



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Výroba náhradního ozubeného kola metodou RP

Production of replacement cogwheel using RP methods

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

David SVĚTLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Světlík

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 náhradního ozubeného kola metodou RP

v anglickém jazyce:

Production of replacement cogwheel using RP methods

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše problematiky kusové výroby a návrhu zvoleného ozubeného kola. Rešerše problematiky FDM 3D tisku se zaměřením na výrobu zvoleného dílu. Rozbor a návrh vhodného materiálu. Návrh 3D modelu. Zhodnocení technologičnosti konstrukce modelu a výroba funkčního modelu 3d kola. Technicko ekonomické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh náhradního ozubeného kola
- výroba náhradního ozubeného kola
- technicko-ekonomické zhodnocení
- doporučení do budoucna

Seznam odborné literatury:

1. CHOI, S.H. a S. SAMAVEDAM. Modelling and otimisation of Rapid Prototyping. Computers in industry. č. 47, s. 39-53. ISSN 166-3615.
2. CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
3. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
4. PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
5. ZEMČÍK, Oskar a Jan DVORÁČEK. A Distribution of Temperature Field in the FDM Printhead. In: NEWTECH 2011: The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering. Brno: Litera, 2011, s. 115-119. ISBN 978-80-214-4267-2.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 13.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje problematice výroby náhradního ozubeného kola pomocí technologie Fused Deposition Modeling, srovnáním vyrobeného kusu metodou FDM s kusem vyrobeným konvenčními technologiemi a jejich ekonomickým zhodnocením. Model součástky, který je vytvořen za pomoci softwaru Autodesk Inventor, je vymodelován dle reálné předlohy převodovky kuchyňského mixéru. Model byl vytisknut v tiskárně standartu REPRAP.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, ABS, 3D tisk, REPRAP

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with problems of spare cogwheel production using Fused Deposition Modeling technology, compares produced part by FDM technology with part produced by conventional technologies and economical comparison of those technologies. Model, which is made using Autodesk Inventor, is created according to real gearbox of electric whisk. Spare cogwheel was printed in printer of REPRAP standard.

Key words

Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, ABS, 3D print, REPRAP

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVĚTLÍK, David. *Výroba náhradního ozubeného kola metodou RP*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 39 s. 4 přílohy. Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

Datum

David Světlík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, PhD. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce, firmě paní Ireny Tichákové za zapůjčení zařízení pro zhotovení ozubených kol konvenčními technologiemi a za odhad výrobních nákladů a Karlu Matouškovi za fundovanou odbornou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat rodině a mým blízkým za podporu během studia.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD..... | 8 |
| 1 POPIS VYRÁBĚNÉ SOUČÁSTI..... | 9 |
| 1.1 Technologičnost součástky | 9 |
| 2 POUŽITÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE | 10 |
| 2.1 Technologie FDM..... | 10 |
| 2.1.1 Materiály používané technologií FDM a jejich vlastnosti | 11 |
| 2.2 Konvenční technologie | 12 |
| 2.2.1 Soustružení | 12 |
| 2.2.2 Odvalovací frézování | 13 |
| 3 NÁVRH MODELU SOUČÁSTI | 15 |
| 3.1 Návrh ozubeného kola | 15 |
| 3.2 Tvorba modelu součásti | 15 |
| 4 VÝROBA FUNKČNÍHO NÁHRADNÍHO DÍLU | 17 |
| 4.1 Výroba metodou FDM..... | 17 |
| 4.1.1 CAM processing | 17 |
| 4.1.2 Parametry tisku | 18 |
| 4.2 Optimalizace modelu součásti..... | 20 |
| 4.3 Výroba konvenčními technologiemi..... | 21 |
| 4.3.1 Materiály použité konvenčními technologiemi a jejich vlastnosti | 23 |
| 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ | 24 |
| 5.1 Technické zhodnocení | 24 |
| 5.2 Ekonomické zhodnocení | 26 |
| ZÁVĚR..... | 29 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 30 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 32 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 33 |

ÚVOD

V současném trendu, jak ve strojírenství, tak i v ostatních průmyslových odvětvích, se čím dál více bere ohled na schopnost dodavatele vyřešit zakázku rychle, kvalitně a levně. S rozvojem Computer Aided Drawing (CAD) systémů operujících ve 3D, s možnostmi vytvářet tvarově složité součásti, se taktéž rozvíjejí technologie, které těchto možností při výrobě výrobku využívají¹.

Jednou z těchto technologií je Rapid Prototyping, která je relativně mladá. Nyní tento název sdružuje více technologií, pracujících na různých principech (postupné nanášení roztaveného materiálu po vrstvách, spékání kovového prášku, vytvrzování materiálu UV lampou či laserem apod.) s různými materiály (fotopolymer, nylon, polyamid, ABS, kovové prášky apod.). První stroje, využívající této technologie, byly uvedeny na trh na konci osmdesátých let minulého století. V té době byla tato technologie především využívána k rychlé tvorbě modelů a prototypových částí, použitelných k ověření výrobitelnosti, smontovatelnosti v sestavách či nalezení chyb v koncepci. S postupem času a vývojem technologií spadajících do kategorie RP, jsou tyto technologie využívány i pro produkci finálních výrobků pro širokou oblast použití^{1, 2, 3}.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem náhradního ozubeného kola pro převodovku kuchyňského mixéru, jeho výrobou pomocí technologie Fused Deposition Modeling (FDM), výrobou ozubených kol konvenčními technologiemi a jejich srovnáním jak po technické tak i ekonomické stránce.

1 POPIS VYRÁBĚNÉ SOUČÁSTI

Vyráběnou součástí je náhradní šikmé ozubené kolo, sloužící k přenosu krouticího momentu z hlavní hřídele, osazené šnekovým ozubením, vedoucí od elektromotoru na hřídele, které slouží k upevnění metel mixéru. Součást je zobrazena na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Reálná předloha vyráběné součástky.

1.1 Technologičnost součástky

Vyráběná součást je ozubené čelní kolo se šikmými zuby. Na těle ozubeného kola se nachází otvor, kterým je dané kolo nalisováno na osazenou hřídel. Součást je vyrobitelná dostupnými konvenčními technologiemi.

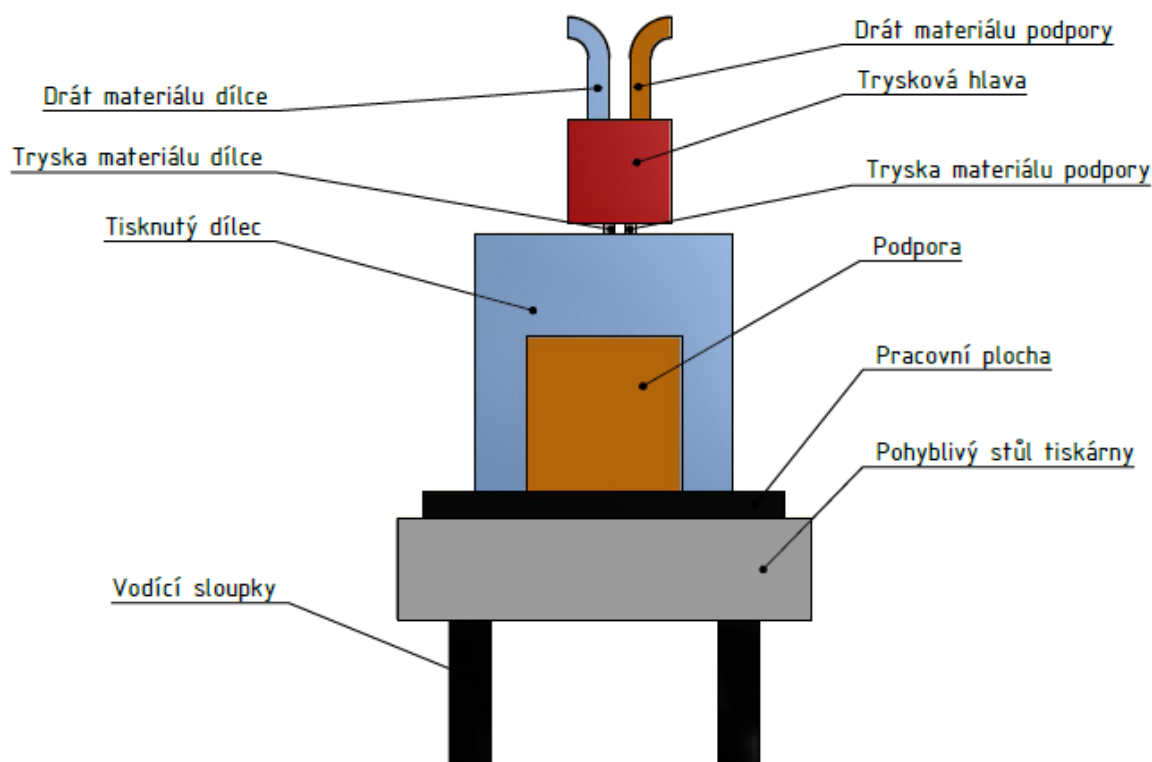
Vzhledem k funkci součásti ji není vhodné zaměňovat za součást s jiným typem ozubení.

2 POUŽITÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Pro výrobu náhradního ozubeného kola byla zvolena technologie FDM, vzhledem k její dostupnosti a finanční nenáročnosti provozu. Z konvenčních technologií pro výrobu náhradního dílu bylo zvoleno odvalovací frézování a soustružení.

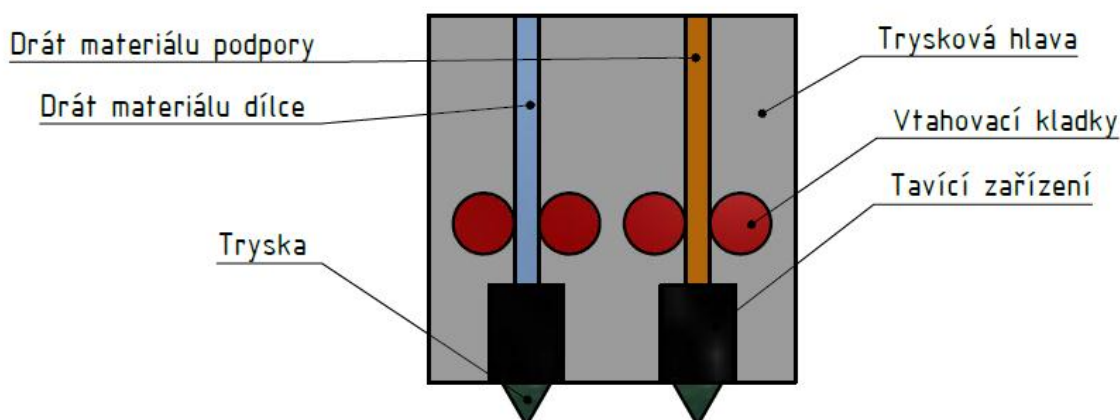
2.1 Technologie FDM

Principem technologie FDM (obr. 2.1) je nanášení roztaveného vlákna materiálu na pracovní plochu nebo na předchozí vrstvu tištěného modelu. Základním polotovarem pro tisk je jakýkoli termoplast v podobě navinutého drátu na cívce⁴.



Obr. 2.1 Princip technologie FDM a popis součástí tiskárny⁵.

Tento materiál je vtahován pomocí kladek do trykové hlavy (obr. 2.2), která tento materiál zahřívá lehce nad jeho teplotu tavení. Ihned po nanesení začíná roztavený plast tuhnout. Jakmile je dokončena vrstva v rovině XY, tak tiskárna posune pracovní plochu níže o hodnotu kroku ve směru osy Z. Tento cyklus se opakuje do té doby, než je model kompletně vytištěn. Jednotlivé vrstvy modelu jsou získány z 3D modelu tištěné součásti, který je ve specializovaném softwaru rozřezán, a z těchto řezů jsou následně vytvořeny dráhy pro trykovou hlavu⁵.

Obr 2.2 Trysková hlava⁶.

2.1.1 Materiály používané technologií FDM a jejich vlastnosti

Technologie FDM používá materiály ze skupiny termoplastů a vosky. Mezi používané termoplasty se řadí ABS a jeho deriváty, polykarbonát (PC) a jeho deriváty, polyfenylsulfon (PPSF/PPSU) a také materiál označovaný jako ULTEM 9085^{1,7,8}.

ABS je tvrdý a levný termoplast s vysokou rázovou pevností, který je jednoduše obrobitelný, ale za venkovních podmínek jeho vlastnosti degradují. Při použití ABS pro FDM ztrácí minimálně 20% svých mechanických vlastností. Mezi deriváty ABS se řadí například ABSplus, který vykazuje větší stálost, co se týká deformací, smršťování či absorpce vlhkosti. Dále ABS-M30, který je o 25-70% pevnější než ABS a ABS-M30i, který je navíc biokompatibilní a sterilizovatelný gama radiací nebo etylenoxidem^{7,8,9,10}.

PC je pevný, houževnatý a proti opotřebení odolný termoplast. Svou odolností proti tečení za vysokých teplot patří mezi nejlepší z termoplastů. Jedním z derivátů PC je sloučenina PC-ABS. Kombinuje pevnost PC a pružnost ABS, čímž získává vynikající mechanické vlastnosti. Dalším derivátem je PC-ISO, který je oproti samotnému PC biokompatibilní a sterilizovatelný stejnými procesy jako ABS-M30i^{7,8,10,11}.

PPSF/PPSU je houževnatý a nárazu odolný materiál. Z materiálů používaných pro technologii FDM má nejvyšší teplotní a chemickou odolnost. Je možné jej sterilizovat jak zářením a etylenoxidem, tak i párou, plasmou či chemicky^{8,12,13}.

ULTEM 9085 je pevný a lehký materiál primárně vyvinutý pro vesmírný průmysl. Z uvedených materiálů má nejpříznivější poměr pevnosti k hmotnosti, navíc je samozhášecí^{7,8}.

Vlastnosti těchto materiálů jsou srovnány v tab. 2.1 a tab. 2.2. Uvedené údaje jsou orientační, ve srovnání s mechanickými vlastnostmi od jiných výrobců se tyto hodnoty mohou lišit.

Tab. 2.1 Srovnání vlastností materiálů používaných technologií FDM^{14, 15}.

| Vlastnost | ABS | ABSplus | ABS-M30(i) | PC |
|------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Mez pevnosti v tahu | 22 MPa | 36 MPa | 36 MPa | 68 MPa |
| Modul pevnosti v tahu | 1 627 MPa | 2 265 MPa | 2 413 MPa | 2 280 MPa |
| Poměrné prodloužení | 6 % | 4 % | 4 % | 4,8 % |
| Mez pevnosti v ohybu | 41 MPa | 52 MPa | 61 MPa | 104 MPa |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 834 MPa | 2 198 MPa | 2 317 MPa | 2 234 MPa |

Tab. 2.2 Srovnání vlastností materiálů používaných technologií FDM¹⁴.

| Vlastnost | PC-ABS | PC-ISO | PPSF/PPSU | ULTEM 9085 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Mez pevnosti v tahu | 41 MPa | 57 MPa | 55 MPa | 72 MPa |
| Modul pevnosti v tahu | 1 917 MPa | 998 MPa | 2 068 MPa | 2 220 MPa |
| Poměrné prodloužení | - | 4,3 % | 3 % | 5,9 % |
| Mez pevnosti v ohybu | 68 MPa | 90 MPa | 110 MPa | 115 MPa |
| Modul pevnosti v ohybu | 1 931 MPa | 2 140 MPa | 2 206 MPa | 2 507 MPa |

2.2 Konvenční technologie

Z konvenčních technologií byly použity technologie soustružení a odvalovací frézování. Soustružení bylo použito pro vrtání středového otvoru a redukci průměru polotovaru. Odvalovacím frézováním bylo následně vytvořeno ozubení.

2.2.1 Soustružení

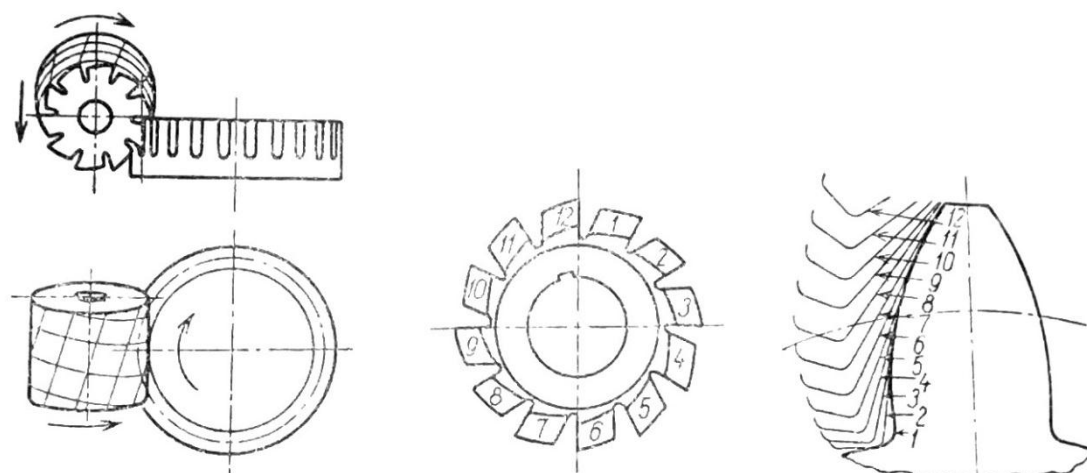
Soustružení je technologií, při které se nejčastěji obrábí polotovary kruhového průřezu. Při soustružení koná obrobek rotační pohyb, nástroj přímočarý (posuv, přísuv). Obrábí se zpravidla jednobřitým nástrojem. Soustružením provádíme operace, jakými jsou čelní/podélné soustružení, zapichování/upichování, vrtání/vyvrátávání a soustružení závitů¹⁶. Na obr. 2.3 je znázorněn soustruh použitý pro výrobu náhradního ozubeného kola.



Obr. 2.3 Univerzální soustruh (SU 28).

2.2.2 Odvalovací frézování

Odvalovací frézování je jednou z technologií, kterou lze vyrobit ozubení na obrobku. Jejím principem je, že fréza a obrobek vzájemně zabírají, a tvoří tak šroubové válcové soukolí. Břity odvalovací frézy postupně tvoří zuby hřebene. Obrobek koná rotační pohyb, nástroj koná taktéž rotační pohyb a zároveň se posouvá ve směru osy obrobku, aby obrobil celou délku ozubeného kola. Fréza a obrobek musí mít vázaný pohyb, tak že za jednu otáčku obrobku se musí fréza otočit tolikrát, kolik je na obrobku zubů^{1, 16}. Princip odvalovacího frézování je znázorněn na obr. 2.4 a použitá frézka na obr. 2.5.

Obr. 2.4 Princip odvalovacího frézování¹⁶.



Obr. 2.5 Odvalovací fréza (FO 6).

3 NÁVRH MODELU SOUČÁSTI

Model součásti byl vytvořen dle odměřených hodnot na reálné součásti. Pro potřeby výkresové dokumentace byly provedeny výpočty jednotlivých parametrů ozubeného kola.

3.1 Návrh ozubeného kola

Z naměřených hodnot na reálné součástce byly vypočteny zbývající parametry nutné pro výrobu náhradního ozubení. Z vypočtených hodnot byla vytvořena výkresová dokumentace ozubeného kola, která je uvedena v příloze č. 2. Veškeré výpočty jsou provedeny dle platných ČSN norem (ČSN 01 4607, ČSN 01 4675, ČSN 01 4676) a jsou uvedeny v příloze č. 1^{17, 18, 19}.

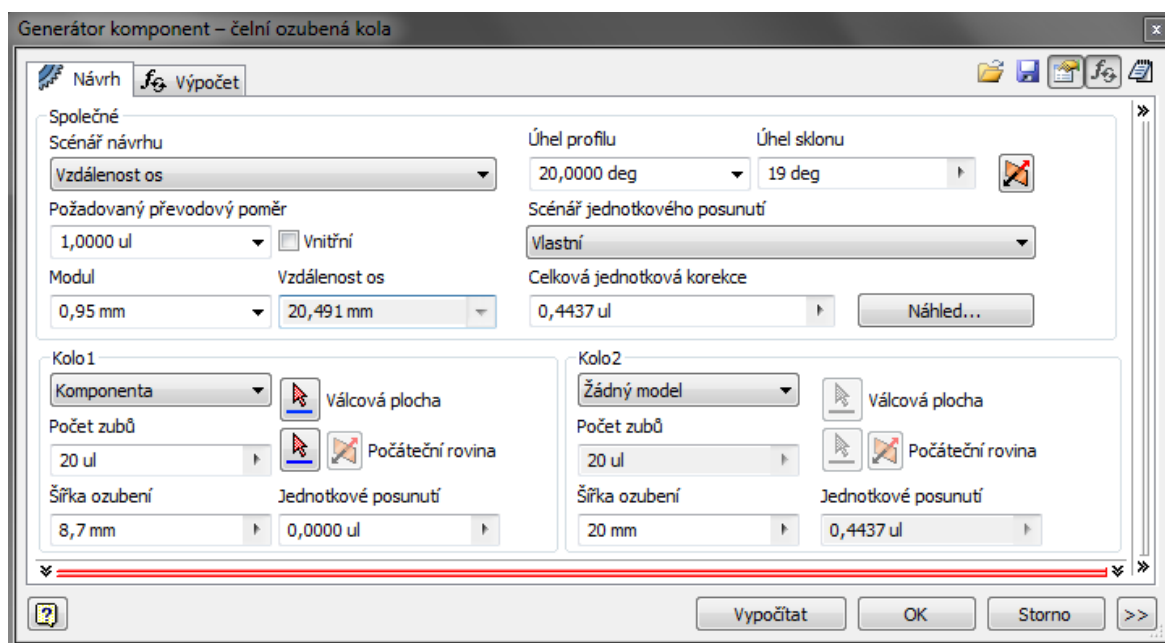
Vzhledem k dispozicím dílny bylo nutno zvolit místo vypočteného normálního modulu modul jiný, tím pádem bylo vyrobeno korigované ozubené kolo.

3.2 Tvorba modelu součásti

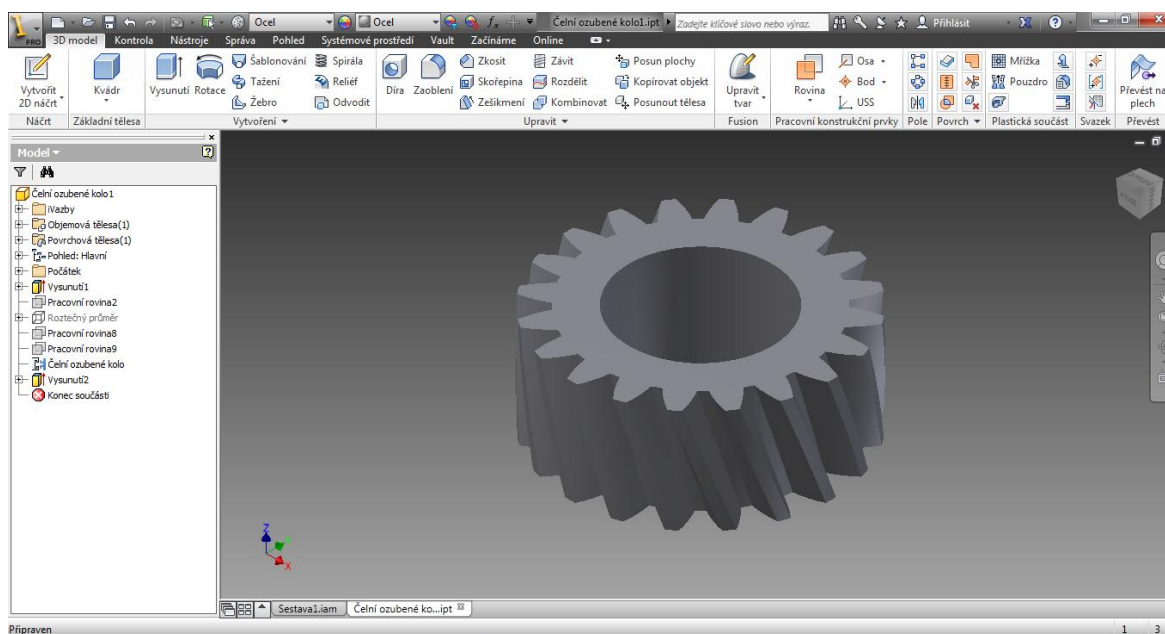
Model součásti byl vytvořen v 3D modeláři Autodesk Inventor 2013. Jednou ze součástí tohoto softwaru je aplikace pro návrh ozubených kol, která byla v tomto případě použita. Rozměry pro vytvoření modelu byly odměřeny posuvným měřidlem a dílenským úhloměrem. Z počtu zubů a modulu byla vypočtena roztečná kružnice. Naměřené a vypočtené hodnoty byly vloženy do aplikace pro návrh ozubeného kola (viz obr. 3.1). Po vygenerování ozubení byl dále vytvořen otvor uprostřed součásti (viz obr. 3.2). Následně byla součást uložena ve formátu *.stl, a tím připravena pro CAM processing. Veškeré hodnoty použité pro vytvoření modelu jsou shrnuty v tab. 3.1. Výpočet hodnoty modulu je uveden v příloze č. 1, ostatní hodnoty jsou odměřeny z reálné předlohy.

Tab. 3.1 Použité hodnoty pro tvorbu modelu.

| Parametr | Symbol | Hodnota |
|---------------|---------|---------|
| Úhel sklonu | β | 19° |
| Šířka ozubení | V | 8,7 mm |
| Počet zubů | z | 20 |
| Modul | m_n | 0,95 |



Obr. 3.1 Aplikace Inventoru pro návrh ozubených kol.



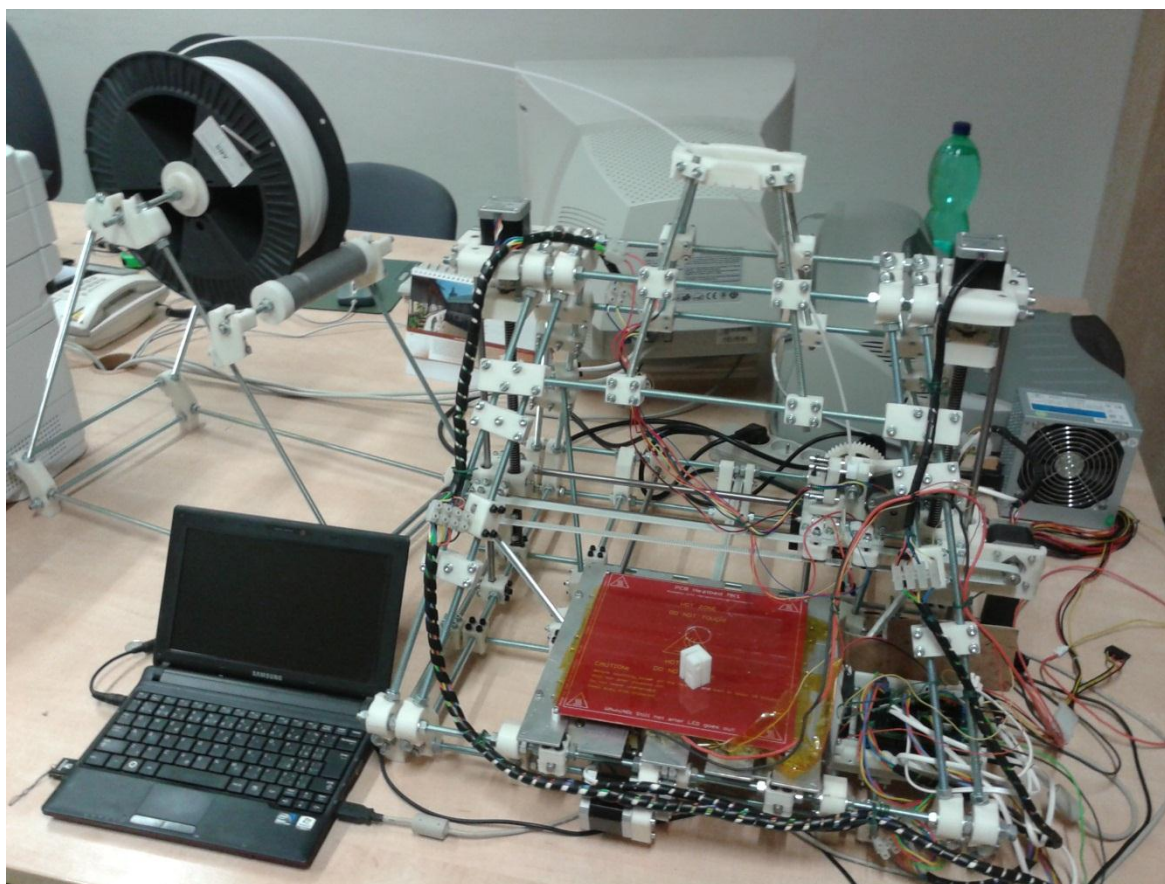
Obr. 3.2 Model ozubeného kola.

4 VÝROBA FUNKČNÍHO NÁHRADNÍHO DÍLU

Náhradní díl je vyroben dvěma způsoby a to metodou RP a konvenčními technologiemi. Pomocí RP je model vyroben z ABS plastu, pro konvenční technologie byly vybrány tři různé materiály.

4.1 Výroba metodou FDM

Po vymodelování součásti v programu Autodesk Inventor je model uložen ve formátu *.stl a tento soubor je následně exportován pro CAM processing, který na základě zvolených parametrů (krok, hustota tisku, použití podpór apod.) vytvoří zdrojový kód pro tisk modelu v 3D tiskárně standartu REPRAP (viz obr. 4.1) vyvíjenou mezinárodní komunitou.



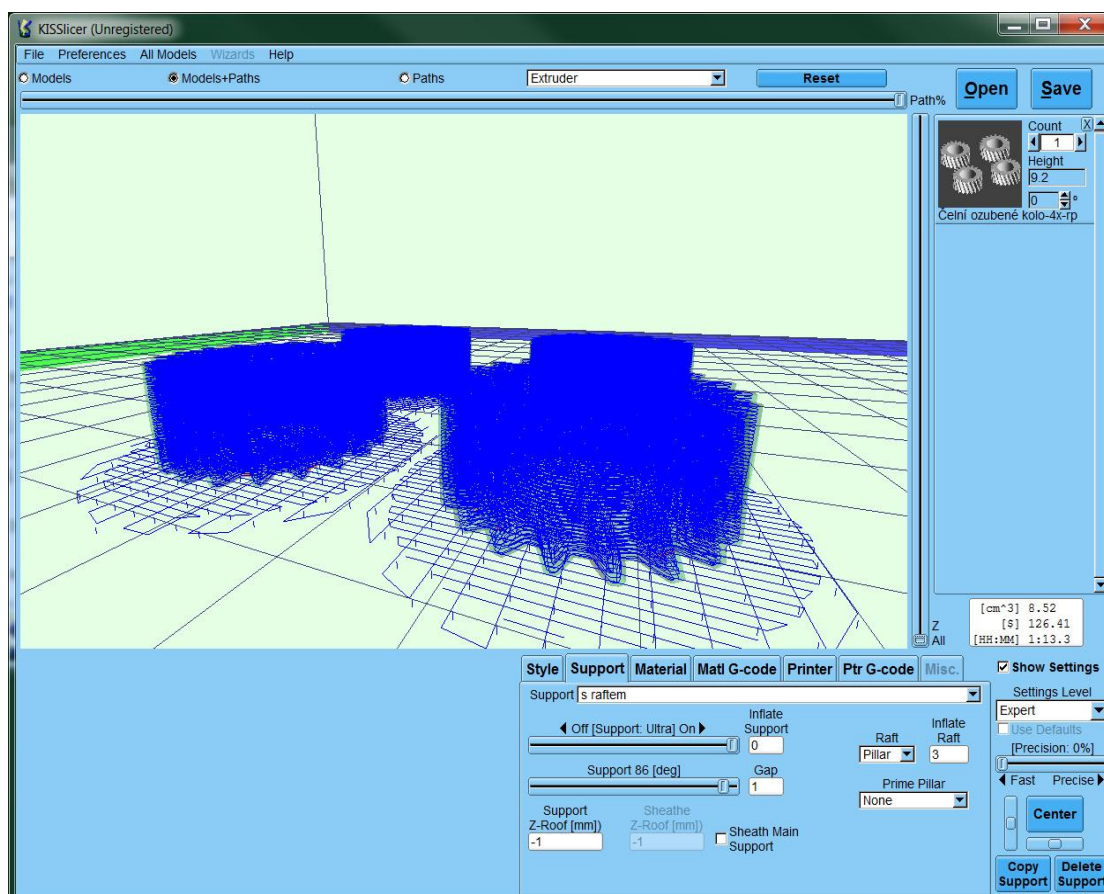
Obr. 4.1 Použitá tiskárna pro výrobu náhradního ozubeného kola.

4.1.1 CAM processing

Pro vytvoření programu pro tisk součásti v 3D tiskárně existuje řada programů, například výrobce 3D tiskáren Stratays poskytuje ke svým tiskárnám programy Insight, CatalystEX, Print Wizard. Mezi open source programy patří např. Slic3r nebo KISSlicer. Z uvedených softwarů pro vytvoření zdrojového kódu byl pro svou dostupnost vybrán program KISSlicer^{20, 21, 22, 23}.

Program KISSlicer je rychlý, uživatelsky jednoduchý program, který má v základní verzi všechny potřebné součásti pro tisk na tiskárnách s jednou tiskovou hlavou. Vstupem do programu je uzavřený objemový model součásti ve formátu *.stl a výstupem je zdrojový kód pro tisk součásti v tiskárně²⁴.

Po vložení souboru modelu do programu jsou umístěny modely pro tisk na virtuální prostor 3D tiskárny, dále jsou navoleny parametry tisku, použití podpor a hustota tisku. Na základě zadaných parametrů program rozřeže model na vrstvy vzdálené od sebe hodnotou zadaného kroku. Pro jednotlivé vrstvy vytvoří dráhy tiskové hlavy. Náhled na uživatelské prostředí programu KISSlicer je na obr. 4.2, ukázka zdrojového kódu je v příloze č. 2.



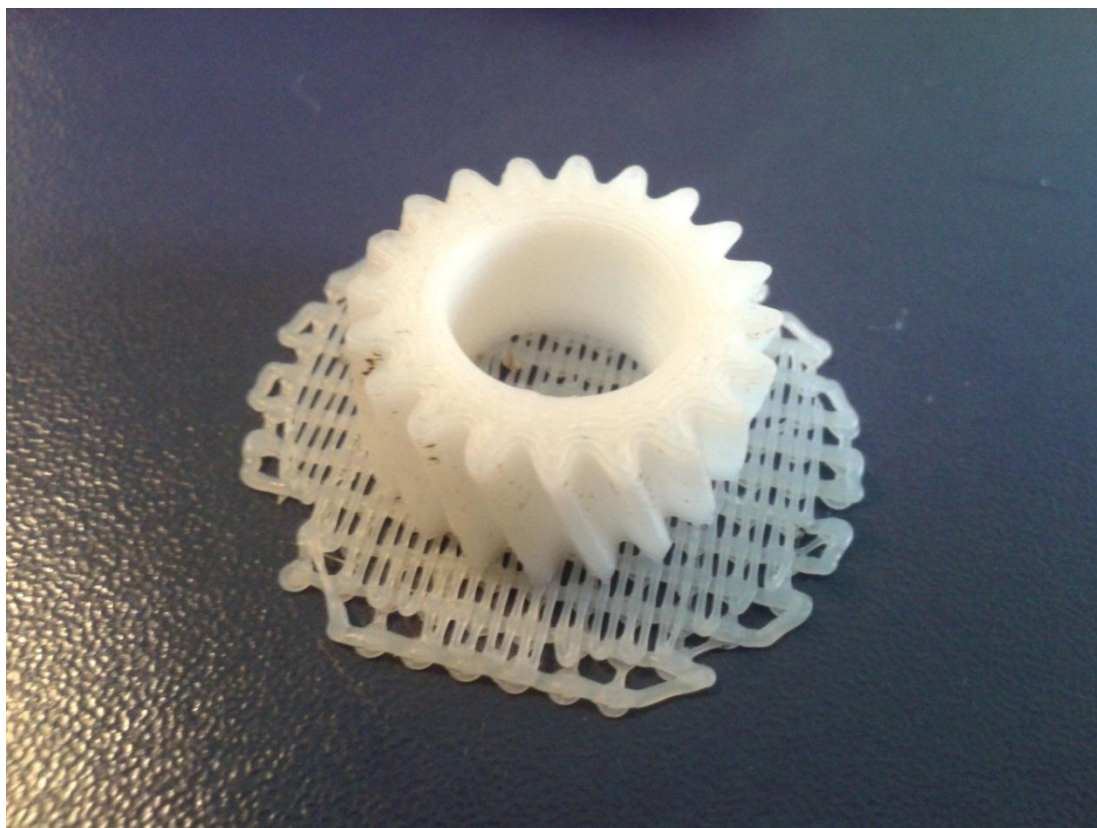
Obr. 4.2 Uživatelské prostředí programu KISSlicer.

4.1.2 Parametry tisku

Prvním parametrem, který je zadáván, je velikost kroku. Tento parametr udává, jak jsou od sebe vzdáleny dvě na sebe navazující vrstvy tištěného modelu. Čím menší krok, tím kvalitnější povrch modelu, ale zároveň delší doba tisku. Hodnoty kroku tisku je nejlépe nastavovat v intervalu (0,1-0,4) mm. Při použití menšího kroku než je v uvedeném intervalu, nastává problém s dodáváním materiálu, jelikož je nutno použít menší trysku a tím pádem se zvyšuje průtláčná síla. Při použití většího kroku nastává taktéž problém s dodáváním materiálu, jelikož se nemusí stíhat vyhřívat tryska na potřebnou teplotu a zároveň se materiál více rozlévá. V obou případech se zhoršuje výsledná kvalita tištěného modelu. Pro dané ozubené kolo byl zvolen krok 0,33 mm.

Dalším parametrem pro tisk je hustota zaplnění modelu. Pro modely s menšími nároky na mechanické vlastnosti je to parametr, se kterým se dá manipulovat k snížení nákladů a výrobního času.

Další možností, kterou je možno zvolit, je zdali bude model tisknut přímo na plochu nebo si tiskárna nejdříve vytvoří tzv. raft (model s raftem na obr 4.3). Raft je podpůrná plocha, při jejímž použití nedochází k rozliti prvních vrstev samotného modelu, a zároveň drží tištěný model větší silou na pracovní ploše tiskárny. Při tisku přímo na plochu hrozí, že první vrstva plastu se „rozlije“ mimo hranice modelu. Tento problém je možné částečně eliminovat, jak je dále zmíněno. Model tištěný přímo na plochu je na obr 4.4.



Obr. 4.3 Model tištěný na tzv. raft.



Obr. 4.4 Model tištěný přímo na plochu.

4.2 Optimalizace modelu součásti

Po vytištění zkušební dávky se na prvních vrstvách modelu objevilo rozlití vláknů mimo hranice modelu. Tento jev je možno eliminovat sražením hran modelu na straně kontaktu s pracovní plochou tiskárny, nebo částečným zvětšením výšky ozubeného kolečka a následným odbroušením rozlité vrstvy. V případě sražení hran byly hrany sraženy o hodnotu $0,4 \times 45^\circ$, při zvětšování výšky kolečka byla výška zvětšena o 0,5 mm. Po sražení hran modelu není nutno dalších úprav (viz obr. 4.5).



Obr. 4.5 Srovnání modelu se sraženými hranami a bez.

4.3 Výroba konvenčními technologiemi

Pro výrobu konvenčními technologiemi byly zvoleny polotovary distribuované společností Tribon s.r.o.²⁵. Polotovary jsou kruhové tyče o délce 1 m a průměru 25 mm. Průměr je záměrně volen o jeden stupeň výš, vzhledem k poddajnosti materiálu a nemožnosti přesného vystředění při první operaci na soustruhu. Vzhledem k dispozicím výrobní dílny byl polotovar pro frézování vyroben na míru dostupnému trnu. Po vyfrézování ozubení je polotovar rozdělen na jednotlivá ozubená kolečka s požadovanou výškou. Náhledy na operaci soustružení a frézování jsou na obr. 4.6 a obr. 4.7. Výrobní postup včetně řezných podmínek a nástrojového listu je uveden v příloze č. 3, veškeré uvedené výrobní a vedlejší časy jsou odměřeny dle skutečnosti. Vzhledem k tomu, že se jedná o výrobu první sady čtyř ozubených kol, je v operacích na soustruhu použita jedna hodnota otáček soustruhu.



Obr. 4.6 Operace vrtání na soustruhu.



Obr. 4.7 Frézování ozubení.

4.3.1 Materiály použité konvenčními technologiemi a jejich vlastnosti

Materiály pro výrobu byly vybrány s ohledem na dostupnost a finanční nenáročnost z nabídky firmy Tribon s.r.o. Z nabídky byly pro své vlastnosti a cenovou dostupnost vybrány materiály: Polyamid 6 (PA 6), Ertacetal C (POM C) a PE-1000 (Tivar)²⁵.

Polyamid 6 je materiál s vysokou mechanickou pevností, tuhostí, tvrdostí a houževnatostí, dobře odolává únavě, má mechanickou tlumící schopnost, dobré kluzné vlastnosti a vynikající odolnost proti opotřebení²⁶.

Ertacetal C je materiál s vysokou mechanickou pevností, tuhostí a tvrdostí, dobrou odolností proti tečení za vysokých teplot, vysokou rázovou pevností i za nízkých teplot, dobrými kluznými vlastnostmi, odolností proti opotřebení a je fyziologicky inertní (vhodný pro styk s potravinami)²⁷.

Tivar (PE-1000) vyniká odolností proti opotřebení a otěru, vysokou rázovou pevností i při nízkých teplotách, nízkým koeficientem tření, je samomazný a taktéž fyziologicky inertní. Na druhou stranu má nižší mechanickou pevnost, tuhost a odolnost proti tečení za vysokých teplot v porovnání s předchozími materiály^{28, 29}.

Základní mechanické vlastnosti těchto materiálů jsou srovnány v tab. 4.1. Uvedené údaje jsou orientační, ve srovnání s mechanickými vlastnostmi od jiných výrobců se tyto hodnoty mohou lišit.

Tab. 4.1 Mechanické vlastnosti použitých materiálů^{30, 31, 32}.

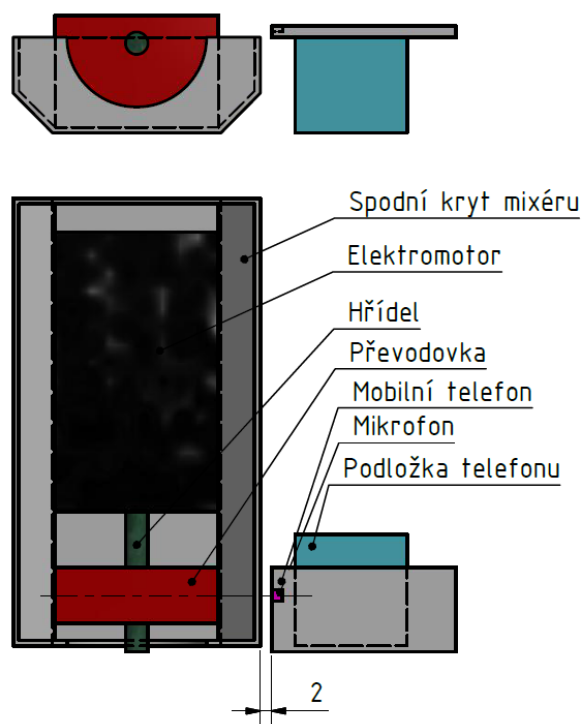
| Vlastnost | Polyamid 6 | Ertacetal C | Tivar |
|------------------------|------------|-------------|---------|
| Mez pevnosti v tahu | 80 MPa | 66 MPa | 19 MPa |
| Modul pružnosti v tahu | 1 425 MPa | 2 800 MPa | 750 MPa |
| Poměrné prodloužení | 4 % | 20 % | 15 % |

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Náhradní ozubená kola jsou porovnána třemi způsoby, a to srovnáním intenzity hluku za provozu mixéru, časovou náročností výroby zkušební série a srovnáním ceny jednoho kusu v různých výrobních sériích.

5.1 Technické zhodnocení

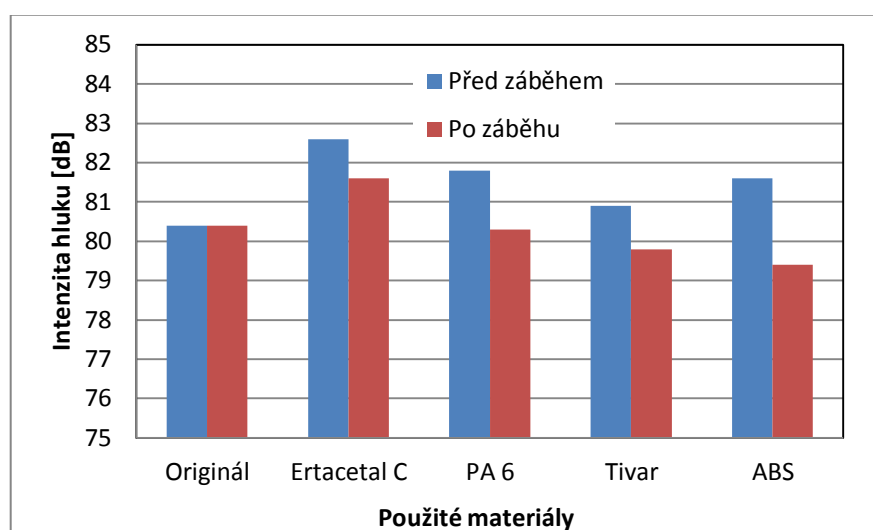
Principem technického zhodnocení je srovnání intenzity hluku náhradních ozubených kol z jednotlivých materiálů. Hodnoty intenzity hluku byly získány mobilním telefonem použitím aplikace Noise Meter, která je dostupná zadarmo ze serveru Google Play. První hodnota hluku je změřena při prvním běhu náhradního ozubeného kola, druhá hodnota je změřena po 10 minutách záběhu. Pro zjednodušení manipulace a výměny náhradních ozubených kol je hluk měřen bez horního krytu. Hodnota intenzity hluku s krytem je o 1 dB menší. Způsob měření je znázorněn na obr. 5.1, výsledky měření vypsány v tab. 5.1 a shrnuty na obr. 5.2.



Obr. 5.1 Způsob měření intenzity hluku.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty intenzity hluku různých materiálů.

| Materiál | Před záběhem [dB] | Po záběhu [dB] |
|-------------|-------------------|----------------|
| Originál | 80,4 | 80,4 |
| Ertacetal C | 82,6 | 81,6 |
| PA 6 | 81,8 | 80,3 |
| Tivar | 80,9 | 79,8 |
| ABS | 81,6 | 79,4 |

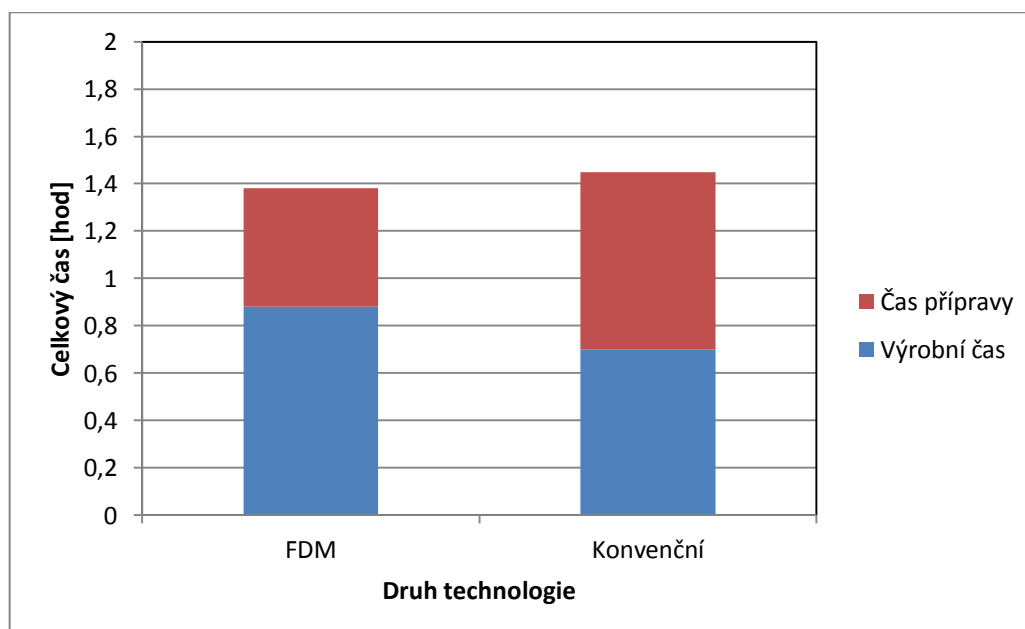


Obr. 5.2 Srovnání intenzity hluku.

Srovnání časové náročnosti je založeno na srovnání času potřebného k vyrobění čtyř kusů použitými technologiemi. Časy, které jsou uvedeny v tab. 5.2 jsou odměřeny dle skutečnosti a srovnány na obr. 5.3.

Tab. 5.2 Srovnání časové náročnosti.

| | FDM | Konvenční |
|-----------------|------|-----------|
| Celkový čas | 1,38 | 1,45 |
| z toho příprava | 0,5 | 0,75 |



Obr. 5.3 Srovnání časové náročnosti.

5.2 Ekonomické zhodnocení

Náklady na výrobu náhradního ozubeného kola metodou FDM byly porovnány s náklady na výrobu konvenčními technologiemi.

Průměrné náklady na výrobu jednoho kusu metodou FDM byly vypočteny podle vztahu (5.1):

$$N_F = c_{1F} \cdot t_{1F} + \frac{c_{2F} \cdot t_{2F}}{n} + c_{3F} \cdot m_F \quad (5.1)$$

Kde: c_{1F}hodinová sazba tisku [Kč/hod]
 t_{1F}doba tisku jednoho kusu [hod]
 c_{2F}hodinová sazba přípravy tisku [Kč/hod]
 t_{2F}doba přípravy tisku [hod]
 c_{3F}cena materiálu [Kč/kg]
 m_Fhmotnost jedné vyrobené součásti [kg]
 nvelikost výrobní série [-]

Vzhledem k dispozicím dílny je možno pouze frézovat ozubené kolo o výšce 45 mm (z důvodu velikosti trnu), které je následně děleno na 4 ozubená kola o požadované výšce 8,7 mm. Z tohoto důvodu je nutno volit velikost série, která je dělitelná čtyřmi. Dle vztahu (5.2) je vypočteno, kolik je nutno použít přířezů o délce 50 mm k pokrytí výrobní série.

$$n_k = \frac{n}{4} \quad (5.2)$$

Kde: nvelikost výrobní série [-]

Podle vztahu (5.3) je vypočítáno, kolik je nutno pořídit tyčí polotovaru k pokrytí celé výrobní série.

$$n_{1K} = \frac{n_k \cdot l_{1K}}{l_K} \quad (5.3)$$

Kde: n_kpočet přířezů [-]
 l_{1K}délka přířezu [mm]
 l_Kdélka polotovaru [mm]

Průměrné náklady na výrobu jednoho kusu konvenčními technologiemi byly vypočteny podle vztahu (5.4):

$$N_K = \frac{n \cdot c_{1K} \cdot t_{1K} + c_{1K} \cdot t_{2K} + c_{2K} \cdot n_{1k}}{n} \quad (5.4)$$

Kde: c_{1K}hodinová sazba strojní obsluhy [Kč/hod]
 t_{1K}doba seřízení soustruhu a frézy [hod]
 c_{2K}cena polotovaru [Kč]
 n_{1K}počet potřebných tyčí pro sérii [-]
 t_{2K}strojní čas [hod]
 nvelikost výrobní série [-]

Vstupní hodnoty pro výrobu konvenčními technologiemi byly dodány firmou paní Ireny Tichákové, ceny pro výrobu metodou FDM vychází z hodinových sazeb obsluhy a z ceny za kilogram materiálu. Hodinové sazby pro výrobu metodou FDM dodala firma Architektonické modely etc. Veškeré vstupní hodnoty jsou shrnuty v tab. 5.3, vypočtené hodnoty v tab. 5.4, které byly počítány pro série o velikosti 12, 100, 1 000 a 10 000.

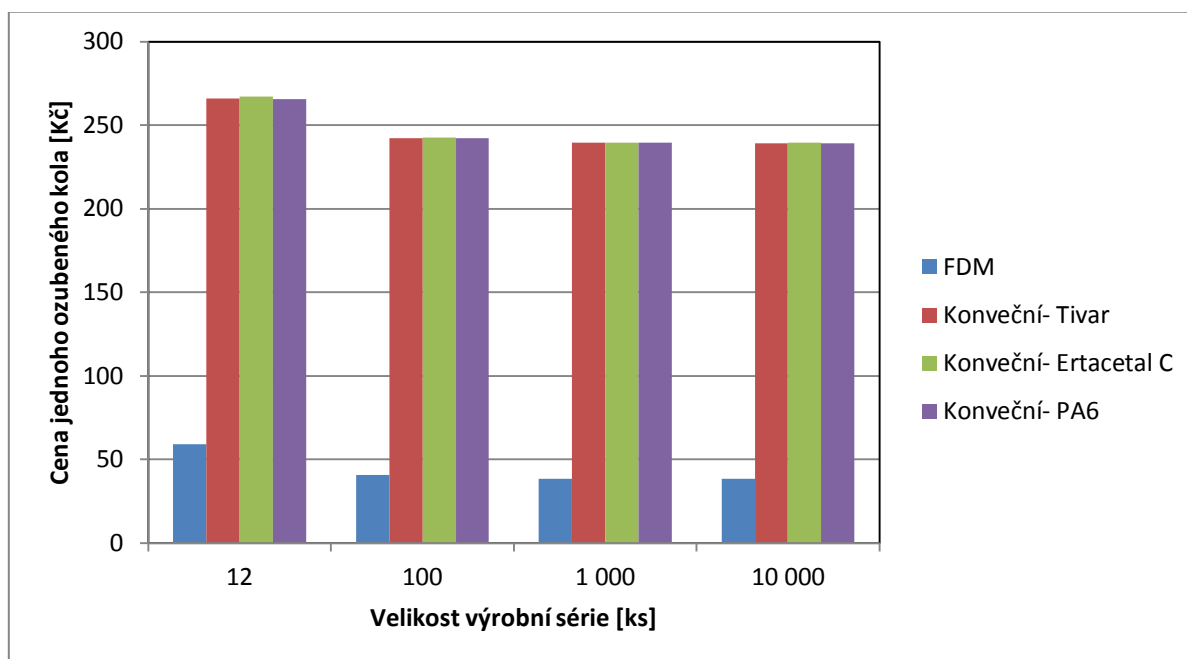
Tab. 5.3 Vstupní hodnoty.

| Název | Zkratka | Hodnota | Pozn. |
|----------------------------------|----------|------------------------|-------------|
| Hodinová sazba tisku | c_{1F} | 170 Kč/hod | |
| Doba tisku jednoho kusu | t_{1F} | 0,22 hod | |
| Hodinová sazba přípravy tisku | c_{2F} | 500 Kč/hod | |
| Doba přípravy tisku | t_{2F} | 0,5 hod | |
| Cena materiálu | c_{3F} | 400 Kč/kg | |
| Hmotnost jedné vyrobené součásti | m_F | 0,002 kg | |
| Hodinová sazba strojní obsluhy | c_{1K} | 350 Kč/hod | |
| Doba seřízení soustruhu a frézy | t_{1K} | 0,75 hod | |
| Cena polotovaru | c_{2K} | 98 Kč | Tivar |
| | c_{2K} | 114 Kč | Ertacetal C |
| | c_{2K} | 94 Kč | PA6 |
| Délka přířezu | l_{1K} | 50 mm | |
| Délka polotovaru | l_K | 1 000 mm | |
| Strojní čas | t_{2K} | 0,68 hod | |
| Velikost výrobní série | n | 12; 100; 1 000; 10 000 | |
| Počet přířezů | n_k | 3, 25, 250, 2 500 | |
| Počet potřebných tyčí pro sérii | n_{1K} | 1; 2; 13; 125 | |

Tab. 5.4 Vypočtené hodnoty.

| Série | N_F [Kč] | N_K [Kč] | N_K [Kč] | N_K [Kč] |
|--------|------------|------------|------------|------------|
| 12 | 59,03 | 266,00 | 267,33 | 265,67 |
| 100 | 40,7 | 242,34 | 242,66 | 242,26 |
| 1 000 | 38,45 | 239,51 | 239,72 | 239,46 |
| 10 000 | 38,23 | 239,25 | 239,45 | 239,20 |
| Pozn. | FDM | Tivar | Erta C | PA6 |

Na obr. 5.4 je srovnána koncová cena náhradního ozubeného kola, vyrobeného různými způsoby, v závislosti na velikosti výrobní série.



Obr. 5.4 Srovnání ceny ozubeného kola.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je výroba náhradního ozubeného kola užitím technologie FDM a srovnáním s náhradním ozubeným kolem vyrobeným pomocí dostupných konvenčních technologií.

V první části práce jsou popsány technologie FDM, soustružení a odvalovací frézování, které byly použity pro výrobu náhradního kola, rozbor materiálů používaných technologií FDM a materiálů použitých při výrobě konvenčními technologiemi. Následuje popis návrhu parametrů náhradního ozubeného kola za použití platných ČSN norem, tvorba modelu pro 3D tisk a jeho post processing, volba parametrů tisku a návrh optimalizace modelu ozubeného kola pro eliminaci nutnosti brousit spodní stranu kola k odstranění prvních tzv. rozlitych vrstev tištěného modelu. Dále je uveden výrobní postup konvenčními technologiemi včetně listu použitých nástrojů a měřidel, rezných podmínek a použitých strojů.

V závěru této práce jsou náhradní ozubená kola, vyrobená různými technologiemi, srovnána jak po stránce technické tak i ekonomické. V technickém srovnání je srovnána hlučnost provozu originálního ozubení s ozubením vyrobeným pomocí FDM, s ozubením vyrobeným konvenčními technologiemi a srovnání časové náročnosti obou použitých způsobů výroby. V ekonomickém srovnání jsou srovnány konečné ceny součástky v různých výrobních sériích. Z těchto srovnání vyplývá, že tištěný model náhradního ozubeného kola je za provozu po záběhu nejtišší (oproti originálnímu ozubení rozdíl činí 1 dB). Při objemu výrobní série o čtyřech kusech je celkový výrobní čas včetně času přípravy o šest minut kratší, ale při větších sériích je tato technologie pomalejší, jelikož samotný výrobní čas jednoho ozubeného kola je o tři minuty delší než při výrobě konvenčními technologiemi. Tištěné ozubené kolo je taktéž méně finančně náročné, při výrobní sérii o objemu dvanácti kusů stojí jeden kus 60 Kč, což je čtyřikrát méně než při výrobě druhým způsobem. Při vyšších výrobních sériích je tento rozdíl až šestinásobný. Tímto srovnáním potvrzuje technologie FDM svůj potenciál pro výrobu finálních součástek.

Pro budoucí výrobu obdobných součástí je vhodné vždy optimalizovat model sražením hran plochy, která dosedá na pracovní plochu tiskárny, jak je v práci popsáno. Dále je možné použít jemnější krok tisku pro docílení jemnějšího povrchu ozubeného kola. Při použití kroku 0,25 mm se doba tisku prodlouží o osm minut.

Budoucnost technologií sdružených pod názvem Rapid Prototyping je příznivá. Tyto technologie jsou s rostoucími požadavky dynamického trhu na rychlost zhotovení projektu schopny obstát. Při neustávajícím vývoji materiálů, technologických postupů a konstrukcí, se taktéž tyto technologie stávají dostupnější menším subjektům, než tomu bylo dříve. S tímto trendem můžeme například v budoucnu očekávat domácí zařízení využívající těchto technologií pro výrobu různorodých náhradních dílů nebo i originálních součástek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. Rapid Prototyping / History / Prototyping technologies. [online]. 2013 [vid. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1408-rapid-prototyping-history-prototyping-technologies/>
3. SEDLÁK, Josef. Aditivní technologie- metody Rapid Prototyping. [online]. [vid. 2013-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
4. GEBHARDT, Andreas. *Rapid prototyping*. 1st ed. Munich: Hanser Publishers, 2003, xv, 379 s. ISBN 34-462-1259-0.
5. How FDM process works. *Rapid Prototyping 3D Printing Service* [online]. [vid. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.arptech.com.au/fdmhelp.htm>
6. Fused Deposition Modeling. *Manufacturing cost estimate [online]*. [vid. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
7. FDM materials & datasheets. *Materialise* [online]. 2013 [vid. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://old.materialise.com/fdm-materials>
8. FDM materials. *FISHER/UNITECH - SolidWorks, Rapid Prototyping, 3D Printers* [online]. 2013 [vid. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.funtech.com/FDM-Materials>
9. ABS plastic. *Plastic Recycling, Recycle Scrap Plastics, and Sale Plastic Regrind & Virgin Resins* [online]. 2013 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.gopolymers.com/plastic-types/abs-plastic.html>
10. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
11. Polycarbonate (PC) plastic. *Plastic Recycling, Recycle Scrap Plastics, and Sale Plastic Regrind & Virgin Resins* [online]. 2013 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.gopolymers.com/plastic-types/polycarbonate-plastics.html>
12. PPSF. *Stratatsys* [online]. 2011 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.stratatsys.com/~media/Fortus/Files/PDFs/MS-PPSF-FORTUS.ashx>
13. Radel PPSU. *Solvay Plastics* [online]. 2013 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/en/specialty_polymers/sulfonepolymers/pages/radel.aspx
14. FDM materials properties. *Materialise* [online]. 2011 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://old.materialise.com/download/en/5017537/file>
15. Stratatsys ABSplus. *MatWeb* [online]. 2013 [vid. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=14193b776a7b4c1ca6d4ecf86497204b&ckck=1>

16. ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 13. vyd. Praha: SNTL, 1977.
17. ČSN 01 4607. *Ozubená kola čelní s evolventním ozubením*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1978.
18. ČSN 01 4675. *Měření ozubených kol čelních s přímými zuby*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1953.
19. ČSN 01 4676. *Měření ozubených kol čelních se šikmými zuby*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1953.
20. Fortus 900mc. *Stratatsys* [online]. 2013 [vid. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-900mc>
21. Mojo. *Stratatsys* [online]. 2013 [vid. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/mojo>
22. UPrint SE. *Stratatsys* [online]. 2013 [vid. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se>
23. KISSlicer alternatives. *AlternativeTo* [online]. 2013 [vid. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://alternativeto.net/software/kisslicer/>
24. KISSlicer. *KISSlicer* [online]. 2013 [vid. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://kisslicer.com/index.html>
25. Tribon Polotovary z technických plastů. *Tribon plasty* [online]. 2013 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://eshop.tribon.cz/erta/>
26. Ertalon 6 SA. *Quadrant* [online]. 2013 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/machinable-plastics/engineering-80-160-c/ertalon-R-and-nylatron-R-products/ertalon-R-6-sa.html>
27. Ertacetal / Acetron®. *Quadrant* [online]. 2013 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/machinable-plastics/engineering-80-160-c/ertacetal-R-acetron-R.html>
28. TIVAR Standard Products. *Quadrant* [online]. 2013 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/machinable-plastics/moderate-80-c/tivar-R-standard-products-pe-500.html>
29. TIVAR 1000. *Quadrant* [online]. 2013 [vid. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.quadrantplastics.com/en/products/machinable-plastics/moderate-80-c/tivarR-uhmw-pe-family-of-products/tivarR-1000.html>
30. ERTALON 6 SA. *Quadrant* [online]. 2011 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/GEP/Ertalon_6SA_E_PDS_0907.pdf
31. ERTACETAL C. *Quadrant* [online]. 2011 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/GEP/Ertacetal_C_E_PDS_0907.pdf
32. TIVAR 1000. *Quadrant* [online]. 2011 [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/PE/Tivar_1000_E_PDS_0209.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Zkratka | Význam |
|-----------|------------------------------|
| 3D | Trojrozměrný |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| CAD | Computer Aided Drawing |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| ČSN | Česká státní norma |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| PA | Polyamid |
| PC | Polykarbonát |
| PE | Polyethylen |
| PPSF/PPSU | Polyfenylsulfon |
| REPRAP | Replicating Rapid-prototype |
| RP | Rapid Prototyping |
| UV | Ultra Violet |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------|----------|----------------------------------|
| β | [°] | Úhel sklonu zubu |
| V | [mm] | Šířka ozubení |
| c_{1F} | [Kč/hod] | Hodinová sazba tisku |
| c_{1K} | [Kč/hod] | Hodinová sazba strojní obsluhy |
| c_{2F} | [Kč/hod] | Hodinová sazba přípravy tisku |
| c_{2K} | [Kč] | Cena polotovaru |
| c_{3F} | [Kč] | Cena materiálu |
| l_{1K} | [mm] | Délka přířezu |
| l_K | [mm] | Délka polotovaru |
| m_F | [kg] | Hmotnost jedné vyrobené součásti |
| m_t/m_n | [-] | Modul čelní/normální |
| n | [-] | Velikost výrobní série |
| n_{1K} | [-] | Počet potřebných tyčí pro sérii |
| n_k | [-] | Počet přířezů |
| t_{1F} | [hod] | Doba tisku jednoho kusu |
| t_{1K} | [hod] | Doba seřízení soustruhu a frézy |
| t_{2F} | [hod] | Doba přípravy tisku |
| t_{2K} | [hod] | Strojní čas |
| z | [-] | Počet zubů |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 Výpočty pro návrh ozubeného kola
Příloha č.2 Výkresová dokumentace ozubeného kola
Příloha č.3 Ukázka zdrojového kódu pro tisk
Příloha č.4 Výrobní postup a nástrojový list

Příloha č. 1 Výpočty pro návrh ozubeného kola

Z originálního ozubeného kola byly odměřeny následující hodnoty: $d_a=21,9$ mm; $d_f=17,6$ mm; $z=20$; $\beta=19^\circ$.

Výpočet výšky zubu:

$$h = \frac{d_a - d_f}{2} = \frac{21,9 - 17,6}{2} \text{ mm} = 2,15 \text{ mm} \quad (1.1)$$

Kde: h výška zubu [mm]
 h_a výška hlavy zubu [mm]
 h_f výška paty zubu [mm]
 d_a průměr hlavové kružnice [mm]
 d_f průměr patní kružnice [mm]

Výpočet modulu normálního a čelního:

$$h = h_a + h_f = 1 \cdot m_n + 1,25 \cdot m_n = 2,25 \cdot m_n \quad (1.2)$$

$$h = 2,25 \cdot m_n \rightarrow m_n = \frac{h}{2,25} = \frac{2,15}{2,25} = 0,95$$

Kde: m_n modul normální [-]

Pro potřeby tvorby modelu v programu Autodesk Inventor tyto hodnoty dostačují. Vzhledem k dispozicím dílny, kde je nejbližší dostupný nástroj s modulem $m_n=1$, je nutno ozubené kolo korigovat. Hodnota průměru hlavové kružnice korigovaného ozubeného kola je stejná jako hodnota originálního ozubeného kola.

Dané hodnoty pro výpočet korigovaného kola: $d_{ak}=21,9$ mm; $m_n=1$; $z=20$; $\beta=19^\circ$.

Výpočet čelního modulu:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{1}{\cos 19^\circ} = 1,06 \quad (1.3)$$

Kde: m_t modul čelní [-]
 β úhel sklonu zubů [°]

Výpočet roztečné a patní kružnice:

$$d_k = z \cdot m_t = 20 \cdot 1,06 \text{ mm} = 21,2 \text{ mm} \quad (1.4)$$

Kde: d_k průměr roztečné kružnice korigovaného kola [mm]

$$d_{fk} = d_k - 2,5 \cdot m_n = 21,2 - 2,5 \cdot 1 \text{ mm} = 18,7 \text{ mm} \quad (1.5)$$

Kde: d_{fk} průměr patní kružnice korigovaného kola [mm]

Ozubené kolo je nutno korigovat tak, aby hodnota patní kružnice byla shodná s hodnotou originálního ozubeného kola.

Příloha č. 1 Výpočty pro návrh ozubeného kola- pokračování

Výpočet hodnoty korekce:

$$xm = d_f - d_{fk} = 17,6 - 18,7 \text{ mm} = -0,55 \text{ mm} \quad (1.6)$$

Kde: xm korekce (posunutí profilu) [mm]

Výpočet kontrolního rozměru přes zuby:

Dle diagramu 2 normy ČSN 01 4676 byl stanoven počet zubů $z'=3$, přes které se měří.

$$M/3 = m_n \cdot (A + z \cdot B) - 2 \cdot xm \cdot \sin \alpha \quad (1.7)$$

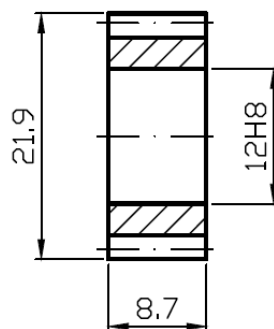
$$M/3 = 1 \cdot (7,38 + 20 \cdot 0,01642) - 0,37622 \text{ mm} = 7,33 \text{ mm}$$

Kde: A.....viz tab. 1 normy ČSN 01 4676 [mm]

B.....viz tab. 2 normy ČSN 01 4676 [mm]

Příloha č. 2 Výkresová dokumentace ozubeného kola

| | | |
|----------------------------------|----------------|----------------|
| Modul | m | 1 |
| Počet zubů | z | 20 |
| Normální základní profil | - | ČSN 01 4607 |
| Úhel sklonu boční křivky zubu | β | 19° |
| Smysl stoupání boční křivky zubu | - | LEVÝ |
| Korekce | x | -0,5 |
| Stupeň přesnosti podle | - | ČSN 01 4682.10 |
| Průměr roztečné kružnice | d | 20,15 |
| Průměr patní kružnice | d _f | 17,65 |



| | | | | |
|-------------------------------|-----------|--|--------------------------|--|
| Struktura povrchu: | | Hrany: $\sqrt{-0,3}$ ($\sqrt{+0,3}$) | Měřítko 2:1 | Přesnost ISO2768-mH Tolerování ISO8015 Promítání |
| Materiál Termoplast | Polotovár | Hmotnost 0,002 kg | CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016 | |
| Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES | | Název OZUBENÉ KOLO | | |
| Kreslil David SVĚTLÍK | | Číslo dokumentu BP-01 | | |
| Schválil | | | | |
| Datum vydání 16.4.2013 | | List / | | |

Příloha č. 3 Ukázka zdrojového kódu pro tisk

```
...
; 'Raft', 2.0 [feed mm/s], 18.6 [head mm/s]
G1 F9000
G1 X142.53 Y122.16 E94.1977
G1 F1116
G1 X147.84 Y127.48 E95.0104
;
; 'Raft', 2.0 [feed mm/s], 18.6 [head mm/s]
G1 F9000
G1 X149.93 Y134.1 E95.0104
G1 F1116
G1 X136.02 Y120.18 E97.1383
G1 F600
G1 X136.02 Y120.18 Z2.1 E97.1383
; END_LAYER_RAFT z=1.35
; Reset extruder pos
G92 E0
; BEGIN_LAYER_OBJECT z=1.60
; fan on
M106
;
; 'Loop', 1.7 [feed mm/s], 23.0 [head mm/s]
G1 F9000
G1 X141.94 Y140.06 Z2.1 E0
G1 F600
G1 X141.94 Y140.06 Z1.6 E0
G1 F1380.5
G1 X141.49 Y139.98 E0.0327
G1 X141.05 Y140.12 E0.0661
G1 X140.73 Y140.33 E0.0935
G1 X140.26 Y140.83 E0.1431
G1 X140.11 Y141.09 E0.1645
G1 X140.03 Y141.54 E0.1976
G1 X139.86 Y141.73 E0.2159
G1 X139.73 Y141.77 E0.2257
G1 X139.38 Y141.69 E0.2514
G1 X138.96 Y141.77 E0.2827
G1 X138.22 Y142.16 E0.3431
G1 X138.01 Y142.36 E0.3639
G1 X137.8 Y142.71 E0.3931
G1 X137.68 Y142.68 E0.402
G1 X137.39 Y142.85 E0.4266
G1 X137.33 Y142.87 E0.4313
...
```


Příloha č. 4 Výrobní postup a nástrojový list-pokračování

Nástrojový list:

| Pozice nástroje | Název nástroje | Specifikace | Materiál |
|-----------------|----------------|-----------------------------|----------|
| T1 | Vrták | ČSN 22 0015, D=4 mm | HSS |
| T2 | Vrták | ČSN 22 0015, D=11,8 mm | HSS |
| T3 | Výstružník | ČSN 22 1430, 12H8 | HSS |
| T4 | Soustr. nůž | ČSN 22 3516 | HSS |
| T5 | Ruční pila | - | HSS |
| T6 | Modulová fréza | ČSN 22 2750, M1x20° KN 2551 | HSS |

List měřidel:

| Pozice nástroje | Název nástroje | Specifikace | Materiál |
|-----------------|-----------------|-------------|----------|
| M1 | Posuvné měřidlo | ČSN 25 1230 | - |