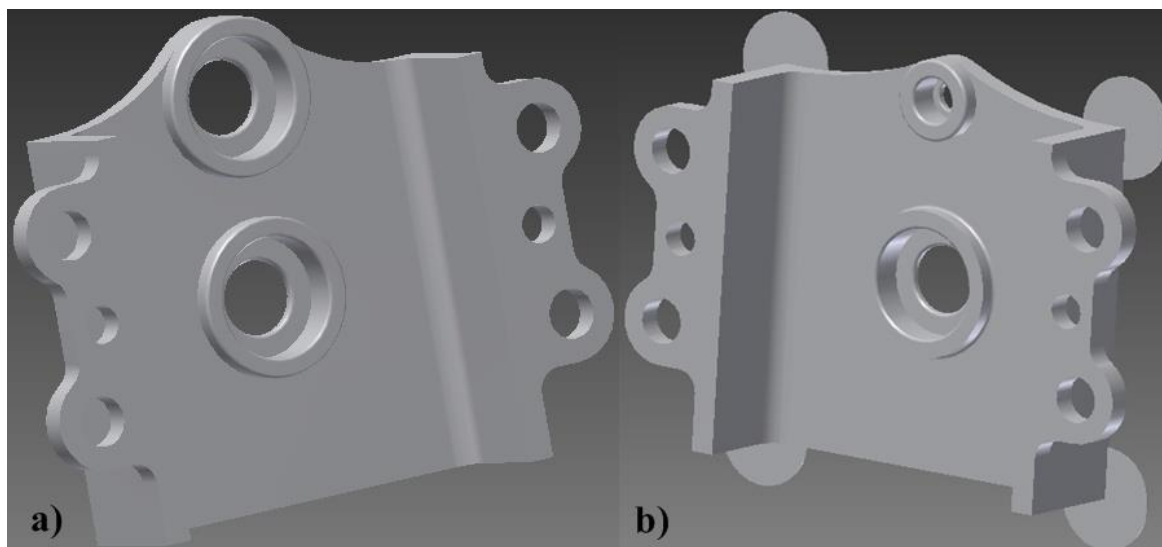
Hřídele budou uloženy prostřednictvím tří kuličkových ložisek 6201 s vnitřním průměrem $d_L = 12$ mm, vnějším průměrem $D_L = 32$ mm a šířkou $B_L = 10$ mm a tři kuličkových ložisek 624 s vnitřním průměrem $d_L = 4$ mm, vnějším průměrem $D_L = 13$ mm a šířkou $B_L = 5$ mm. Ložiska mají uzavřenou skříň pro samomazný účinek (viz. Obr. 23). Jedno ložisko typu 624 bude vloženo do otvoru ve výstupní hřídeli a do něj bude vložena hřídel vstupní, což obě hřídele nepřímou spojí.



Obr. 23 Valivá kuličková ložiska. a) 6201-2Z, b) 624-2Z.

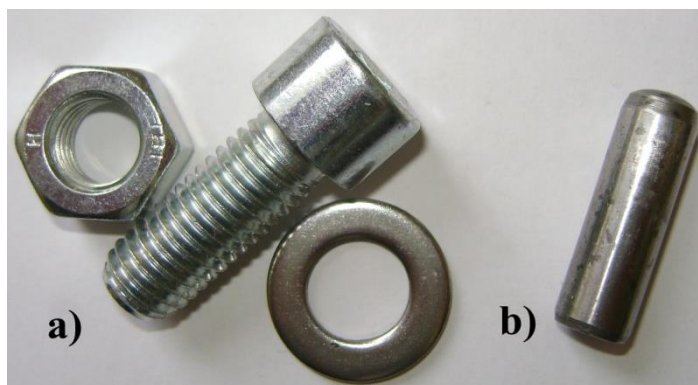
3.4 Návrh převodové skříně

Rozměry a tvar převodové skříně vycházejí z parametrů navržených kol (osová vzdálenost, největší průměr kola), dle toho navržených hřídelů (délka hřídelů) a rovněž kuličkových ložisek (viz. Příloha 3). Další omezení jako je minimální tloušťka stěny či maximální přípustné rozměry byly zvažovány. Veškerá zaoblení byla volena tak, aby nevznikaly části s materiálem visícím „ve vzduchu.“ Základna součásti je tedy bez zaoblení. Převodová skříň byla z montážního důvodu (oproti předloze) navržena jako dělená (viz. Obr. 24). Z tohoto hlediska byly navrženy dva otvory pro zajištění polohy nalisovaným kolíkem a čtyři otvory pro rozebíratelné spojení obou částí. Otvory pro kuličková ložiska byly navrženy o 0,2 mm větší z důvodu smrštění materiálu ABS. Tyto ložiska tak budou v otvorech nalisována s minimálním přesahem na danou hloubku, zajištěnou tenkou stěnou s menším průměrem. Na každém rohu základny pak byla ještě vytvořena jakási packa (o tloušťce 0,5 mm), která má při výrobě zabránit odlepování (zvedání) rohů od podložky z důvodu smršťování materiálu (viz. Obr. 24 b).



Obr. 24 Dvě poloviny převodové skříně. a) bez pacek, b) s packami.

Pro spojení převodové skříně budou použity čtyři šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762–M12x30 s šestihrannými maticemi ISO 4032–M12-8 a příslušnými kruhovými podložkami. Poloha bude zajištěna pomocí dvou válcových kolíků ISO 2338–10 m6 x 30 (viz. Obr. 25) [22].



Obr. 25 Spojovací prvky. a) šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem s maticí a podložkou, b) válcový kolík.

4 VÝROBA OZUBENÉHO SOUKOLÍ

Po návrhu a vymodelování součástí následuje ještě několik nutných kroků, které předchází samotné výrobě součástí (Pre-processing). Poté už pracuje tiskárna zcela automaticky (Processing) a na závěr se musí provést ještě několik manuálních úkonů k dokončení výroby (Postprocessing).

4.1 Předvolby tisku

Soubory získané z programu Autodesk Inventor 2013 jsou následně převedeny a uloženy ve formátu, vhodném pro 3D tisk (.stl). Tato konverze aproximuje křivosti ploch součástí na malé trojúhelníky definované třemi body a normálovým vektorem. Soubory v tomto formátu jsou následně otevřeny v softwaru Kisslicer a zde připravovány na 3D tisk (viz. Obr. 26). Program Kisslicer je jednoduchý (netřeba instalace) a volně přístupný program sloužící k nastavení základních parametrů 3D tisku a následnému převodu těchto dat do G-kódu. Hlavním parametrem každého tisku je především **tloušťka vrstvy** (layer thickness), která však nepřímo úměrně souvisí s kvalitou povrchu a pevností vytištěné součásti. Udává totiž, o kolik se po nanesení jedné vrstvy zvedne tisková hlava v ose Z, respektive jak tlustá bude právě nanesená vrstva.

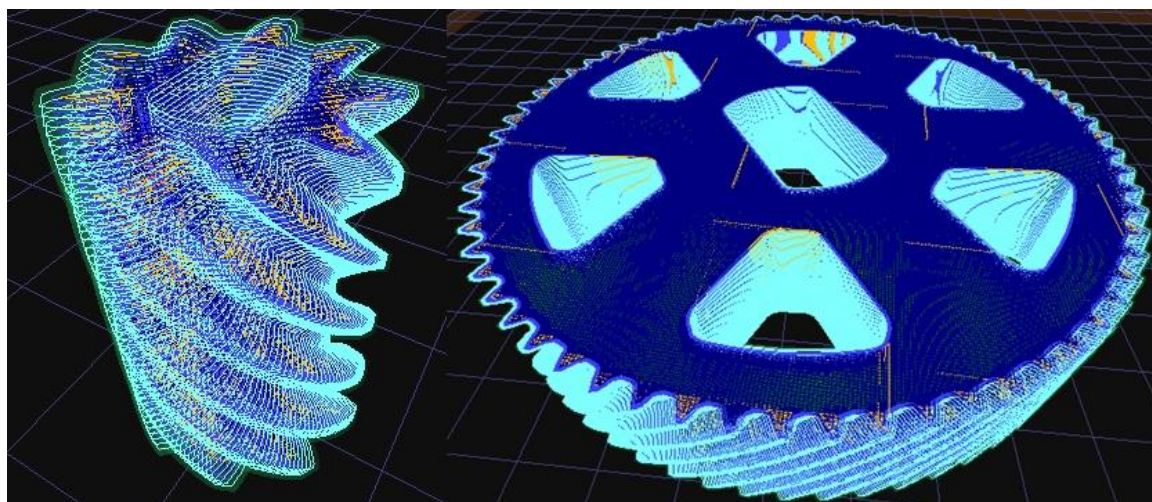
Dalším parametrem je **tloušťka housenky** (extrusion width), která by měla být stejná nebo větší, než je tloušťka vrstvy. Je to samozřejmě z důvodu vnášení dostatečného množství materiálu na předešlou vrstvu. Pokud je housenka větší, než je tloušťka vrstvy, roztéká se materiál do stran. V takovém případě se například volí rychlejší posuv tiskové hlavy.

Další hodnotou je **rychlost vtlačení materiálu** do tiskové hlavy, která se v programu Kisslicer nachází v rozmezí od 15 do 60 mm.s⁻¹.

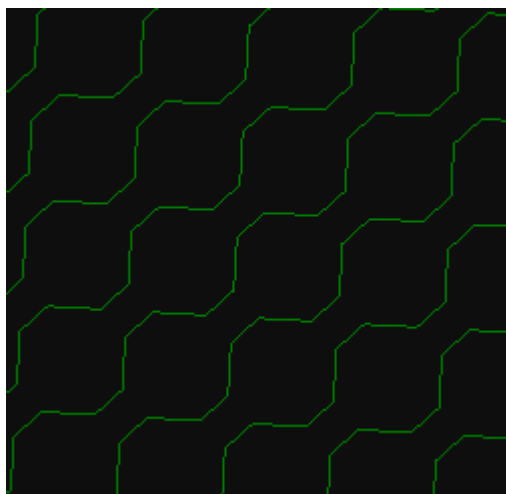
Teplota tiskové hlavy se vždy volí o několik stupňů vyšší, než je samotná teplota tavení materiálu (ABS, $T_t = 250$ °C).

Dalším nastavením se dá zvolit **množství výplně**, která udává, z kolika procent bude objem součásti zaplněn použitým materiálem. Dá se využít rozmezí od plného zaplnění až po dutou součást, opět v závislosti na její pevnosti. Z hlediska úspory materiálu a taktéž času se však výplň volí poloviční (50 %) nebo dokonce čtvrtě (25 %) i méně.

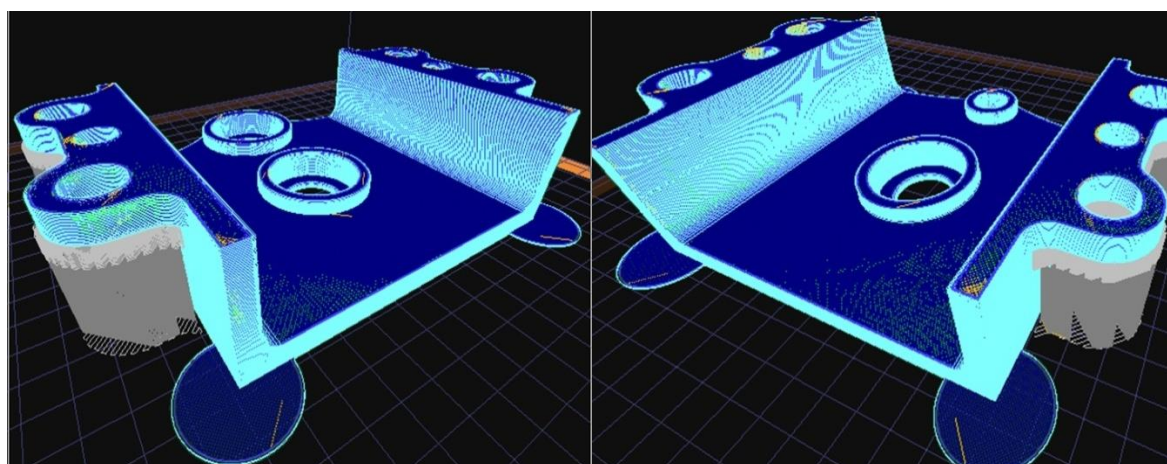
V neposlední řadě je nutné zvolit **styl výplně**, kterou Kisslicer nabízí ve formě šestihranů, kruhů nebo přímých drah nástroje. Častou volbou kladení plastových vláken je pomocí šestihranů, které svým tvarem připomínají včelí úly (viz. Obr. 27). Tato možnost nabízí nejpevnější spojení. Závěrem lze ještě nastavit **tloušťku**, **počet stěn** či **podpory**, pokud jsou potřeba. Podpory se umísťují pod převislé objekty, které se pak na dané podpory nanášejí (viz. Obr. 28). Mohou to být části sklopené v rozmezí od 90° až po 0°. Tyto svislé podpory pak přidržují součást ve vertikální poloze, aby tak nedocházelo k nepřesnostem tisku při pohybu stolu. Dále se nastavuje mřížka (tzv. „raft“) pod tisknuté součásti, která napomáhá zachovat rozměry prvních vrstev a taktéž slouží k bezpečnému odlepení součásti od pracovního stolu. Když jsou parametry nastaveny, využije se funkce „Slice“, při které se součást doslova rozkrájí na zvolené vrstvy, navrhnu se dráhy nástroje, vypočte se čas tisku, množství použitého materiálu a vytvoří se G-kód pro výrobu dané součásti. Poté můžeme součást uložit a pracovat s ní dál. Předvolby tisku pro dané součásti jsou uvedeny v Tab. 4.



Obr. 26 Modely ozubených kol v programu Kisslicer.



Obr. 27 Šestiúhelníkový styl výplně součástí.



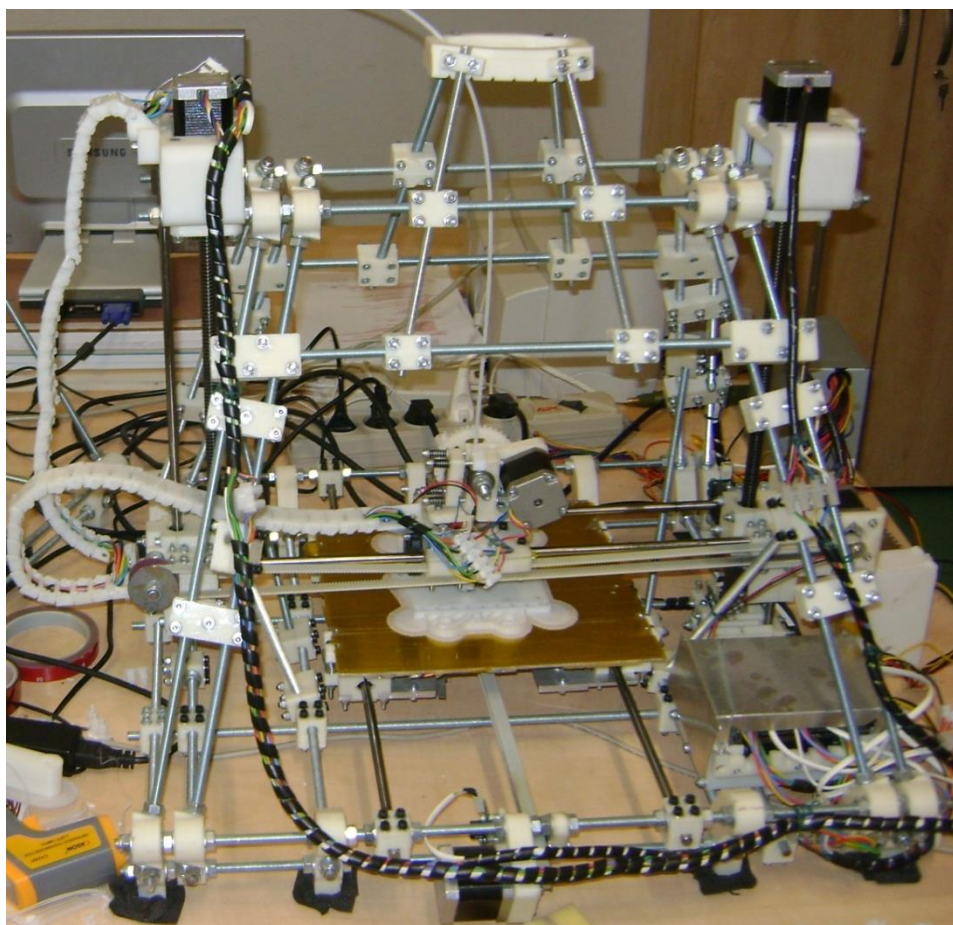
Obr. 28 Modely obou částí převodové skříně s nastavenými podporami.

Tab. 4 Parametry součástí pro 3D tisk.

Součást	Tloušťka vrstvy [mm]	Tloušťka housenky [mm]	Množství výplně [%]	Styl výplně [-]	Rychlost [mm.s ⁻¹]	Počet stěn [-]
Pastorek	0,25	0,4	50	šestihran	32,1	2
Kolo						
Převodová skříň	0,33	0,6	12,5	šestihran	42	2

4.2 Nastavení tisku a tisk součástí

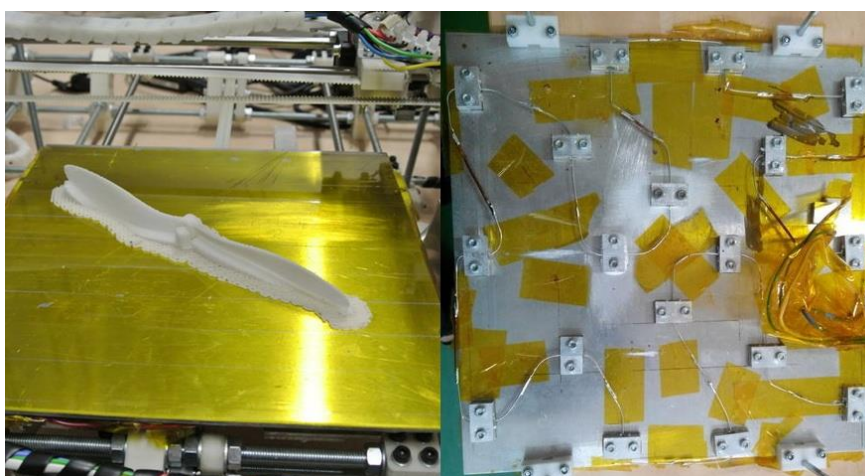
Soubory uložené v programu Kisslicer, které mají v tomto případě koncovku *.gcode, se dále přenáší do počítače, který je už přímo spojený s ovládací technikou 3D tiskárny. Zde se soubory otevírají v programu Repraplayer, který slouží ke komunikaci s 3D tiskárnou. Nastavují se poslední parametry a data ve formě G-kódu už se odesílají do tiskárny „Sinuhed“ typu RepRap (viz. Obr. 29). Tato tiskárna vychází z konstrukce tiskárny Mendel (2009), má však složitější, ale o to pevnější rám. Obsahuje několik důležitých částí, bez kterých by tiskárna nemohla pracovat. První z nich je cívka s materiálem ABS ve formě drátu o průměru 3 mm.



Obr. 29 RepRap tiskárna Sinuhed.

Tento drát je vtlačěn do tiskové hlavy, jejíž pohyb je zajištěn pomocí krokového motoru a ozubeného převodu. Materiálem trysky je mosaz, především díky její dobré tepelné vodivosti, pevnosti, obrobitelnosti a antikorozi. Průměr trysky je 0,4 mm. Jako zdroj tepla jsou použity dva rezistory. Pro tisk součástí z materiálu ABS se většinou používá teplota tiskové hlavy 260 °C [23].

Poslední hlavní částí je vyhříváná hliníková podložka, na které je model vystavován (viz. Obr. 30). Jejím hlavním úkolem je udržet dostatečnou teplotu při tisku a zabránit tak deformacím součástí vlivem rychlého ochlazování. Pro tisk zvolených součástí byla nastavena teplota 120 °C. Zdrojem tepla je 18 rezistorů nalepených zespodu podložky. Její rozměry jsou 250 x 250 x 3 mm [24].



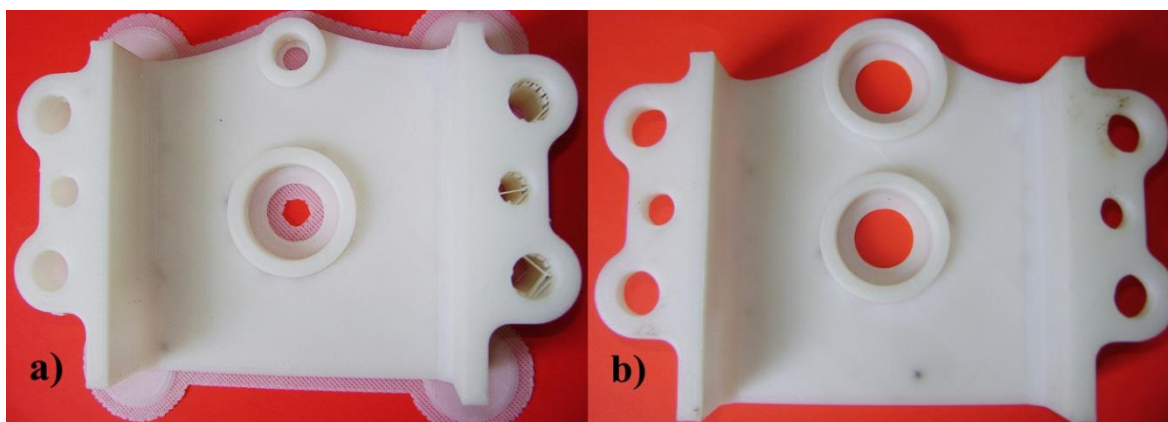
Obr. 30 Vyhříváná podložka s 18 rezistory [24].

Obě velká kola byla při nastavených parametrech vytištěna za 10 hodin a 16 minut. Pastorky se tiskly zároveň a byla zhotoveny za 1 hodinu a 4 minuty (viz. Obr. 31). Objem pastorku je $V_p = 2,15 \text{ cm}^3$ a objem velkého kola pak $V_k = 59,2 \text{ cm}^3$. Hmotnost pastorku je $m_p = 2 \text{ g}$ a hmotnost kola je $m_k = 43 \text{ g}$.



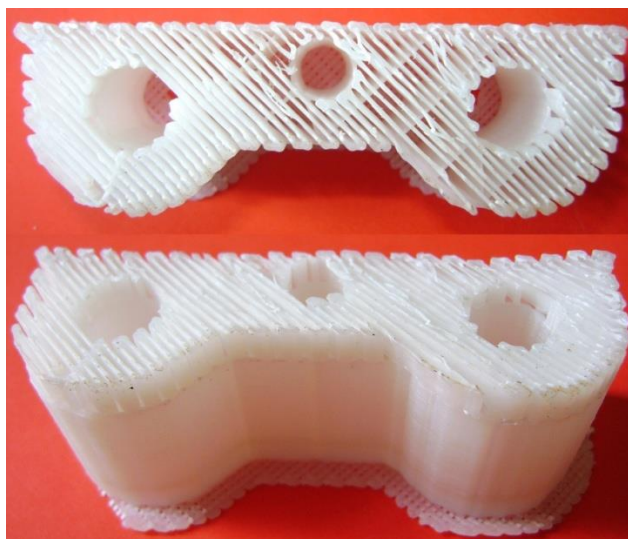
Obr. 31 Vytištěná ozubená kola.

Každá polovina převodové skříně se tiskla 4 hodiny a 30 minut (viz. Obr. 32). Objem první části převodové skříně je $V_{S1} = 112,8 \text{ cm}^3$ a druhé pak $V_{S2} = 111,5 \text{ cm}^3$.



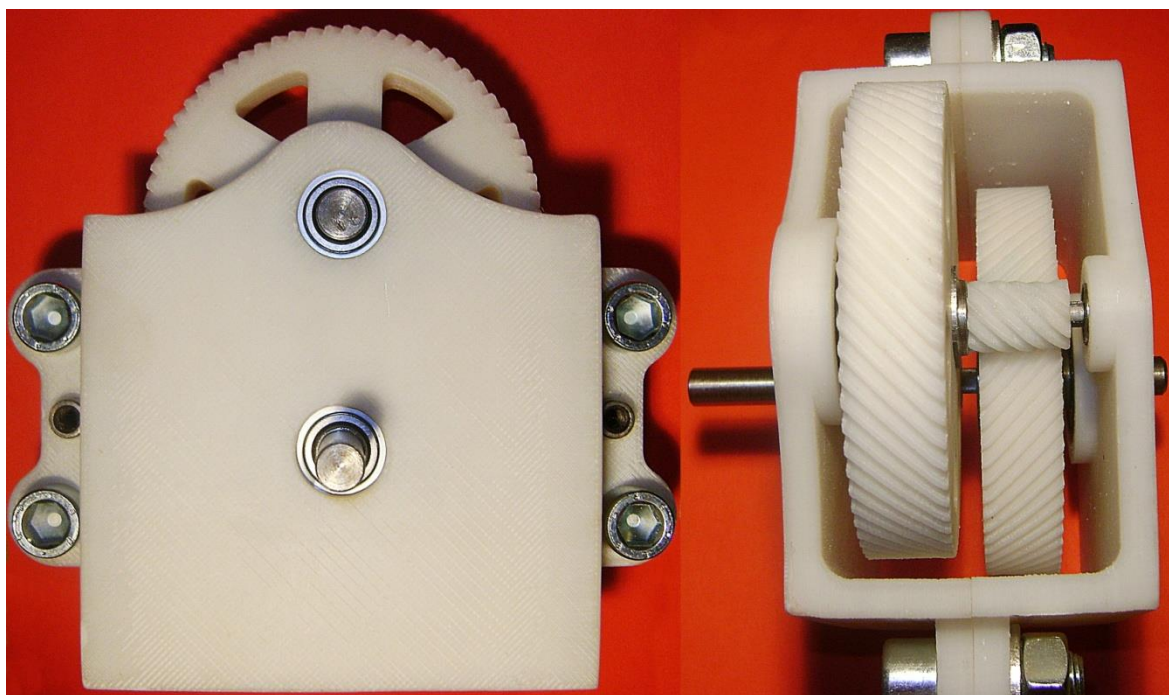
Obr. 32 Dvě části vytištěné převodové skříně. a) neopracovaná část s raftem a podporami, b) část zbavená podpor a raftu.

Mřížka po obvodě byla odtržena a podpory byly odděleny odlamovacím nožem (viz. Obr. 33). Přidaná vrstva raftu byla od základny odbroušena a zahlazena brusným papírem. Hrany a zbylé nerovnosti pak byly sraženy pomocí ruční brusky.



Obr. 33 Odstraněné podpory.

Ozubená kola byla také obroušena a zubové mezery byly začištěny jehlovým pilníkem. Otvor pro uložení kol byl taky mírně zabroušen a poté byla kola nalisována na vyrobené hřídele. Dále byla do otvorů v převodové skříně nalisována i ložiska, do kterých byly uloženy hřídele s ozubenými koly. Obě části převodové skříně se zajistily dvěma čepy a stáhly čtyřmi šrouby (viz. Obr. 34). Ozubená kola se musela zprvu zaběhnout, aby do sebe jednotlivé zuby dobře zapadaly. Z tohoto důvodu byla vstupní hřídel uchycena do vrtačky a po dobu několika minut byla převodovka roztočena. I přes nezaběhnuté zuby byl chod poněkud klidný a plynulý.



Obr. 34 Vytištěná převodová skříň.

Zajímavé bude srovnání krouticích momentů a výsledných obvodových sil s původní předlohou. Výchozí podmínky budou stejné, krouticí moment je tedy $M_{k1} = 0,3 \text{ Nm}$. Převodový poměr je $i = 7,5$ [30].

$$M_{K2} = M_{k1} \cdot i = 0,3 \cdot 7,5 = \mathbf{2,268 \text{ Nm}} \quad (4.1)$$

$$M_{K3} = M_{k2} \cdot i = 2,268 \cdot 7,5 = \mathbf{17 \text{ Nm}} \quad (4.2)$$

- Roztečná kružnice vytištěného pastorku je $d_5 = \mathbf{12,73 \text{ mm}}$.

$$F_{o1} = \frac{2 \cdot M_{K1}}{d_5} = \frac{2 \cdot 0,3}{0,01273} = \mathbf{47,5 \text{ N}} \quad (4.3)$$

$$F_{o3} = \frac{2 \cdot M_{K2}}{d_5} = \frac{2 \cdot 2,268}{0,01273} = \mathbf{356 \text{ N}} \quad (4.4)$$

Krouticí moment je díky obdobným převodovým poměrům téměř stejný, ale výsledná obvodová síla je kvůli větším rozměrům pastorku až dvakrát menší. V tomto případě jednoznačně platí, že menší znamená lepší, což by se jistě vyplatilo i z ekonomického hlediska. Je však důležité zvažovat použití, jelikož vytištěná kola mají oproti těm ocelovým mnohonásobně nižší hodnoty mechanických vlastností. Vytištěná kola jsou tedy dvakrát větší, než ty původní a dokonce až třikrát lehčí, ale v převodovce mají až o polovinu nižší silové poměry.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V následující kapitole budou porovnány technicko-ekonomické náležitosti výroby ozubených kol konvenční metodou a metodou FDM tisku.

5.1 Zhodnocení výroby ozubených kol konvenčními technologiemi

Kompletní cenovou nabídku pro výrobu těchto ozubených kol provedl pan Ing. Radoslav Cikánek z firmy Bondy s.r.o. se sídlem v Brně v Modřicích (viz. přílohy 7,8). Materiál ozubených kol byl zvolený taktéž plast Ertacetal H natur, jež se oproti ABS vyznačuje větší mechanickou pevností, tuhostí a dobrou obrobitelností, má však vyšší odolnost proti tečení. Jeho cena je navíc oproti ABS poloviční, zhruba 300 Kč za 1 kg. Ozubení by se vyrábělo frézováním odvalovacím způsobem. Konečná cena však bude o to větší (2600 Kč), z důvodu výroby dvou trnů pro uchycení polygonů při výrobě ozubených kol [25].

Tab. 5 Mechanické vlastnosti Ertacetal H natur [26].

Materiál	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Teplota tání [°C]	Poměrné prodloužení při přetržení [%]	Hustota [kg.m ⁻³]
Ertacetal H natur	78	3600	175	35	1430

Tab. 6 Ceny (bez DPH) za výrobu ozubených kol ve firmě Bondy s.r.o.

Počet kusů [ks]	Cena pastorku [Kč]	Cena kola [Kč]
1	1536	1906
50	154	484
100	135	465

Součástí nabídky byl taktéž přibližný odhad strojních časů a časů pro přípravu. Pro výrobu jednoho kusu bylo zvoleno soustružení na soustruhu a pro výrobu většího počtu ozubených kol (50, 100 ks) byla zvolena výroba na CNC stroji.

Tab. 7 Časy potřebné na výrobu ozubených kol.

Způsob soustružení	Čas na výrobu jednoho kusu pastorku [min]		Čas na výrobu jednoho kusu kola [min]	
	Čas přípravy	Čas strojní	Čas přípravy	Čas strojní
Konvenční	150	22	150	63
CNC	190	11	190	43

5.2 Zhodnocení výroby ozubených kol metodou FDM

U výpočtu ceny za výrobu součástí na FDM tiskárně je potřeba počítat s mnoha různými faktory (cena za 3D modelování, cena za energie spotřebované při tisku, cena za obsluhu, cena za materiál, atd.). Při objednávce se však bere v potaz, jak dlouho se bude součást tisknout a jaký bude její celkový objem, což spolu úzce souvisí. Stanovit jednotnou cenu je ale poněkud složité. Rozmezí se totiž (mimo jiné dle firmy 3D tiskárna v Turnově) pohybuje zhruba od 20 do 1000 Kč za 1 cm³ nebo 200 až 1500 Kč za 1 hodinu provozu stroje v závislosti na použitém materiálu, tištěném množství, složitosti modelu a operačních časech. Je nutné také přičíst cenu za modelování v 3D programu a za konečnou úpravu, což se pohybuje okolo 1000 Kč za 1 hodinu. Dle daných kritérií je zvolena průměrná cena $c = 25$ Kč za 1 cm³ a to bez DPH. Jako výchozí materiál je zde použit ABS (600 Kč za 1 kg). V dnešní době už se však k tisku využívá pevnějších materiálů (např. Ultem 9085), které se svými mechanickými vlastnostmi podobají již zmíněnému Ertacetalu [28,29].

$$N_p = V_p \cdot c = 2,15 \cdot 25 = 54 \text{ Kč} \quad (5.1)$$

$$N_k = V_k \cdot c = 59,2 \cdot 25 = 1480 \text{ Kč} \quad (5.2)$$

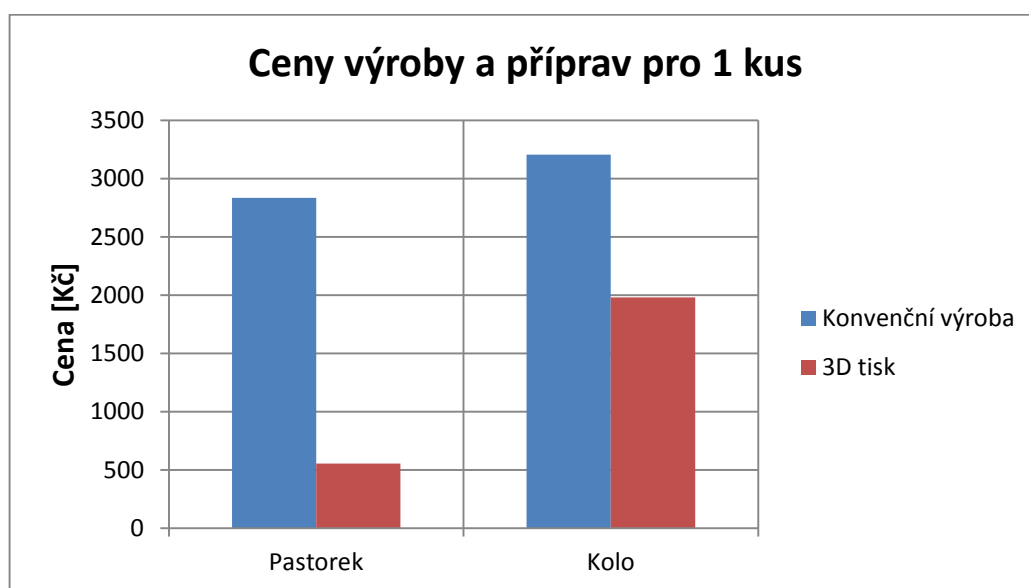
kde: $N_{p,k}$ [Kč] – náklady na tisk ozubených kol,
 $V_{p,k}$ [cm³] – objemy ozubených kol,
 c [Kč.cm⁻³] – cena za výrobu 1 cm³.

Tab. 8 Ceny výroby ozubených kol (bez DPH) a čas výroby na RepRap tiskárně Sinuhed.

Ozubená kola	Cena za 1 kus [Kč]	Čas tisku [min]
Pastorek	54	32
Kolo	1480	308

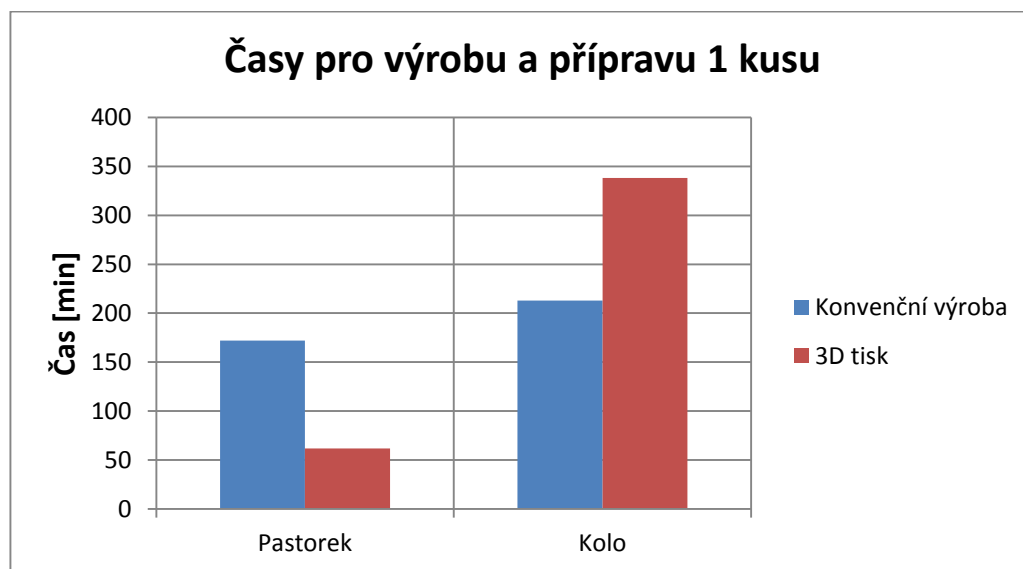
5.3 Porovnání obou metod

U ekonomického porovnání obou metod je důležité brát v potaz jak cenu za samotnou výrobu, tak za její nezbytné přípravy. Z tohoto důvodu bude u konvenční metody ke každé ceně za první a jediný kus ozubeného kola připočtena částka (+ 1300 Kč) z důvodu výroby našeho polygonu potřebného k výrobě. U metody 3D tisku to pak bude částka (+ 500 Kč) za půl hodiny modelování jednoho ozubeného kola. K ceně se taktéž váže časová náročnost výroby. U konvenční metody tak budou sečteny časy strojní a časy příprav a u FDM metody se k časům tisku každého ozubeného kola připočte půl hodina na modelování a nastavení tisku. Ceny budou porovnány pro 1 kus u výroby jednoho kusu (viz. Obr. 35,36) a sériové výroby sto kusů (viz. Obr. 37,38).



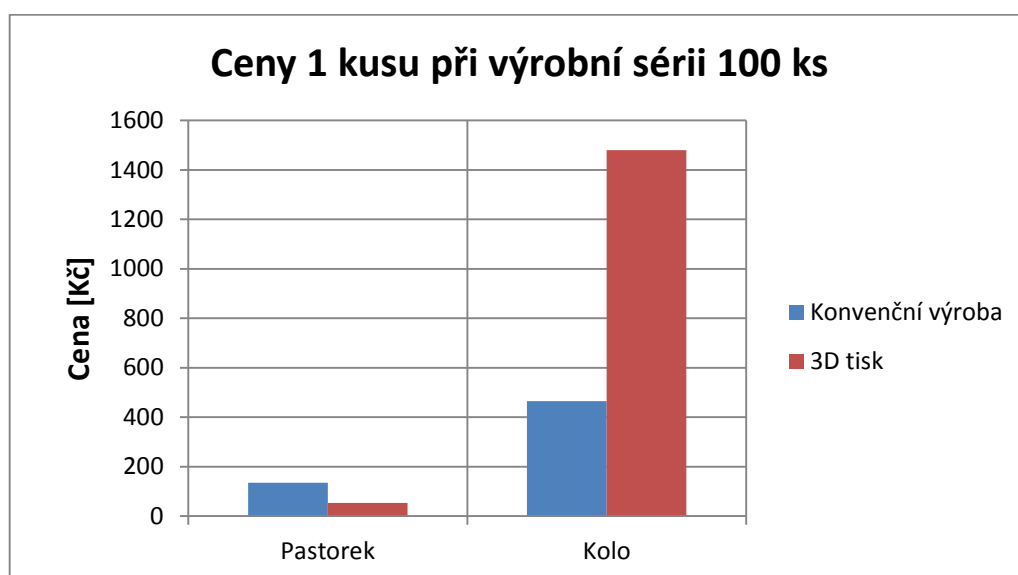
Obr. 35 Porovnání cen příprav a výroby pro 1 kus.

Ceny za výrobu jednoho kusu ozubeného kola jednoznačně ukazuje na levnější využití metody 3D tisku. Je to především z důvodu menší náročnosti procesu celé výroby. V tomto případě je taktéž dobré poukázat na méně citlivou závislost FDM metody na tvarovou náročnost dílců. Z grafu je však patrné, že náklady na výrobu rozměrnějších součástí u FDM metody rostou rychleji, než u metody konvenční.



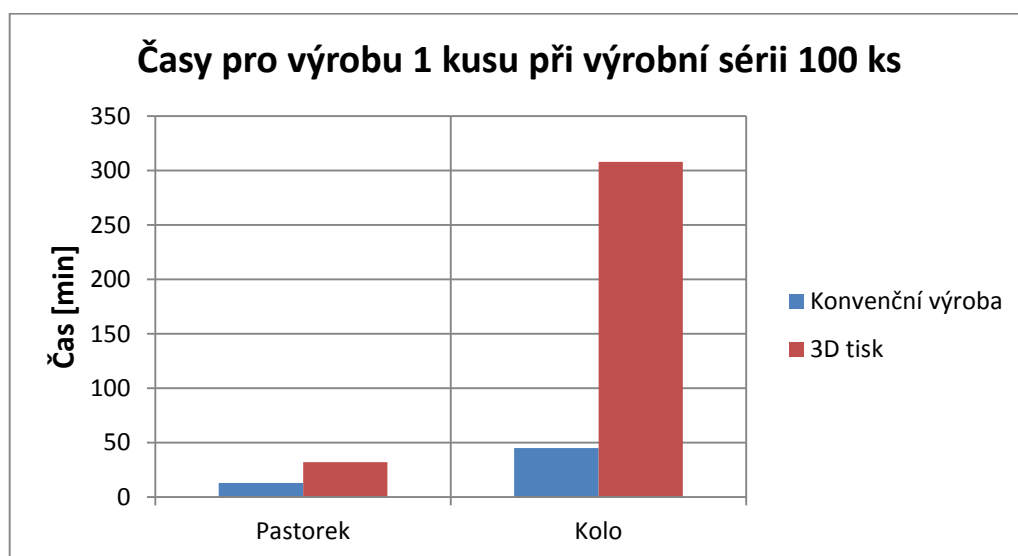
Obr. 36 Porovnání výrobních a přípravných časů na výrobu 1 kusu.

Z grafu časové náročnosti je zřejmé, že výroba rozměrnějších ozubených kol prostřednictvím FDM metody nemůže konkurovat klasické metodě konvenční. U pastorku je však čas i cena za výrobu daleko před výrobou konvenční. Z daného srovnání tedy vychází, že FDM metoda je do určité míry výhodnější pro výrobu jednoho kusu (prototypu).



Obr. 37 Porovnání cen za 1 kus u sériové výroby.

Jelikož se cena za jedno ozubené kolo u konvenční metody při vyšší sérii snižuje, nemůže FDM tisk příliš konkurovat. U 3D tisku se totiž proces výroby nedá jakkoliv urychlit a tedy příliš zlevnit. Samozřejmě by při vyšší sérii mohli přijít v úvahu jisté slevy, ale nebyly by asi tak markantní jako u metody konvenční.



Obr. 38 Porovnání výrobních časů 1 kusu u sériové výroby.

Jak již bylo zmíněno, proces 3D tisku se nedá nějak urychlit, a proto je čas na výrobu jednoho ozubeného kola při vyšší sérii u konvenční metody kratší až o desítky minut. U většího kola je pak čas kratší až o několik hodin.

ZÁVĚR

Výstupem této práce je zhodnocení a porovnání výrob soukolí s šikmým ozubením pro převodovku z kuchyňského mixéru metodou FDM tisku a konvenční metodou.

V teoretickém úvodu je stručně shrnuta metoda Rapid Prototyping, její náležitosti a celkový obecný proces 3D tisku. Dále se v práci uvádí vybrané metody Rapid Prototyping s větším přihlédnutím na metodu FDM. Je popsán jak princip, tak výhody a nevýhody každé metody. Dále jsou uvedeny dva druhy 3D tiskáren, které pracují na principu metody FDM. Jsou také popsány vlastnosti materiálů, využívaných při této metodě a v tabulce jsou porovnány jejich mechanické vlastnosti. V další části jsou shrnuty náležitosti FDM tisku, kterými se dá celý proces optimalizovat. Na závěr teoretické části je uveden popis metod výroby ozubení konvenčními technologiemi.

V druhé části je proveden rozbor převodové skříně z kuchyňského mixéru ETA 0010 a analýza ozubeného soukolí. Jsou vypočteny převáděné otáčky, krouticí momenty a obvodové síly. Následně byly dle této předlohy navrženy parametry pro tištěná ozubená kola. Dle toho byly navrženy i hřídele pod ozubená kola, ložiska, převodová skříně a spojovací prvky. V další kapitole je uveden popis a volba parametrů pro tisk součástí na RepRap tiskárně Sinuhed, která byla následně taktéž stručně popsána. Na závěr byla zanalyzována i vytištěná ozubená kola a byl proveden výpočet krouticího momentu a obvodové síly. V porovnání s předlohou tak vycházely hodnoty až dvakrát nižší.

V poslední kapitole je shrnuta a porovnána technicko-ekonomická náročnost výroby ozubených kol metodou FDM tisku a konvenční metodou. Z uvedených výsledků vychází, že metoda 3D tisku je výhodná tehdy jedná-li se o výrobu menších součástí při menší sérii. V druhém případě je výhodnější využít konvenční metodu výroby.

Tímto hodnocením však výhody 3D tisku nekončí. Úspěšně se využívá i v oblasti lití, kde například nahrazuje drahou výrobu licích forem. Je také mnohokrát výhodnější u výroby tvarově složitých či dekoračních dílců anebo součástí ke kterým nejsou žádné technické podklady nebo by se těžko vytvářeli (náhradní díly). Pokud navíc vyhovují i mechanické vlastnosti, dají se vytištěné součásti využít i jako funkční prvky. 3D tiskárny se tak již nyní díky dostupnějším cenám stále více objevují v praxi. Navíc jsou stále ve vývoji a myslím si tedy, že se tak budou tímto směrem ubírat i nadále.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. NOVAK-MARCINCIN, Jozef. [online]. 2014. [vid 2015-03-18] Modelling of Manufacturing Systems by Rapid Prototyping Technology Application. *Acta Technica Corviniensis*. č. 3. ISSN 2067-3809. Dostupné z: <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-3/ACTA-2014-3-13.pdf>
2. PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. [online]. 2014. [vid 2015-03-22]. *Základy 3D tisku*. Prusa Research. Dostupné také z: http://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/7328/mod_resource/content/0/zaklady-3d-tisku.pdf
3. *Konstruktér: CAD, CAM, PLM, obrábění, 3D tisk, výroba, automatizace*. 2014. Praha: Springwinter. ISBN 1805-8590. ISSN 1805-8590.
4. PANDEY, Pulak M. [online]. 2010. [vid. 2015-03-26]. *Rapid Prototyping Technologies, Applications and Part Deposition Planning*. Dostupné z: http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf
5. CHOI, S.H a S SAMAVEDAM. [online]. 2002. [vid. 2015-03-28]. Modelling and optimisation of Rapid Prototyping. *Computers in Industry*. Roč. 47 č. 1: 39-53. DOI: 10.1016/S0166-3615(01)00140-3. ISSN 01663615. Dostupné z: http://www.imse.hku.hk/intellisyslab/publications/pdf/modelling_and_optimisation_of_rapid_prototyping.pdf
6. *Rapid Prototyping & Manufacturing Technologies*. [online]. 2012. [vid. 2015-03-28]. The Hong Kong Polytechnic University. Dostupné také z: http://www.ic.polyu.edu.hk/student_net/training_materials/2012/IC%20Learning%20Series%202012%20-%20Rapid%20Prototyping%20&%20Manufacturing%20Technologies.pdf
7. CHUA, C, K. F. LEONG a C. S. LIM. 2005. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. Hackensack: World Scientific, 420 s. ISBN 98-123-8120-1.
8. ZEMČÍK, Oskar. [online]. [vid 2015-04-01]. Aditivní technologie: metody Rapid Prototyping. *Odbor technologie obrábění*. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
9. Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping. [online]. 2012. [vid 2015-04-04]. *Katedra výrobních systémů*. Liberec Dostupné z: http://www.ksa.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
10. NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila. [online]. 2012. [vid 2015-04-07]. Application of Fused Deposition Modeling Technology in 3D Printing Rapid Prototyping Area. *Manufacturing and industrial engineerin*, roč. 4, č. 11. ISSN 1338-6549. Dostupné z: <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf12/4-pp-35-37.pdf>
11. SEHNÁLEK, Stanislav. [online]. 2013. [vid 2015-04-07]. 3D tiskárna na bázi projektu RepRap: 1. část. *Posterus: Portál pre odborné publikovanie*, roč. 6, č. 8. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16065>

12. Mendel. [online]. 2009. [vid 2015-04-07]. *www.reprap.org*. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:Mendel.jpg>
13. NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila a Jozef NOVAK-MARCINCIN. [online]. 2013. [vid 2015-04-09]. Testing of the ABS Materials for Application in Fused Deposition Modeling Technology. *Applied Mechanics and Materials*. roč. 309: 133-140. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.309.133. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <http://search.proquest.com.proxy.k.utb.cz/docview/1442359244>
14. HWANG, Seyeon, Edgar I. REYES, Kyoung-sik MOON, Raymond C. RUMPF a Nam Soo KIM. [online]. 2015. [vid 2015-04-09]. Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*. roč. 44, č. 3: 771-777. DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-014-3425-6>
15. RAYEGANI, Farzad a Godfrey C. ONWUBOLU. [online]. 2014. [vid 2015-04-11]. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. roč. 73, č. 1-4: 509-519. DOI: 10.1007/s00170-014-5835-2. ISSN 0268-3768. Dostupné z: http://download-v2.springer.com.proxy.k.utb.cz/static/pdf/162/art%253A10.1007%252Fs00170-014-5835-2.pdf?token2=exp=1432631338~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F162%2Fart%25253A10.1007%25252Fs00170-014-5835-2.pdf*~hmac=3b413b1cab095e571b9cc4194fd808899ad38be18539843e3e07dfe1e185276f
16. ARIVAZHAGAN, Adhiyamaan a S.H. MASOOD. [online]. 2012. [vid 2015-04-11]. Dynamic Mechanical Properties of ABS Material Processed by Fused Deposition Modelling. *International Journal of Engineering Research and Applications*. roč. 2, č. 3: 2009-2014. ISSN 2248-9622. Dostupné z: http://www.ijera.com/papers/Vol2_issue3/LZ2320092014.pdf
17. 3D tisk: metody. [online]. Květen 2013. [vid 2015-04-15]. *www.14220.cz*. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
18. FDM material properties. [online]. [vid 2015-04-15]. *www.materialise.cz*. Dostupné z: http://www.materialise.cz/sites/default/files/public/AMS/datasheets_e_fdm.pdf
19. BUDZIK, Grzegorz. [online]. 2011. [vid 2015-04-05]. The Use of the Rapid Prototyping Method for the Manufacture and Examination of Gear Wheels. *Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering, Dr. M. Hoque (Ed.)*, InTech. DOI: 10.5772/22848. ISBN 978-953-307-698-0. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advanced-applications-of-rapid-prototyping-technology-in-modern-engineering/the-use-of-the-rapid-prototyping-method-for-the-manufacture-and-examination-of-gear-wheels>
20. HUMÁR, Anton. [online]. 2004. [vid 2015-04-28]. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část*. Brno. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf

21. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. 2009. *Základy konstruování*. Vyd. 3., upr. a dopl. Brno: CERM, 234 s. ISBN 978-80-7204-633-1.
22. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. 2009. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 3. Brno: CERM, 223 s. ISBN 978-80-7204-636-2.
23. ZEMČÍK, Oskar. [online]. 2011. [vid 2015-05-07]. ZemcikO hot end. www.reprap.org. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/ZemcikO_hot_end
24. ZEMČÍK, Oskar. [online]. [vid 2015-05-07]. ZemcikO AL table. www.reprap.org. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/ZemcikO_AL_table
25. ERTACETAL® [POM] Polyoximetylen. [online]. [vid 2015-05-20]. www.eppplasty.cz. EPP Plasty a.s., 2012. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/ertacetal.php>
26. ERTACETAL H: POLYOXIMETYLEN (POM-H). [online]. [vid 2015-05-20]. www.eppplasty.cz. Dostupné z: http://www.eppplasty.cz/pdf/POM_H.pdf
27. Ultem* 9085. [online]. [vid 2015-05-20]. www.evektor.cz. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/sites/default/files/pdf/ms-ultem9085-fortus.pdf>
28. LOUCKÝ, Milan. [online]. *Kolik stojí 3D tisk?* Březen 2015. [vid 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.caxmix.cz/2015/03/20/kolik-stoji-3d-tisk/>
29. Ceník služeb. KNOBLOCH, Peter. [Www.3dtiskarna.cz](http://www.3dtiskarna.cz): *Rapid Prototyping* [online]. 2010. Dostupné z: <http://www.3dtiskarna.cz/cenik-sluzeb/>
30. ŠRITR, Jan. *Ozubené převody* [online]. SPŠ Nové Město nad Metují, 2011. Dostupné z: <http://dum.spsnome.cz/2011/tp/sr/sr-tp-sps-03-02-Ozubene-prevody.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	Trojrozměrný
ABS	[-]	Akrylonitril butadien styren
CAD	[-]	Computer aided design
CNC	[-]	Computer numeric control
DPH	[-]	Daň z přidané hodnoty
FDM	[-]	Fused deposition modeling
FFF	[-]	Fuse filament fabrication
ISO	[-]	International Organization for Standardization
PC	[-]	Polykarbonát
PET	[-]	Polyetylen
PLA	[-]	Polylactic acid
PVA	[-]	Polyvinylalkohol
REPRAP	[-]	Replicating Rapid-Prototyper
RP	[-]	Rapid Prototyping
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
STL	[-]	Stereolitografie
USB	[-]	Universal serial bus
Wi-Fi	[-]	Wireless Fidelity

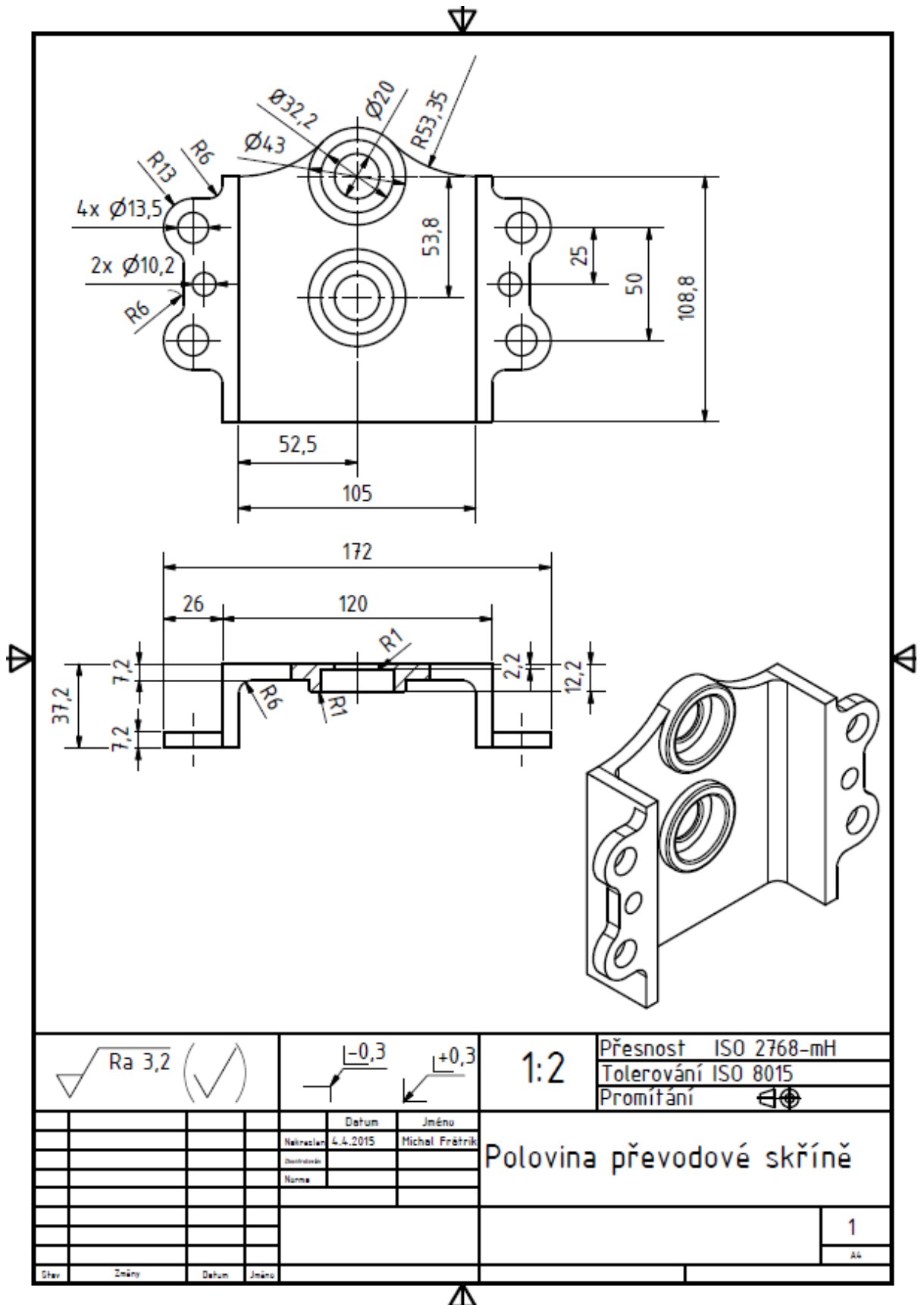
Sybmol	Jednotka	Popis
B_L	[mm]	Šířka ložiska
D_L	[mm]	Vnější průměr ložiska
F_o	[Nm]	Obvodová síla
M_k	[Nm]	Krouticí moment
N_k	[Kč]	Náklady na tisk kola
N_p	[Kč]	Náklady na tisk pastorku
T_t	[°C]	Teplota tavení materiálu

V_k	[cm ³]	Objem vytištěného kola
V_p	[cm ³]	Objem vytištěného pastorku
V_{s1,2}	[cm ³]	Objem první či druhé poloviny převodové skříně
a	[mm]	Osová vzdálenost
b	[mm]	Šířka ozubení
c	[Kč.cm ⁻³]	Cena za objem materiálu
d	[mm]	Průměr roztečné kružnice
d_a	[mm]	Průměr hlavové kružnice
d_b	[mm]	Průměr základní kružnice
d_f	[mm]	Průměr patní kružnice
d_L	[mm]	Vnitřní průměr ložiska
h	[mm]	Výška zubu
h_a	[mm]	Výška hlavy zubu
h_f	[mm]	Výška paty zubu
i	[-]	Převodový poměr
m, m_t	[-]	Modul, tečný modul
m_p, m_k	[g]	Hmotnost pastorku, hmotnost kola
n	[ot.s ⁻¹]	Otáčky
p	[mm]	Rozteč zubů
v_c	[m.s ⁻¹]	Řezná rychlost
v_f	[m.s ⁻¹]	Posuvová rychlost
x	[-]	Jednotkové posunutí
z	[-]	Počet zubů ozubených kol
α	[°]	Úhel profilu zubů
β	[°]	Úhel sklonu zubů
η	[°]	Úhel natočení frézy
π	[-]	Konstanta
ω	[°]	Úhel stoupání šroubovice frézy

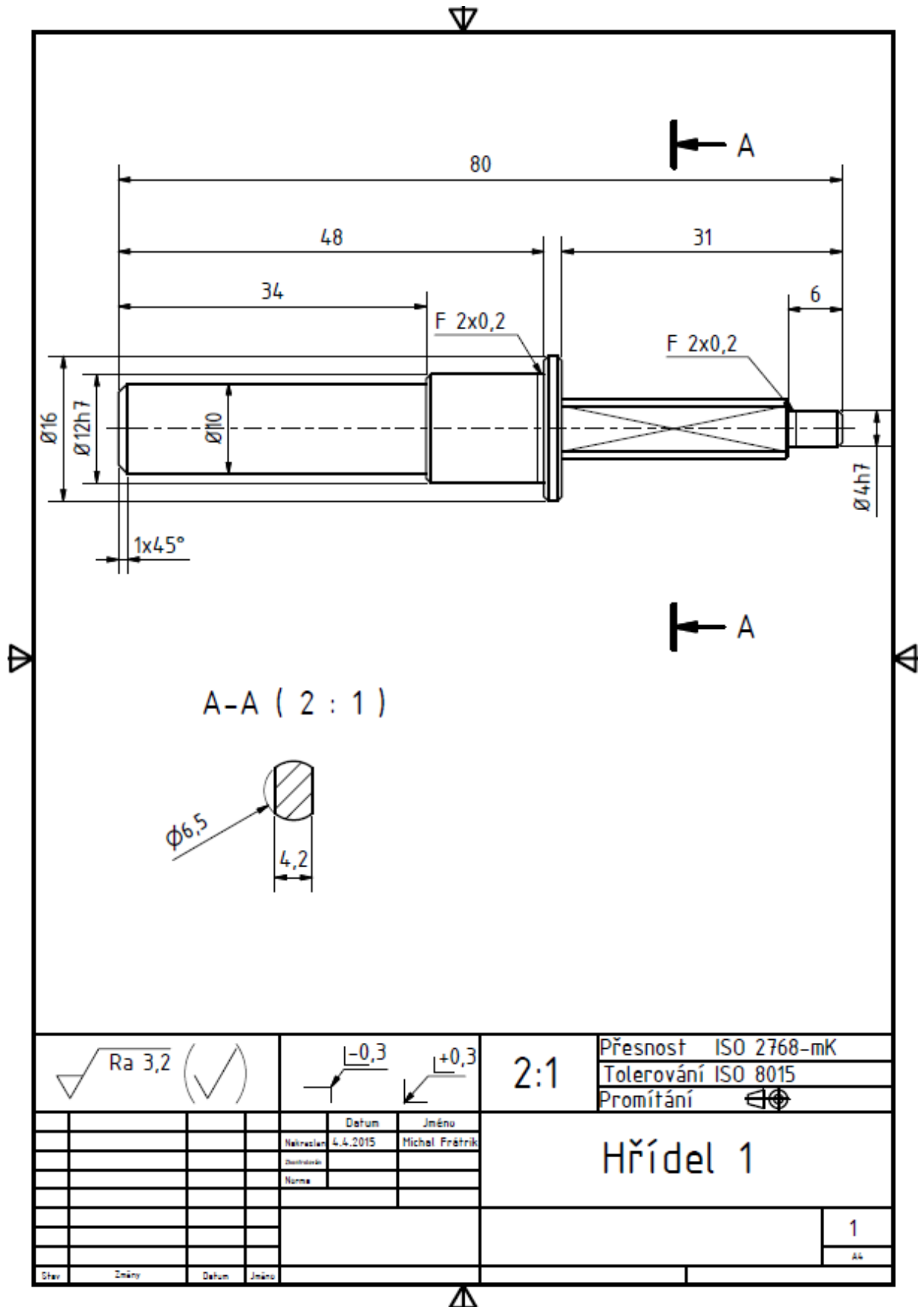
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres pastorku
Příloha 2	Výkres kola
Příloha 3	Výkres poloviny převodové skříně
Příloha 4	Výkres vstupní hřídele
Příloha 5	Výkres druhé hřídele
Příloha 6	Výkres výstupní hřídele
Příloha 7	Cenová nabídka pastorku
Příloha 8	Cenová nabídka kola

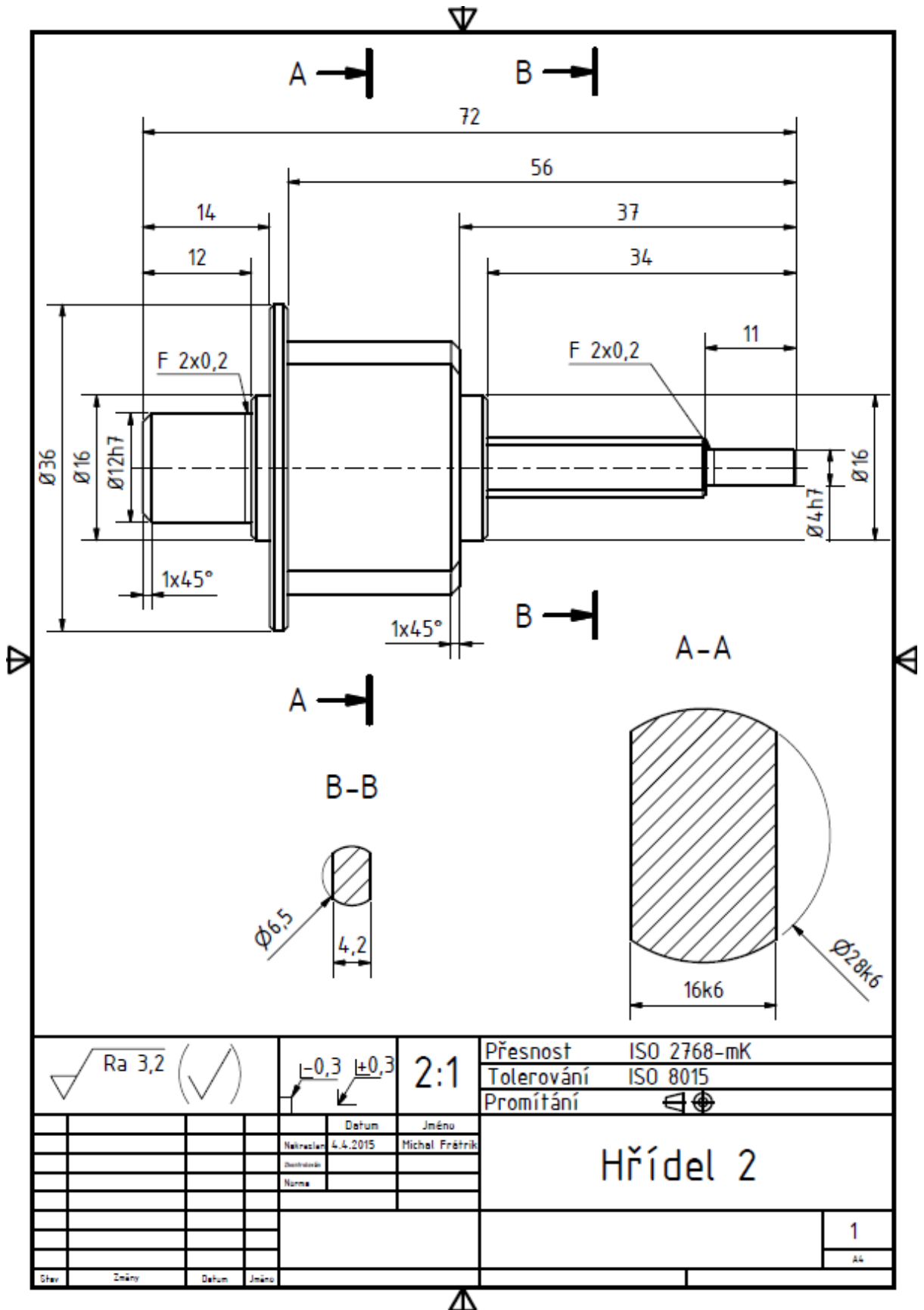
PŘÍLOHA 3 – VÝKRES POLOVINY PŘEVODOVÉ SKŘÍNĚ



PŘÍLOHA 4 – VÝKRES VSTUPNÍ HŘÍDELE

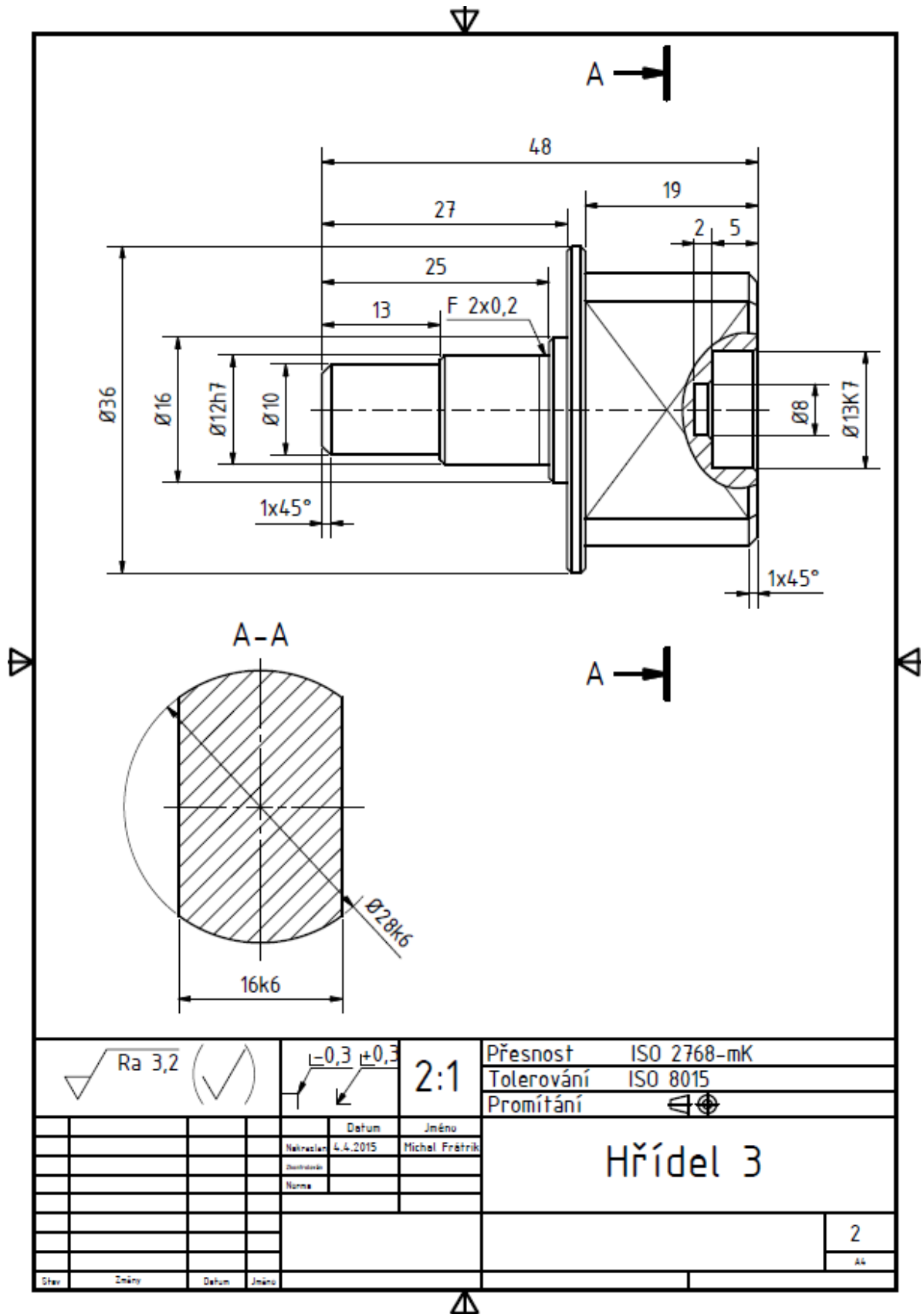


PŘÍLOHA 5 – VÝKRES DRUHÉ HŘÍDELE



				2:1		Přesnost ISO 2768-mK	
						Tolerování ISO 8015	
						Promítání	
		Datum 4.4.2015		Jméno Michal Fratrik		<h2>Hřídel 2</h2>	
						1	
						Ak	
Star	Změny	Datum	Jméno				

PŘÍLOHA 6 – VÝKRES VÝSTUPNÍ HŘÍDELE



PŘÍLOHA 7 – CENOVÁ NABÍDKA PASTORKU

Rychlá cenová nabídka								
Součást:	Pastorek č.v.VUT-Malé kolo							
Počet kusů:	1							
Materiál:	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	20	27	3,5	Kč/ks	0,01	kg/ks	
Operace	Čas přípravy min		Čas strojní min		Cena Kč			
Řezat	10		0,3		72,1			
Soustružit - konvenční(odhad)	20		12		224			
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S640D					0			
Obrážet drážku					0			
Vrtat, závity, frézovat,drážky-NC	60		6		792			
Ozubení	60		3		441			
Začištění			0,5		3,5			
Brus díra					0			
Brus kulato					0			
Brus plocho					0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)					0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7					0			
Broušení ozubení Niles tř.5					0			
Broušení ozubení Niles tř.4					0			
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování			Cca hmotnost Kg		Cena Kč			
Zušlechťení					0			
Kalení					0			
Nitridace					0			
Černění					0			
Zinek					0			
Cena za 1 ks bez DPH				1536		Kč		
Cena za 1 ks bez DPH				56,48		EUR		


BONDY S.R.O.
 ING. RADOŠLAV ČIKÁNEK
 MOBIL: 731 507 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

Rychlá cenová nabídka								
Součást:	Pastorek č.v.VUT-Malé kolo							
Počet kusů:	50							
Materiál:	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	20		27	3,5	Kč/ks	0,01	kg/ks
Operace	Čas přípravy min		Čas strojní min		Cena Kč			
Řezat	10		0,3		175			
Soustružit - konvenční(odhad)					0			
Soustružit CNC-čas die Shopturn S840D	60		1,09		1374			
Obrážet drážku					0			
Vrtat, závity, frézovat,drážky-NC	60		6		4320			
Ozubení	60		3		1470			
Začištění			0,5		175			
Brus díra					0			
Brus kulato					0			
Brus plocho					0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)					0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7					0			
Broušení ozubení Niles tř.5					0			
Broušení ozubení Niles tř.4					0			
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování			Cca hmotnost Kg		Cena Kč			
Zušlechťení					0			
Kalení					0			
Nitridace					0			
Čemění					0			
Zinek					0			
Cena za 1 ks bez DPH					154	Kč		
Cena za 1 ks bez DPH					5,65	EUR		

BONDY S.R.O.
 Ing. Radoslav ČIKÁNEK
 MOBIL: 731 507 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

Rychlá cenová nabídka								
Součást:	Pastorek č.v.VUT-Malé kolo							
Počet kusů:	100							
Materiál:	Polotovary				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	20		27	3,5	Kč/ks	0,01	kg/ks
Operace	Čas přípravy min	Čas strojní min	Cena Kč					
Rezat	10	0,3	280					
Soustružit - konvenční(odhad)			0					
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D	60	1,09	2028					
Obrážet drážku			0					
Vrtat, závity, frézovat,drážky-NC	60	6	7920					
Ozubení	60	3	2520					
Začištění		0,5	350					
Brus díra			0					
Brus kulato			0					
Brus plocho			0					
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)			0					
Broušení ozubení Niles tř.6-7			0					
Broušení ozubení Niles tř.5			0					
Broušení ozubení Niles tř.4			0					
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování		Cca hmotnost Kg		Cena Kč				
Zušlechťení			0					
Kalení			0					
Nitridace			0					
Černění			0					
Zinek			0					
Cena za 1 ks bez DPH				135	Kč			
Cena za 1 ks bez DPH				4,95	EUR			

BONDY S.R.O.
 Ing. RABOSLAV ČIKANĚK
 MOBIL: 731 507 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

PŘÍLOHA 8 – CENOVÁ NABÍDKA KOLA

Rychlá cenová nabídka								
Součást:	Pastorek č.v.VUT-Velké kolo							
Počet kusů:	1							
Materiál:	Polotovary				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	100		24	78,3	Kč/ks	0,26	kg/ks
Operace	Čas přípravy min		Čas strojní min		Cena Kč			
Řezat	10		1,5		80,5			
Soustružit - konvenční(odhad)	20		25		315			
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D					0			
Obrážet drážku					0			
Vrtat, závit, frézovat, drážky-NC	60		8		816			
Ozubení	60		21		567			
Začištění			7		49			
Brus díra					0			
Brus kulato					0			
Brus plocho					0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)					0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7					0			
Broušení ozubení Niles tř.5					0			
Broušení ozubení Niles tř.4					0			
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování			Cca hmotnost Kg		Cena Kč			
Zušlechťení					0			
Kalení					0			
Nitridace					0			
Černění					0			
Zinek					0			
Cena za 1 ks bez DPH					1906		Kč	
Cena za 1 ks bez DPH					70,07		EUR	

BONDY S.R.O.
 ING. RADOSLAV ČIKÁNEK
 MOBIL: 731 587 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

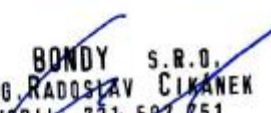
Rychlá cenová nabídka

Součást:	Pastorek č.v.VUT-Velké kolo							
Počet kusů:	50							
Materiál:	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	100		24	78,3	Kč/ks	0,26	kg/ks

Operace	Čas přípravy min	Čas strojní min	Cena Kč
Řezat	10	1,5	595
Soustružit - konvenční(odhad)			0
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D	60	5,38	3948
Obrážet drážku			0
Vrtat, závity, frézovat,drážky-NC	60	8	5520
Ozubení	60	21	7770
Začištění		7	2450
Brus díra			0
Brus kulato			0
Brus plocho			0
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)			0
Broušení ozubení Niles tř.6-7			0
Broušení ozubení Niles tř.5			0
Broušení ozubení Niles tř.4			0
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování		Cca hmotnost Kg	Cena Kč
Zušlechťení			0
Kalení			0
Nitridace			0
Černění			0
Zinek			0
Cena za 1 ks bez DPH		484	Kč
Cena za 1 ks bez DPH		17,79	EUR

BONDY S.R.O.
 ING. RADOŠLAV ČIKANĚK
 MOBIL: 731 507 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

Rychlá cenová nabídka								
Součást:	Pastorek č.v.VUT-Velké kolo							
Počet kusů:	100							
Materiál:	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	100		24	78,3	Kč/ks	0,26	kg/ks
Operace	Čas přípravy min		Čas strojní min		Cena Kč			
Řezat	10		1,5		1120			
Soustružit - konvenční(odhad)					0			
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D	60		5,38		7178			
Obrážet drážku					0			
Vrtat, závity, frézovat,drážky-NC	60		8		10320			
Ozubení	60		21		15120			
Začistění			7		4900			
Brus díra					0			
Brus kulato					0			
Brus plocho					0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)					0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7					0			
Broušení ozubení Niles tř.5					0			
Broušení ozubení Niles tř.4					0			
Tépelné a chemicko-tepelné zpracování					Cca hmotnost Kg		Cena Kč	
Zušlechťení					0			
Kalení					0			
Nitridace					0			
Černění					0			
Zinek					0			
Cena za 1 ks bez DPH					465		Kč	
Cena za 1 ks bez DPH					17,08		EUR	


BONDY S.R.O.
 ING. RADOŠLAV ČIKANĚK
 MOBIL: 731 587 751
 MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ