



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYROBENÍ VZORKU SOUČÁSTI ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ RAPID PROTOTYPING

MANUFACTURING OF COMPONENTS USING RAPID PROTOTYPING
TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Roman Hájek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Roman Hájek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Vyrobení vzorku součásti aditivní technologií Rapid prototyping

v anglickém jazyce:

Manufacturing of Components Using Rapid Prototyping Technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Představení aditivní technologie.
3. Rozbor součásti a její konstruování v 3D softwaru.
4. Vygenerování dat potřebných pro aditivní technologii.
5. Použití 3D tiskárny.
6. Zhodnocení vytisknutého prototypu.
7. Diskuze.
8. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Znalost používání 3D softwarových produktů. Doložení možností aditivní technologie pro přípravu a výrobu prototypu. Autorská činnost při tisku na 3D tiskárně.

Seznam odborné literatury:

1. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. Základy konstruování. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2005. ISBN 80-7204-405-2.
2. FREIBAUER, M., H. VLÁČILOVÁ a M. VILÍMKOVÁ. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2010. 326 s. ISBN 978-80-251-2504-5.
3. GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. P. 459. ISBN 14-419-1120-0.
4. JUROVÁ, Marie. Organizace přípravy výroby. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 100 s. ISBN 978-80-214-3946-7.
5. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2005. 272 s. ISBN 80-214-3068-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 10.12.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na návrh planetové převodovky vymodelované v 3D programu Autodesk Inventor, a její zhotovení pomocí aditivní technologie Rapid Prototyping s rozšířenou metodou Fused Deposition Modelling. Ze začátku bakalářské práce jsou představeny nejrozšířenější metody Rapid Prototyping, dále zahrnuje postup při návrhu planetové převodky, postup modelování v 3D programu, a rozbor potřebných nastavení pro 3D tiskárnu.

Klíčová slova

planetová převodovka, Rapid Prototyping, Autodesk Inventor, 3D tiskárna

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is design of planetary gear modeled in 3D program Autodesk Inventor and made using additive technology extended by Fused Deposit Modelling. In the first section is presented the most widely used methods of Rapid Prototyping. The next section is focused on design of planet gear, the process of modeling in 3D software, and analysis of needed configurations for the 3D printer.

Key words

planet gear, Rapid Prototyping, Autodesk Inventor, 3D printer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJEK, Roman. *Vyrobění vzorku součásti aditivní technologií Rapid Prototyping*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 37 s. 8 příloh. Vedoucí práce. Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vyrobení vzorku součásti aditivní technologií Rapid prototyping** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Roman Hájek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Také bych mile rád poděkoval celé rodině za umožnění studií a opory, kterou mi byli po celou dobu studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING.....	9
1.1 Rozdělení metod Rapid prototyping.....	9
1.1.1 Fused Deposition Modeling	9
1.1.2 Stereolitografie	11
1.1.3 Selective Laser Sintering.....	12
1.1.3 Selective Laser Sintering.....	12
1.1.4 Laminated Object Manufacturing	13
1.1.5 Multi Jet Modeling.....	13
2 POSTUP VYTVÁŘENÍ 3D MODELU PŘEVODOVKY.....	15
2.1 Návrh geometrických rozměrů planetového převodu.....	15
2.2 Modelování součástí pomocí konstrukčního programu Autodesk Inventor	16
2.2.1 Nákres 2D pohledu ložiska.....	17
2.2.2 Vytvoření 3D modelu z připraveného 2D náčrtu	18
2.2.3 Vymodelování kuličky ložiska do 3D modelu	18
2.3 Modelování kliky.....	19
2.3.1 Náčrt 2D pohledu kliky	20
2.3.2 3D model vytvořen funkcí Extrude.....	20
2.3.3 Vytvoření otvoru na válcovitou plochu.....	21
2.4 Zkompletování 3D sestavy.....	22
3 PROCES VÝROBY SOUČÁSTÍ.....	24
3.1 Příprava dat pro 3D tiskárnu	24
3.2 Zhotovení součástí metodou FDM	27
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	30
5 DISKUZE.....	32
6 ZÁVĚR	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	36
SEZNAM PŘÍLOH	37

ÚVOD

Technologie Rapid Prototyping podléhá v posledních letech velkému rozšíření a zdokonalování jak na vědecké půdě tak i pro domácí použití. V dnešní době není problém si např. vytisknout celý dům a to ani ne za jeden jediný den. Rapid Prototyping nalézá uplatnění ve všech možných technických odvětvích ať už se jedná o zdravotnictví nebo o kosmický průmysl. Pomocí této technologie se dají vyrobit velice přesné a složité tvary, které by nebylo třeba ani možné vyrobit konvečními způsoby.

V bakalářské práci budou vymodelovány jednotlivé součásti planetové převodovky v 3D programu Autodesk Inventor, které budou zhotoveny 3D tiskárnou uPrint od výrobce Stratasys využívající metodu Fused Deposition Modelling. Práce bude mimo jiné zahrnovat popis jednotlivých nejdostupnějších metod Rapid Prototyping. V technicko-ekonomickém zhodnocení budou vyčísleny úspory, dosažených použitím konvečních metod s levným materiálem pro výrobu jednoduchých součástí.

1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

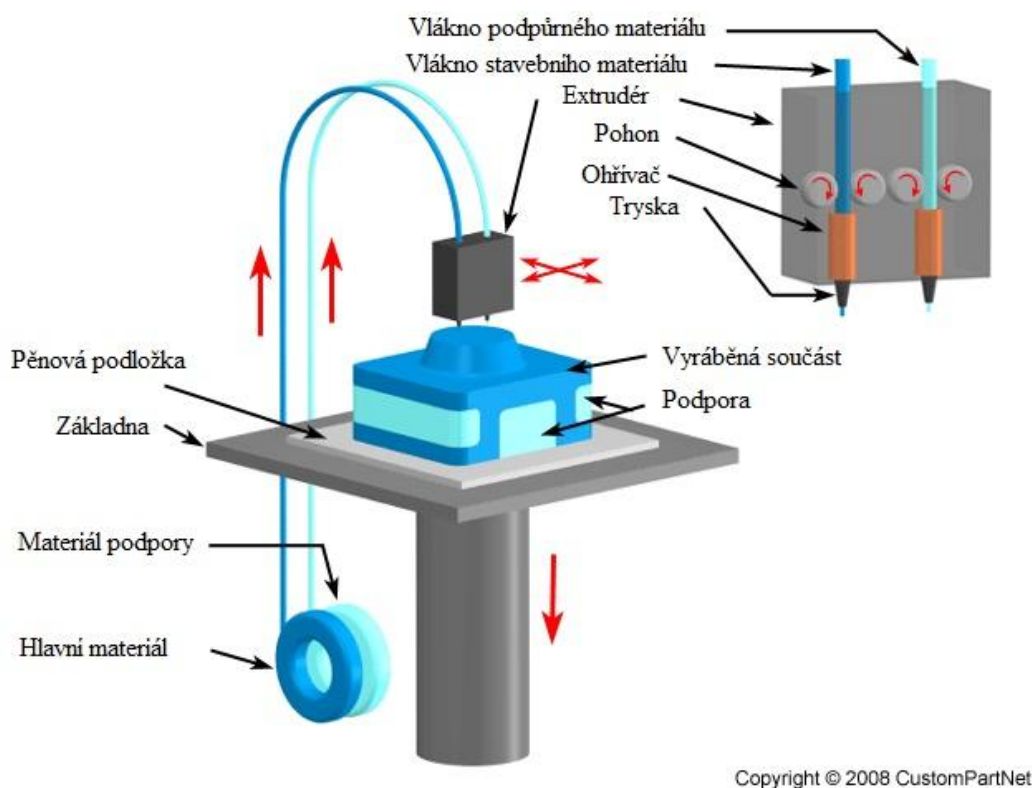
První zmínka o technologii Rapid prototyping je z 80. let, kdy Charles Hull představil metodu stereolitografie (SL), která využívá fotopolymerové pryskyřice vytvrditelné ultrafialovým laserem. Je to pouze jedna z metod, ostatní systémy vystavují výrobek nanášením tenkých vrstev. Hlavní myšlenkou bylo vytvoření zařízení schopné vyrobit prototyp z počítačových dat v poměrně krátkém času. Rapid prototyping se v posledních letech dostává do různých odvětví od vesmírných oprav až ke gastronomii. Nejpodstatnější výhodou výroby součásti pomocí metody rapid prototyping je fakt, že se mohou tisknout velmi složité tvary, skořepiny, které by se velmi těžko vyráběli konvenčníma způsoby. [12]

1.1 Rozdělení metod Rapid prototyping

V následujících odstavcích bude představeno seznámení se základními principy do dnes nejčastěji využívaných metod Rapid prototyping.

1.1.1 Fused Deposition Modeling

Metoda (FDM) byla vynalezena v 80. letech. Tato metoda využívá ohřátý materiál, který je vytlačován skrz trysku na základní desku na níž ihned ztuhne a tak se vrstva po vrstvě vystaví daná součást. Tloušťka nanášené vrstvy a vertikální rozměrová přesnost se určuje podle průměru matrice extrudéru, jejíž velikost se pohybuje od 0,005“ do 0,13“. FDM pracuje s dvěma materiály naráz, kde jeden z nich slouží jak podpůrný materiál (support) a druhým materiálem se vystavuje daná součást. Podpůrný materiál se po dokončení tisku mechanicky nebo chemicky odstraní. Metodou FDM bude zhotovená bakalářská práce. [1]



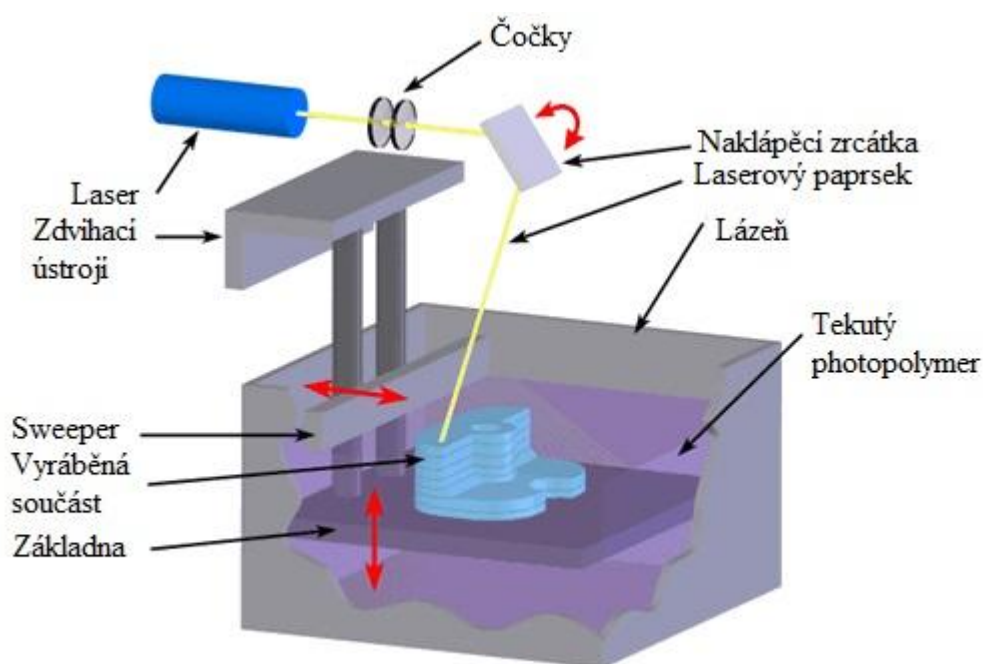
Obr. 1. 1 Schematické znázornění principu metody FDM[1]

Tab. 1.1 Druhy materiálů používaných pro FDM [2]

Materiál	Vlastnosti	Rm
ABS plus	Součásti vytvořené z tohoto materiálu jsou mechanicky pevné a stabilní. ABS plus nabízí nejširší paletu barev.	37
ABSi	Materiál umožňuje vytisknout průhledné součásti, velmi se to hodí pro automobilový a letecký průmysl a v ne poslední řadě ve zdravotnictví.	37
ABS-M30	Tento materiál je velmi pevný, je vhodný na výrobu funkčních součástí s mechanickými vlastnostmi blízké k reálné součásti.	36
ABS-M30i	Biokompatibilní materiál, který slouží pro výrobu potravinářských, farmaceutických a lékařských prototypů sterilizovatelných Eto nebo gamma zářením.	36
ABS-ESD7	Elektrostaticky disipativní materiál, proto je vhodný pro výrobky u kterých hrozí poškození statickým nábojem.	36
PC	Patří mezi nejpoužívanější průmyslové termoplasty, vykazuje větší pevnosti v tahu i v ohybu než materiály na koncepci ABS. Pevnost v tahu kolem 68Mpa.	68
PC-ABS	Spojuje ty nejlepší vlastnosti od obou materiálů, pevnost a teplotní odolnost PC a pružnost ABS.	40
PC-ISO	Jedná se o nejvíce tepelně odolném biokompatibilním materiálu, který je sterilizovatelný ETO nebo gamma zářením .	57
PPSF/PPSU	Nabízí nejvyšší tepelnou odolnost z FDM termoplastů se zachováním dobré mechanické pevnosti. Používá se i se stykem s chemikáliemi.	55
ULTEM 9085	Velmi lehký, pevný a odolný materiál, řadí se na špici ze všech možných materiálů. Vhodný zejména pro kosmický, letecký a automobilový průmysl. Pevnost v tahu 71.6 Mpa.	71,6
FDM Nylon 12	Nejmladší materiál z FDM termoplastů, má nejlepší houževnatost, dobrou chemickou odolnost a výbornou odolnost vůči únavě.	48

1.1.2 Stereolitografie

Stereolitografie je metoda, která využívá jak bylo již zmíněno fotopolymerové pryskyřice vytvrditelné ultrafialovým laserovým paprskem. Proces probíhá v lázni vyplněné fotopolymerovou pryskyřicí, do které je cíleně soustředěn laserový paprsek, který vytvrzuje vrstvu po vrstvě na posuvné základní desce umožňující pohyb ve vertikálním směru. Po dokončení vytvrzování vyzdvihne deska zhotovenou součást z lázně, ze součásti se opláchne přebytečná pryskyřice a vloží se do UV komory, kde se nadále vytvrzuje po několik hodin. Touto metodou se dosahuje nejvyšší přesnosti a nejhladšího povrchu. [3] [5]



Copyright © 2008 CustomPartNet

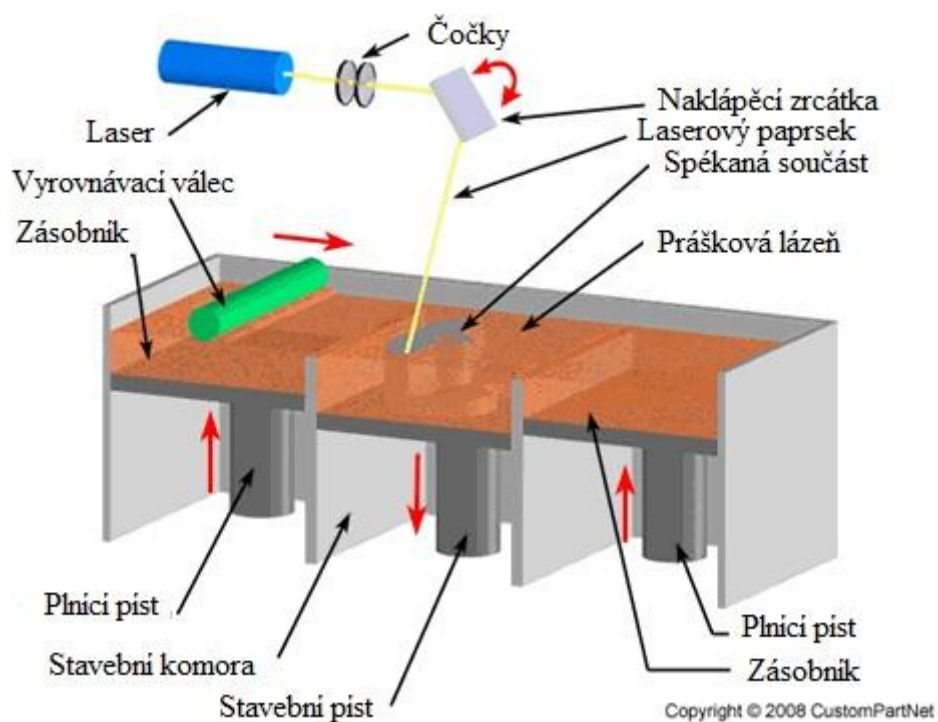
Obr. 1.1 Schematické znázornění metody SLA[3]

Tab 1.2 Přehled základních typů SLA materiálů [4]

Materiál	Vlastnosti	Rm [Mpa]
ABS	Voděodolný SLA materiál, který je zdravotně nezávadný	47-53
PC-ABS	Pevný materiál se zachováním houževnatosti využívaný na spotřebitelské elektronické součástky.	38-44
PP	Pružný materiál na výrobu funkčních montážních prototypů.	38
PC	Odolný tuhý materiál vhodný pro prototypy kde je zapotřebí průsvitu.	58-68

1.1.3 Selective Laser Sintering

Selektivní laserové spékání, bylo patentováno v roce 1989 Carlem Deckardem z Texaské university. Jedná se o metodu, která využívá podobného principu jako u metody SLA. SLS však používá materiál v podobě prášků, který je následně slinován za působení tepla vyvolané paprskem laseru. Pomocí této metody jsme schopny vyrobit kovové funkční prototypy, skleněné výrobky atd. [6] [14]



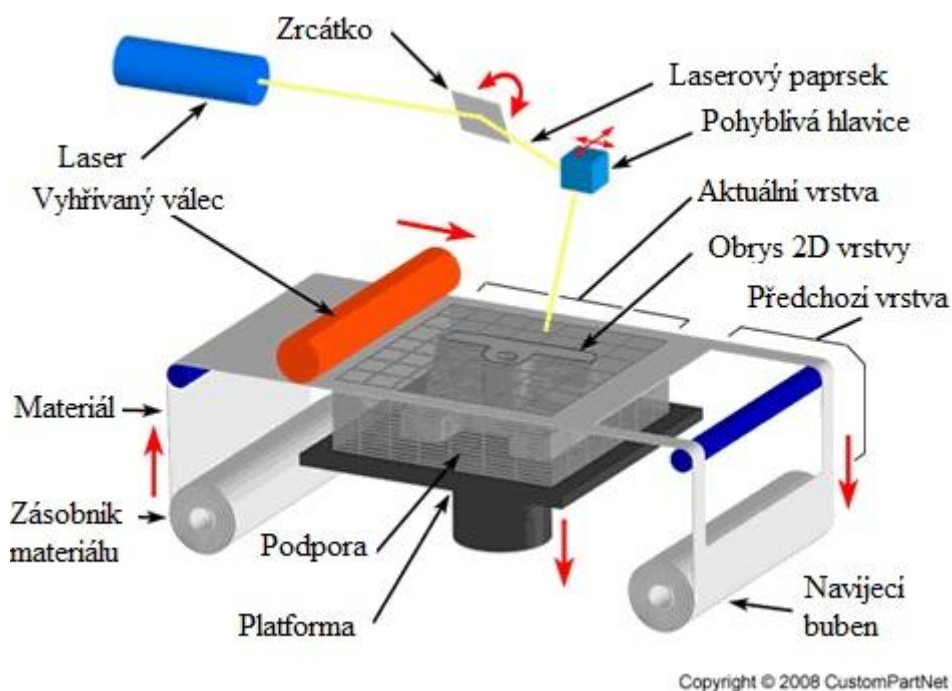
Obr. 1.3 Schematické znázornění metody SLS[6]

Tab. 1.3 Přehled některých SLS materiál [7]

Materiál	Vlastnosti	Rm [Mpa]
Nylon 12	Zdravotně nezávadný materiál, použitelný pro styk s tkáněmi a v potravinářském průmyslu	31
FR-106	Materiál vykazující vysokou houževnatost, odolnost vůči nárazu a je ohnivzdorný	46
Ocel 15-4	Jedná se o legovanou ocel ve formě prášku s vysokou odolností vůči korozi. Legující prvky Cr,Ni,Cu,Mn,Si,Mo.	1150
Ti6Al4V / ELI	Legovaná titanová slitina ve formě prášku s biomedicínskou nezávadností, vysokou odolností vůči korozi a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi.	1150
Inco 718	Práškový materiál na bázi niklu, s vysokou pevností a je vhodný pro dlouhodobé používání v horkém prostředí	965

1.1.4 Laminated Object Manufacturing

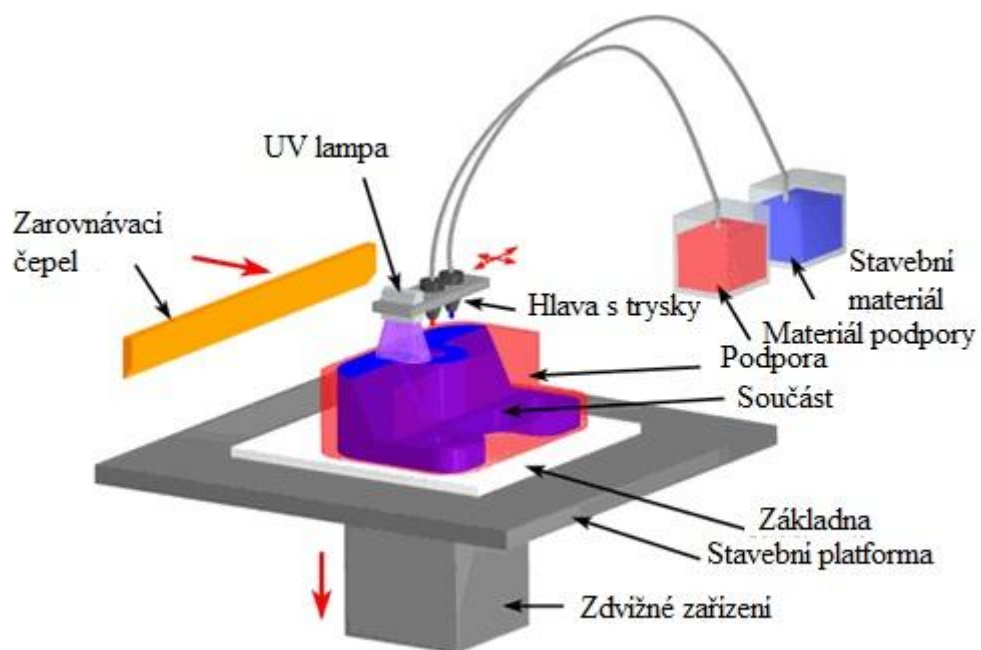
Metoda vynalezena v roce 1991, využívající postupného vrstvení jemných folií obřezávané laserem, po vytvoření vrstvy se sníží celá platforma s výrobkem o tloušťku folie, která se opět posune nepoužitou částí přes výrobek a proces se opakuje do vytvoření požadované součásti. Pomocí metody LOM vznikají velice přesné výrobky vhodné pro funkční montážní díly. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a cena materiálu. Mezi nejčastěji používané materiály patří kovové, plastové a papírové folie. [8]



Obr 1.4 Schematické znázornění metody LOM[8]

1.1.5 Multi Jet Modeling

Princip metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolyméru postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Hlava má 96 trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Průtok nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízen programem. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X. Jestliže je součástka širší jak pracovní hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořila celá součástka. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě. [8] [13]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 1.5 Schematické znázornění metody MM/MJM [9]

2 POSTUP VYTVÁŘENÍ 3D MODELU PŘEVODOVKY

Planetová převodovka byla vybrána z osobní zkušenosti jako chybějící učební pomůcka pro představení žákům technických škol základního principu využívajícího u planetového převodu. Planetová převodovka se využívala již za druhé světové války u tanků, dnes jí najdeme ve všech automatických převodovkách. Planetová převodovka se skládá nejčastěji ze tří satelitu otočných kolem vlastní osy a spojených otočným unášečem vloženým do velkého centrálního kola s vnitřním ozubením. Kde přívod působí na zmíněné satelity, které se začnou odvalovat kolem osy centrálního kola a tím se docílí pohybu výstupní hřídele spojené s unášečem. Pomocí planetové převodovky dosáhneme velkých převodových poměrů vzhledem k rozměrům.

2.1 Návrh geometrických rozměrů planetového převodu

Na začátku navrhování rozměrů se vycházelo z faktu, že daný model bude sloužit k výuce např. strojních součástí nebo stavba a provoz strojů, což jsou, známe předměty ze střední školy. Proto by neměl být model příliš malý, kvůli dobré představivosti o dané problematice. Tak byl zvolen omezující rozměr průměru centrálního kola a to tak, že nesmí být menší než 200mm, poté byl zvolen počet zubů pastorku a modul ozubení. Z čehož se vycházelo pro navržení rozměrů ozubených kol. Na výpočty přesných rozměrů a počtů zubů ozubených kol byly použity základní vzorce pro výpočty ozubených kol.

Výpočet roztečných kružnic: $d_1 = z_1 \times m$ (1)

$$d_1 = 17 \times 2 = 34 \text{ mm}$$

$$d_{2i} = \frac{d_{3i} - d_1}{2} \quad (2)$$

$$d_{2i} = \frac{200 - 34}{2} = 83 \text{ mm} \Rightarrow \text{voleno } d_2 = 84 \text{ mm}$$

$$d_3 = 2 \times d_2 + d_1 \quad (3)$$

$$d_3 = 2 \times 84 + 34 = 202 \text{ mm}_1$$

$$z_i = \frac{d_i}{m} \quad (4)$$

Indexy: 1 - pastorek

2 - satelit

3 - korunové kolo

$$z_2 \frac{84}{2} = 42$$

$$z_3 = \frac{202}{2} = 101$$

Zvoleno:

$$z_1 = 17$$
$$m = 2$$
$$d_{3i} = 200 \text{ mm}$$
$$c = 0,25 \times m$$
$$c = 0,25 \times 2 = 0,5 \text{ mm}$$

Doposud vypočteno:

$$d_1 = 34 \text{ mm}$$
$$d_2 = 84 \text{ mm}$$
$$d_3 = 202 \text{ mm}$$
$$z_1 = 17$$
$$z_2 = 42$$
$$z_3 = 101$$

Výpočet hlavové kružnice: $d_{ih} = d_1 + 2 \times m$ (5)

$$d_{1h} = 34 + 2 \times 2 = 38 \text{ mm}$$

$$d_{2h} = 84 + 2 \times 2 = 88 \text{ mm}$$

$$d_{3h} = 202 - 2 \times 2 = 198 \text{ mm}$$

Výpočet patní kružnice: $d_{1p} = d_1 - 2 \times (m + c)$ (6)

$$d_{1p} = 34 - 2 \times (2 + 0,5) = 29 \text{ mm}$$

$$d_{2p} = 84 - 2 \times (2 + 0,5) = 79 \text{ mm}$$

$$d_{3p} = 202 + 2 \times (2 + 0,5) = 207 \text{ mm}$$

Výška zubu: $h_z = 2,25 \times m$ (7)

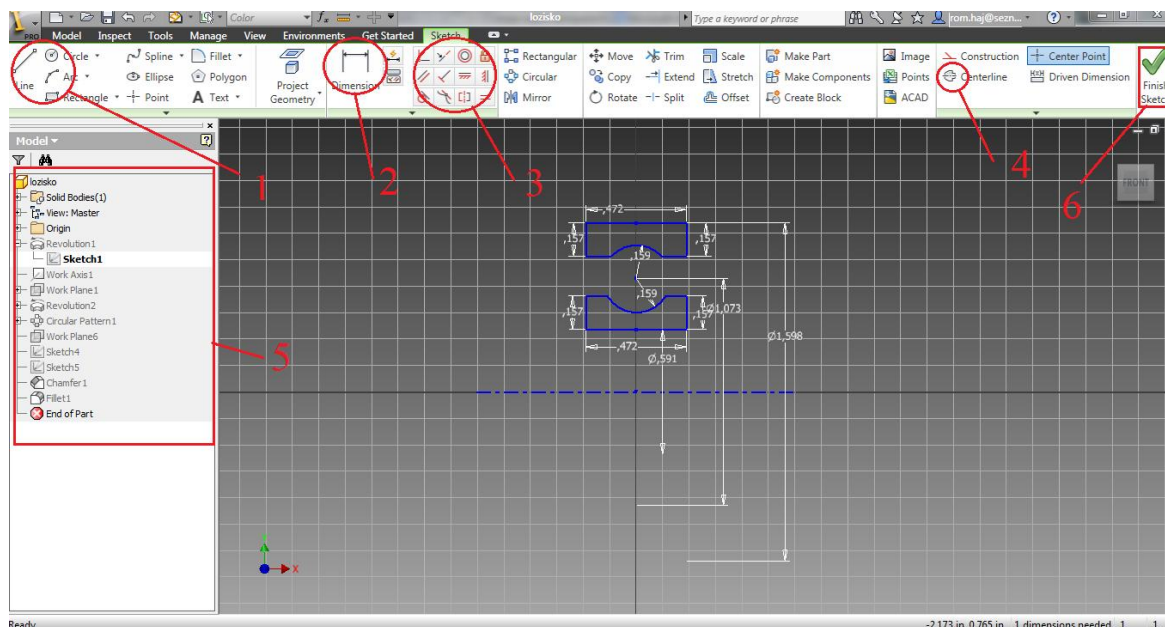
$$h_z = 2,25 \times 2 = 5 \text{ mm}$$

2.2 Modelování součástí pomocí konstrukčního programu Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je 3D CAD (Computer Aided Design) software, ve kterém lze vymodelovat 3D model z něhož je schopný generovat přesný konstrukční a výrobní dokumentace, umožňuje analyzovat celý výrobek předtím, než je skutečně vyroben. Podobných CAD systému je více např. Catia, SolidWorks, ProEngineer atp. Na vymodelování bylo použito verze Autodesk Inventor 2012.

2.2.1 Náčres 2D pohledu ložiska

Prvním krokem při vytváření 3D modelu je zapotřebí vycházet z nějakého konstruktérem vhodně zvoleném 2D pohledu, tak jak vystihuje obrázek níže.

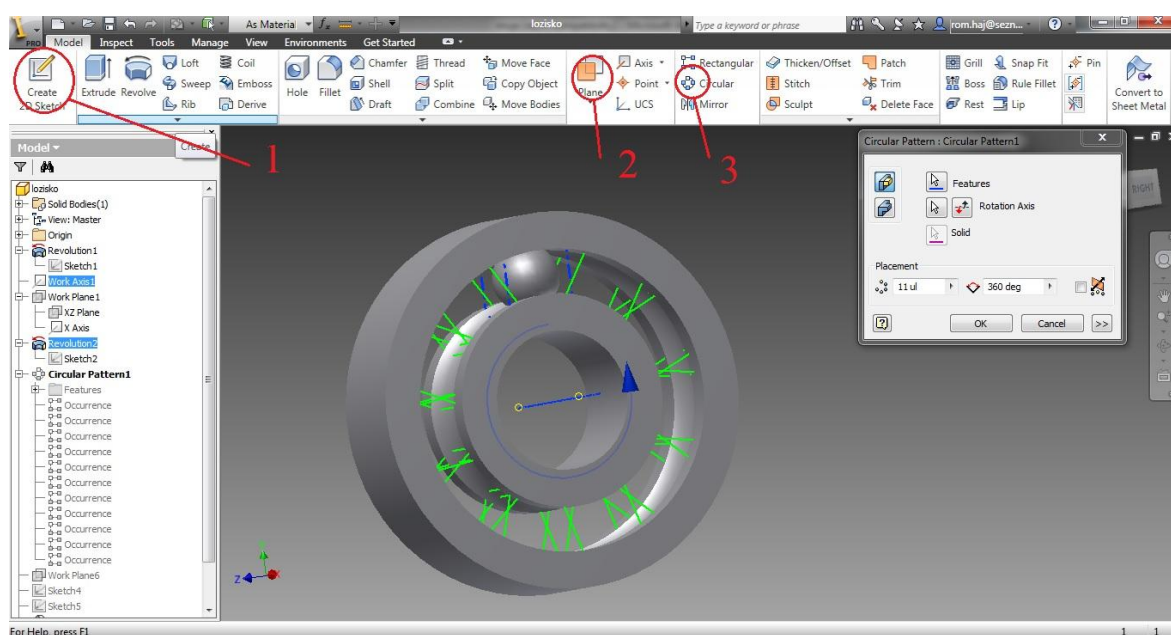


Obr 2.1 Základní 2D náčrt

Legenda k Obr. 2.1:

- 1- Jsou příkazy pro jednotlivé geometrické útvary.
- 2- Příkaz pro zadání rozměru v palcích nebo milimetrech.
- 3- Příkazy pro geometrické vazby jako je kolmost, rovnoběžnost atp.
- 4- Příkaz pro zvolení osy, která je využita pro rotaci náčresu k vytvoření 3D modelu.
- 5- Strom se všemi doposud udělanými příkazy.
- 6- Příkaz pro ukončení 2D prostředí a následné importování do 3D prostředí.

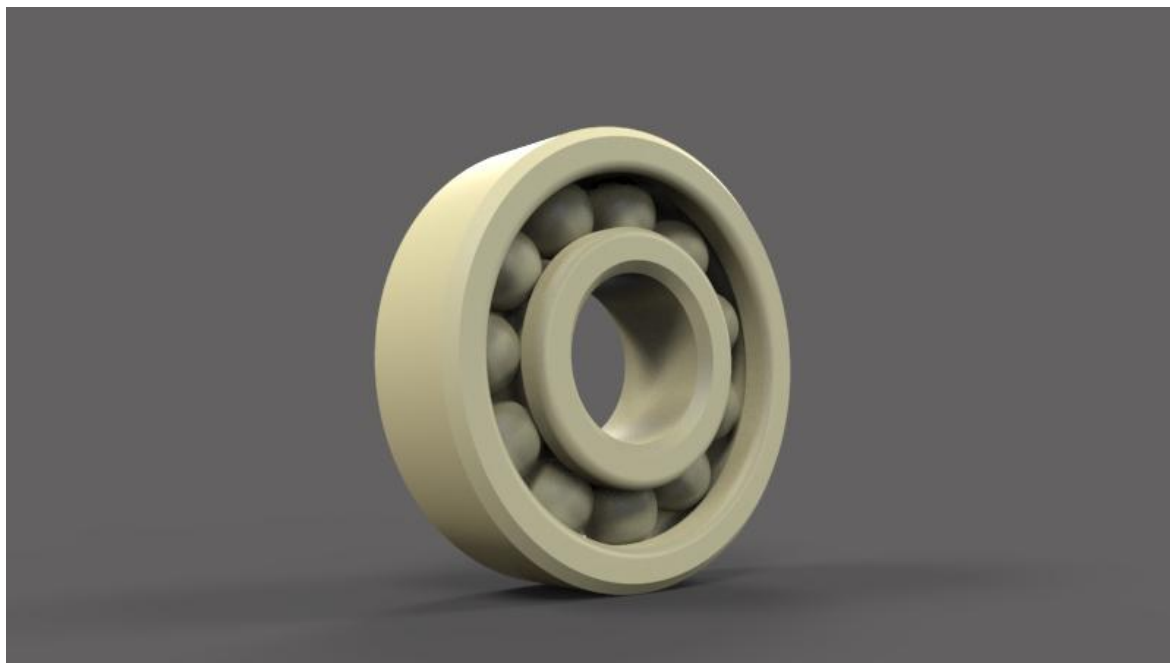
2D pohled byl vytvořen pomocí výše uvedených příkazů, postupným nabalováním jednoduchých příkazů jako např. Line, Circle atp. Po dostatečném vykreslení 2D náčrtu a jeho plném okótování se může přejít z 2D rozhraní do 3D rozhraní pomocí příkazu Finish Sketch, kde se následně pokračuje v modelování.



Obr. 2.3 Vytvoření kuliček ložiska

Legenda k Obr. 2.3:

- 1- Příkaz pro vytvoření nového 2D náčrtu.
- 2- Příkaz pro vytvoření pracovní roviny.
- 3- Příkaz na kruhové pole, pomocí něhož se docílí přesného rozložení kuliček.



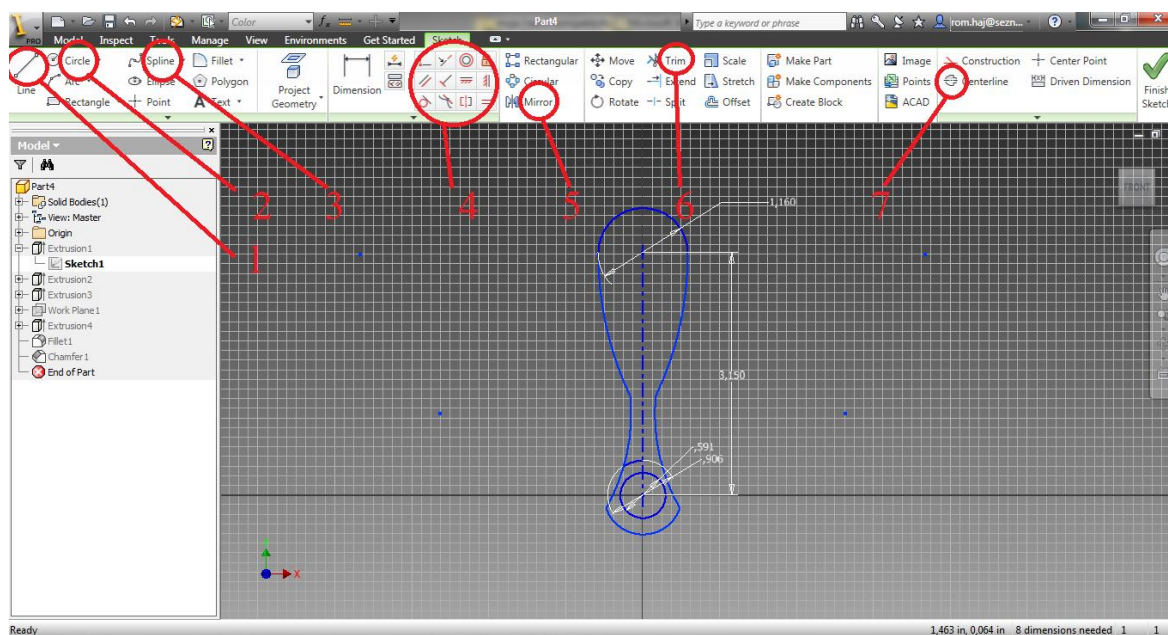
Obr. 2.4 Vyrendrované ložisko

2.3 Modelování kliky

Pro představení využití dalších funkcí Inventoru je vhodné předvést model vytvořený pomocí nejčastěji využívané funkce Extrude, což je funkce sloužící k vytvoření 3D modelu vysunutím 2D náčrtu o daný rozměr vytvořeným konstruktérem.

2.3.1 Náčrt 2D pohledu kliky

Jako každý jiný model se začíná modelovat vytvořením základním 2D náčrtem, při kterém se začalo vytvořením přímky procházející počátkem souřadnicového systému pomocí příkazu Line, následně bylo použito funkce Centerline, která slouží v tomto případě pro zavedení osy souměrnosti. Poté pomocí příkazů Circle, Spline, Trim a s využitím některých geometrických vazeb se vytvoří polovina požadovaného obrysu. Náčrt se dokončí pomocí funkce Mirror sloužící k zrcadlení vybraného půl obrysu kolem zvolené osy souměrnosti. Po uskutečnění se může přejít do 3D rozhraní.



Obr.2.5 Základní 2D náčrt kliky

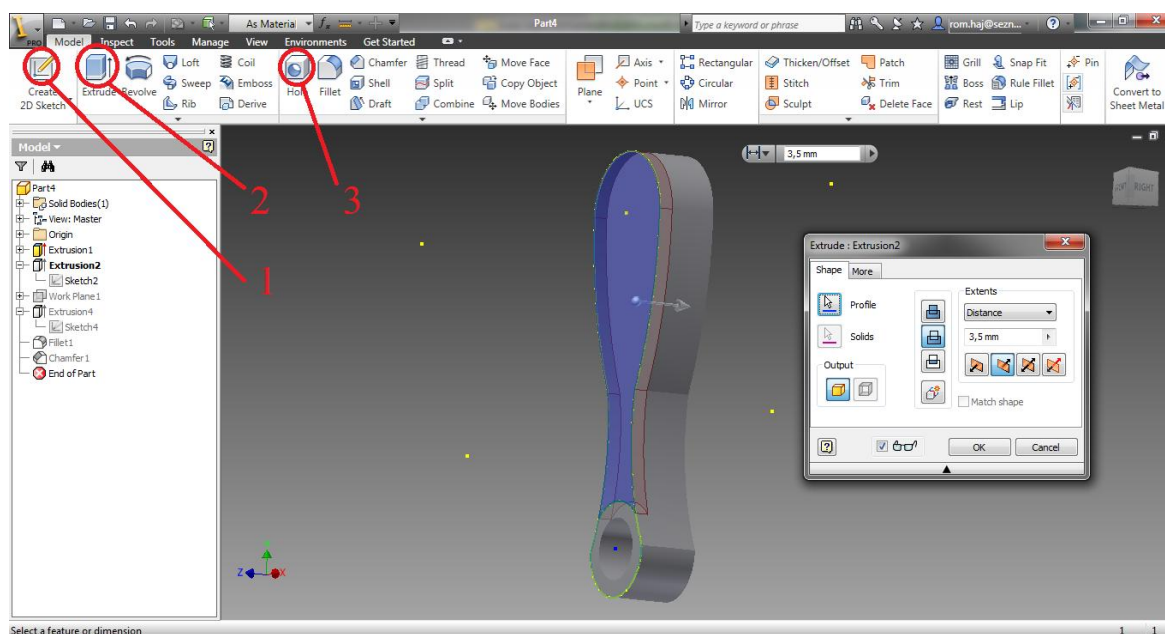
Legenda k Obr. 2.1:

- 1- Příkaz Line, pro vytvoření přímky.
- 2- Příkaz Circle, pro vytvoření kruhu.
- 3- Příkaz Spline, sloužící k vytváření křivek.
- 4- Zde se nachází jednotlivé geometrické vazby.
- 5- Příkaz Mirror k vygenerování zrcadleného obrysu.
- 6- Trim slouží k ořezávání přebytečných částí obrysů.
- 7- Centrline se používá k zavedení osy souměrnosti.

2.3.2 3D model vytvořen funkcí Extrude

Ve 3D rozhraní se pomocí zmíněné funkce Extrude tzv. vysune náčrt do plného či skořepinového tělesa, na jehož jedné z čelních ploch se vytvořil nový náčrt pomocí příkazu Create 2D Sketch, ve kterém se promítla geometrie pomocí funkce Project Geometry a s využitím Circle se nadeřinovala dolní hrana odebírané části modelu. Tím nám vznikla uzavřená plocha umožňující se opět pomocí funkce Extrude odebrat. Obdobně je zhotoven otvor pro hřídel s tím rozdílem, že se v 2D náčrtu použije pouze příkazu Point pro

vytvoření středu požadujícího otvoru, a otvor se vytvoří ve 3D rozhraní pomocí příkazu Hole, kde je na výběr hloubka na daný rozměr nebo skrz, se závitem nebo bez něj a tvar zakončení neprůchozí díry.



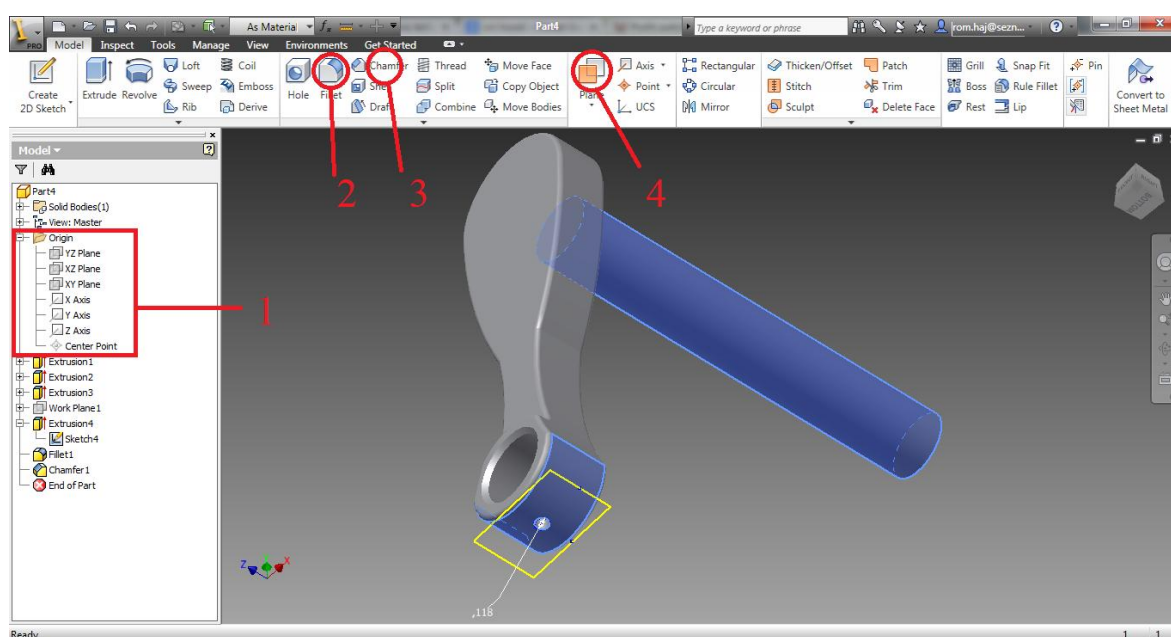
Obr. 2.6 Využití funkce Extrude pro 3D model

Legenda k Obr. 2.1:

- 1- Funkce Create 2D Sketch pro tvorbu nových 2D náčrtů.
- 2- Funkce Extrude umožňující odebírat nebo tzv. vysouvat části modelů.
- 3- Funkce Hole pro vytváření otvorů z předpřipraveného Bodu.

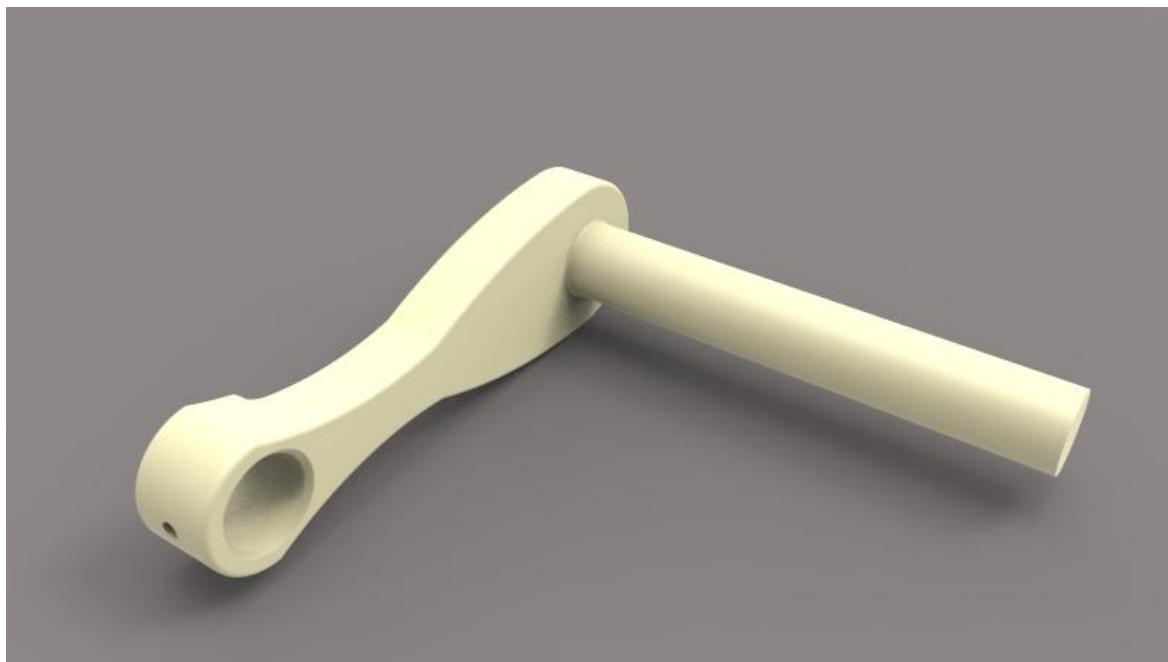
2.3.3 Vytvoření otvoru na válcovitou plochu

Pro zhotovení otvorů na tvarově složité plochy je zapotřebí předem vytvořit pomocnou plochu, na kterou se udělá střed otvoru na dané místo pomocí již známé funkce Point. Pomocná rovina se vloží pomocí příkazu Plane již na předem označenou plochu nebo lze danou plochu vybrat ve stromě již provedených příkazů na levé straně. Následuje opět vytvoření 2D náčrtu, kde se zvolí poloha zmíněného středu otvoru, který je potom využit pro příkaz Hole k vytvoření otvoru. Vedení rukojetě je jednoduše vymodelováno použitím dalšího 2D náčrtu na něhož byl vytvořen kruh, který byl následně vysunut o požadovaný rozměr. Na závěr se provádí různé úkosity a zaoblení s využitím funkcí Fillet a Chamfer. Je vhodné pro otvory volit alespoň nějaké úkosity.



Obr.2.7 Znáornění postupu modelování kliky

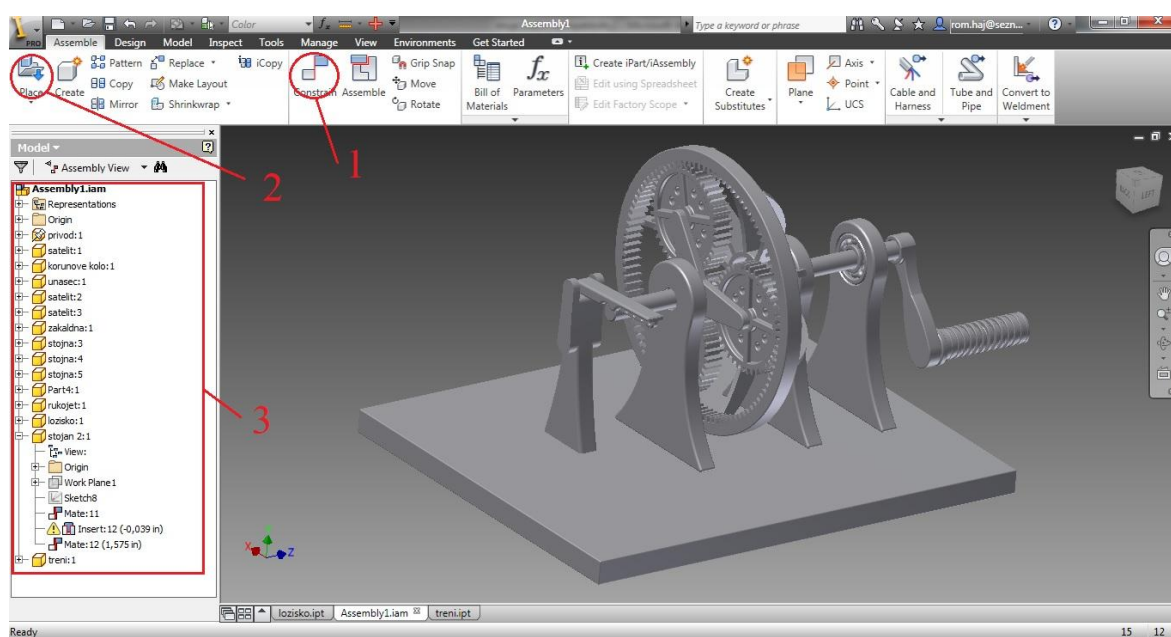
- 1- Strom příkazů s rovinami a s osy modelu.
- 2- Fillet je funkce sloužící pro zaoblování hran modelu.
- 3- Chamfer je funkce sloužící pro zkosení hran pod různými úhly.
- 4- Funkce Plane používaná k vytváření pomocných rovin.



Obr. 2.8 Výrendovaná klicka

2.4 Zkompletování 3D sestavy

Autodesk Inventor nám umožňuje složit jednotlivé součásti do jednoho montážního celku. Tím se zobrazí celá sestava, tak jak bude vypadat ve skutečnosti. Po té se mohou vytvořit výrobní výkresy sestavy i samotných součástí.

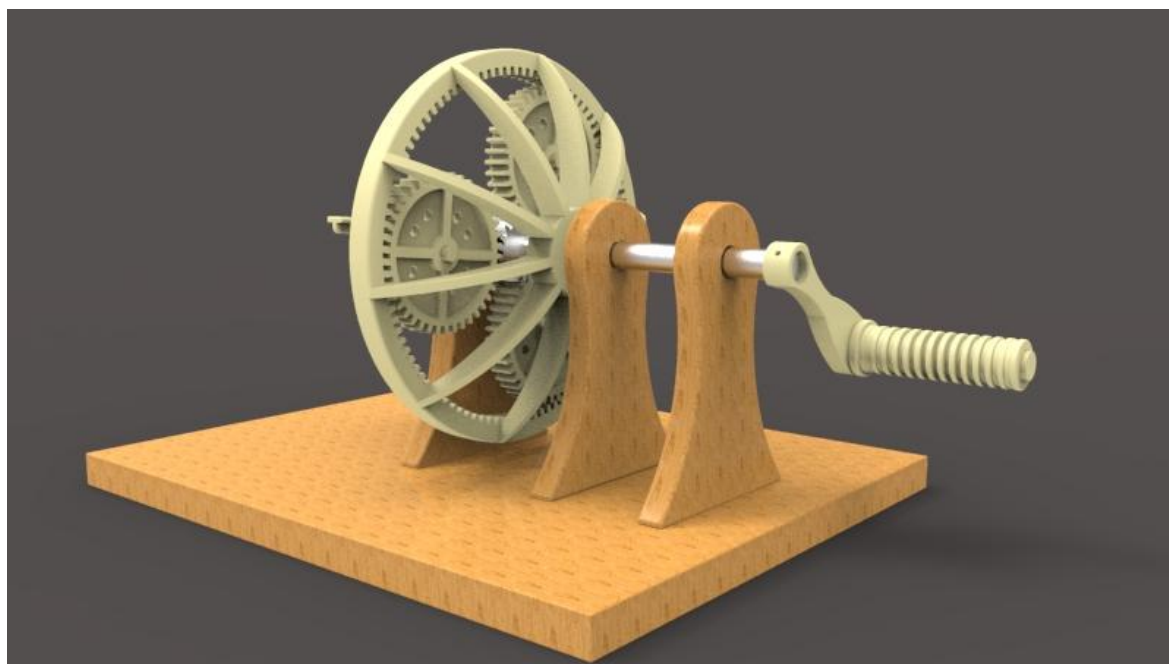


Obr. 2.9 Zobrazení rozhraní pro skládání sestav

Legenda k Obr. 2.9:

- 1- Příkaz pro vazby potřebné ke vzájemnému spojení dvou a více součástí.
- 2- Příkaz pro vložení jednotlivých dílů.
- 3- Strom všech součástí s výpisem jejich předem určených vazeb.

Součásti se vkládají postupně, dle vhodně zvoleného pořadí, v podstatě vždy se začíná základní deskou, od které se odvíjejí další uložení jednotlivých součástí. V programu Autodesk Inventor se dá dále vytvořit animace postupného skládání součástí.



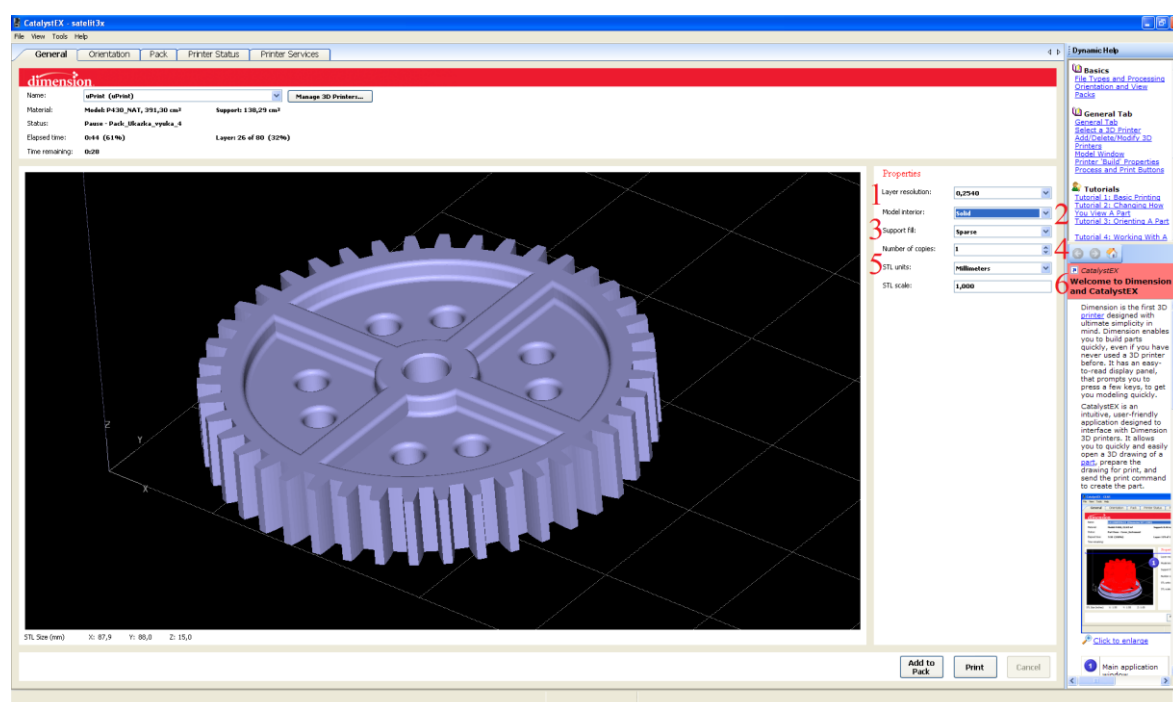
Obr. 2.10 Vyrendrovaný pohled sestavy planetové převodovky

3 PROCES VÝROBY SOUČÁSTÍ

Jak vymodelovat součásti ve 3D bylo vysvětleno v předchozích statích, ale to je pouze začátek celého procesu výroby. Po vymodelování je třeba převést data do srozumitelnějšího formátu pro 3D tiskárnu. Klasickým výstupním formátem z programu Autodesk Inventor je formát .ipt, který není vhodný pro 3D tiskárnu, je tedy zapotřebí uložit dané součásti do formátu .stl, který byl zaveden kvůli datům o trojrozměrném povrchu pro stereolitografii. Tento formát využívá většina 3D tiskáren. Pomocí programu CatalystEX se otevře daná součást, kde se nastaví všechny potřebné parametry pro tisk.

3.1 Příprava dat pro 3D tiskárnu

Po otevření souboru .stl ve zmíněném programu CatalystEX se zobrazí dialogové okno s pěti horními záložky General, Orientation, Pack, Printer Status a Printer Services. Začíná se první záložkou, kde na pravé straně je sloupec vlastností počínaje tloušťkou nanášené vrstvy a konče měřítkem tisku. Součásti byli zhotoveny na 3D tiskárně podporující tloušťku vrstvy 0,01" což odpovídá 0,254mm. Dále se nastavuje vyplnění vnitřního objemu stěn a to v třech možných typech Solid, Sparse-high density a Spare-low density. Pro výrobu součástí bylo použito výplně solid což znamená zcela plné vyplnění, je to tedy nejméně ekonomické s porovnáním ostatních typů výplně. Jako další nastavovaný parametr je druh výplně podpor s výběrem z pěti možných typů Basic, Sparse, Minimal, Break-away a Surround. Pro tisk bylo použito podpor s výplní Sparse, jedná se o řídké vyplnění. Následuje kolonka s počtem kopií. Pátá kolonka slouží k určení jednotek a poslední kolonka je již zmíněné měřítko.

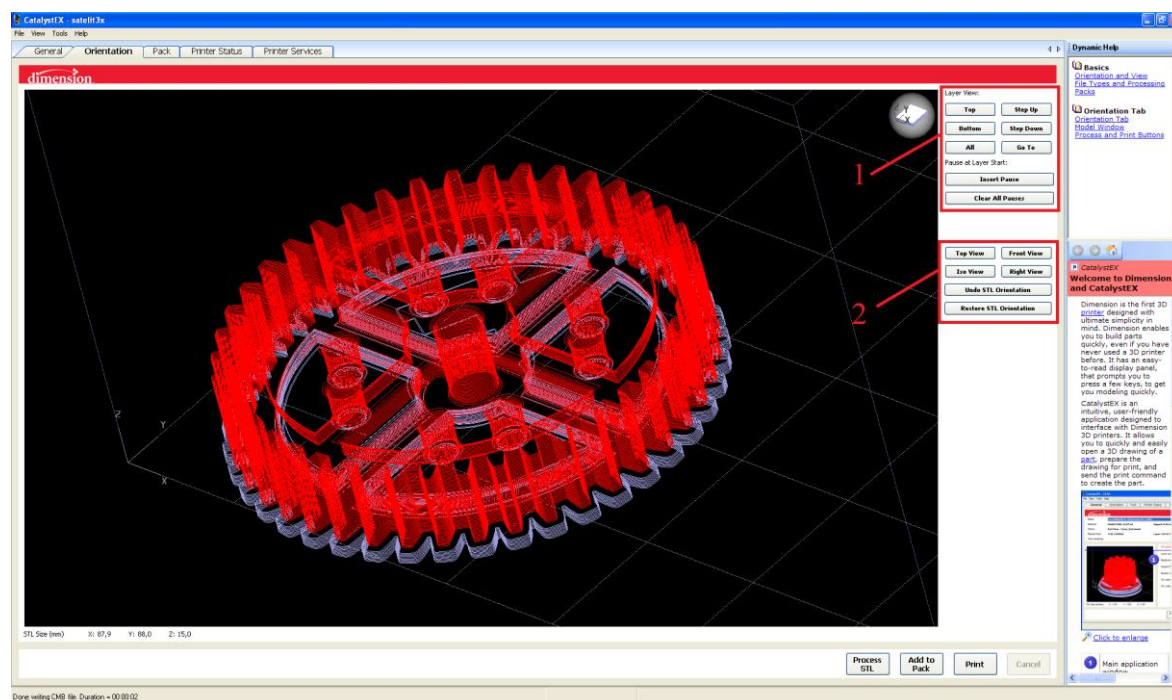


Obr. 3.1 Znárodnění základního nastavení parametrů

Legenda k obr. 3.1:

- 1- Tloušťka vrstvy.
- 2- Nastavení výplně vnitřního objemu stěn.
- 3- Nastavení výplně podpůrného materiálu.
- 4- Počet kopií.
- 5- Nastavení výchozích jednotek.
- 6- Měřítko.

V druhé záložce Orientation se určuje orientace modelu k základní desce, musí se vhodně zvolit poloha součásti vzhledem k množství použitého podpůrného materiálu. Čím méně bude podpůrného materiálu tím budou náklady a výrobní čas nižší. V této záložce je již model vykreslen jednotlivými vrstvy jak bude vyráběn, červené vrstvy představují materiál modelu a šedivé vrstvy znázorňují podpůrný materiál.



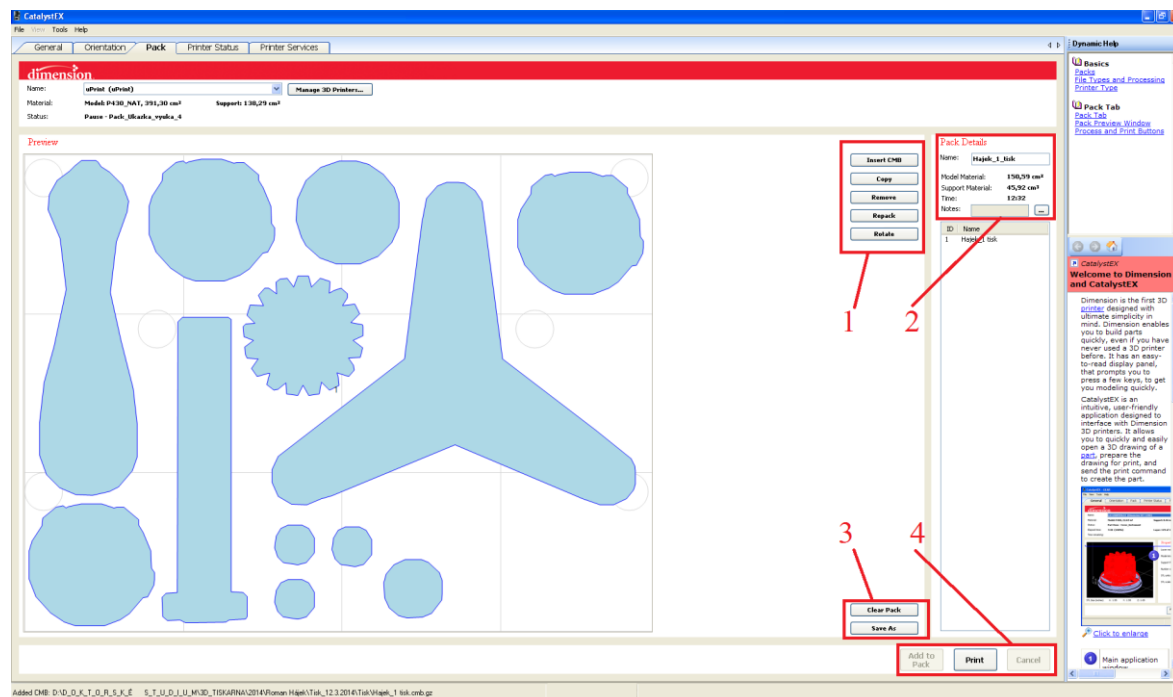
Obr. 3.2 Znáznění orientace modelu k základní desce

Legenda k Obr. 3.2:

- 1- Layer View.
- 2- Funkce pro jednotlivé pohledy.

Poslední podstatnou záložkou je tzv. Pack, sloužící pro rozvržení jednotlivých dílů na základní desku s předem vhodně nadefinovanou orientací. Základní deska, na kterou se tiskne, má rozměry 150x200 mm, tudíž pro zhotovení celé planetové převodovky bylo zapotřebí tisknout na čtyřikrát. V pravém sloupci jsou funkce pro jednotlivé díly a informace o tisku, kolik bude použito podpůrného i hlavního materiálu a potřebný čas pro zhotovení všech dílů na ráz. Na obrázku č. 3.3 je znázorněn první tisk planetové převodovky, mimo jiné se na základní desce nacházejí nepatrné kroužky, které slouží 3D

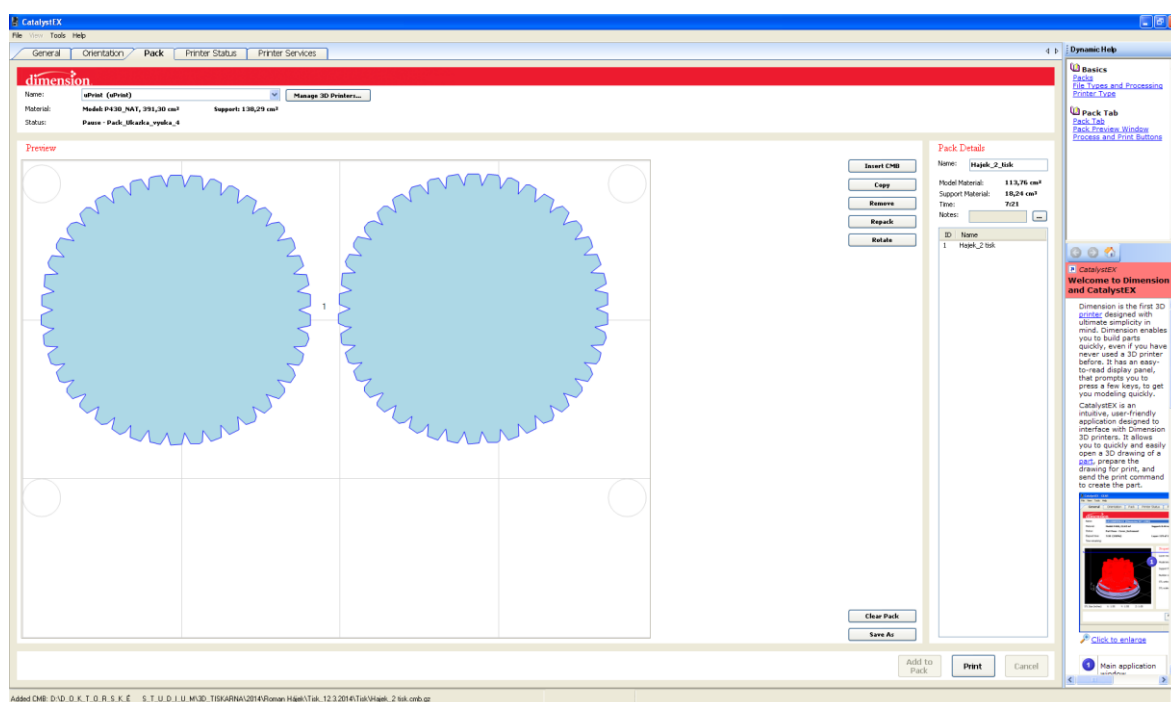
tiskárně pro zorientování se v daném prostoru, tzv. nastavení nuly. Na obrázku č. 3.4 je druhý tisk dvou ozubených kol, bohužel kvůli rozměrovému omezení se muselo poté tisknout samostatně jedno ozubené kolo. Jeden díl, tzv. korunové kolo, muselo být dokonce posláno do externí firmy z důvodu velkých rozměrů.



Obr. 3.3 Znárodnění rozvržení prvního tisku

Legenda k Obr. 3.3:

- 1- Funkce pro vkládání, odstraňování, kopírování a rotaci dílů.
- 2- Informace o tisku, čas a objem použitých materiálů.
- 3- Funkce pro ukládání a vytvoření nového prázdného tisku.
- 4- Funkce Cancel a Print pro spuštění a ukončení tisku.

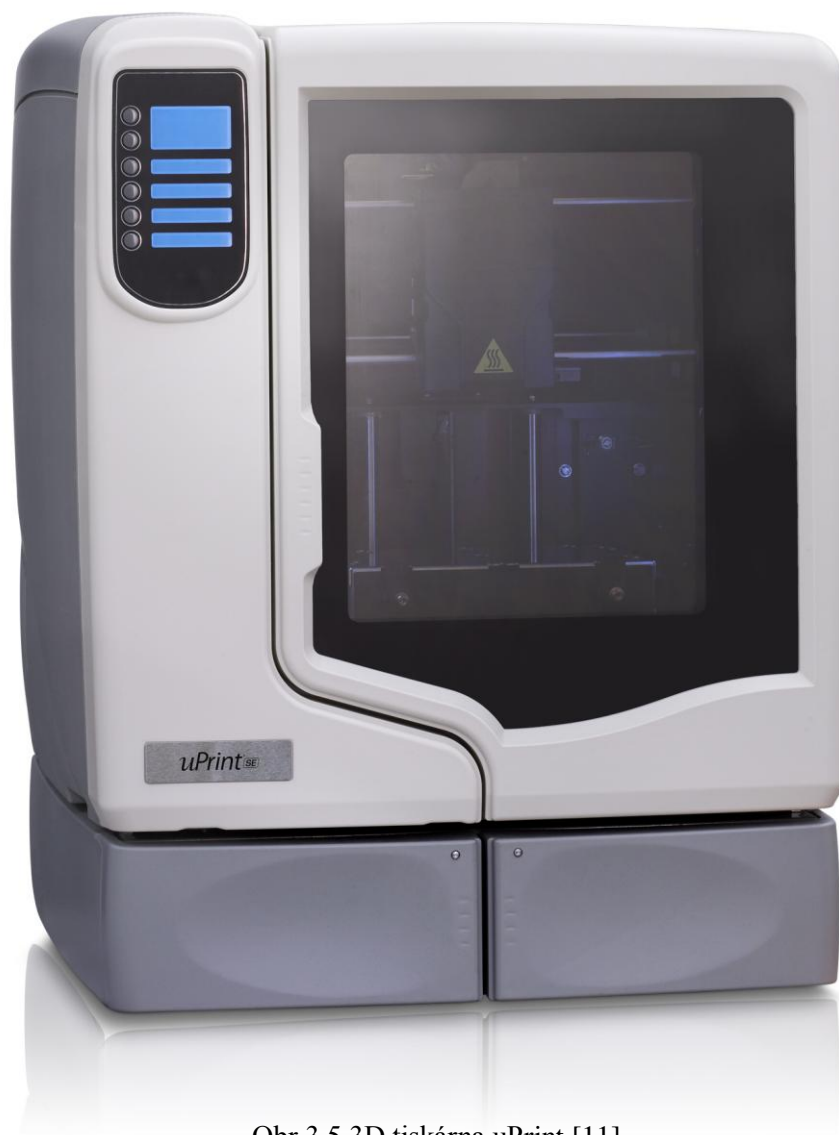


Obr.3.4 Rozvržení druhého tisku

Následující dvě záložky Printer Status a Printer Services slouží k náhledu na stav tiskárny, např. kolik má materiálu v zásobníku a k dodatkovým nastavení tisku, které jsou méně často měněny.

3.2 Zhotovení součástí metodou FDM

Pro výrobu planetové předovky bylo použito metody FDM, která je dostupná ve školních podmínkách. 3D tiskárna od výrobce Stratasys, na které byly zhotoveny díly, používá materiál ABSplus. Tiskárny se vyrábí v různých provedeních co se velikosti a druhů materiálů týče. V dnešní době jich je nepřehledné množství. Tiskárna uPrint od firmy Stratasys má dva zásobníky pro materiály, jeden slouží pro zásobu podpůrného materiálu a druhý pro modelovací materiál. V levé liště se nachází jednoduchý panel pro obsluhu 3D tiskárny. 3D tiskárny mají zpravidla prosklené dvířka, v některých případech mohou být průhledné i boky.[10]

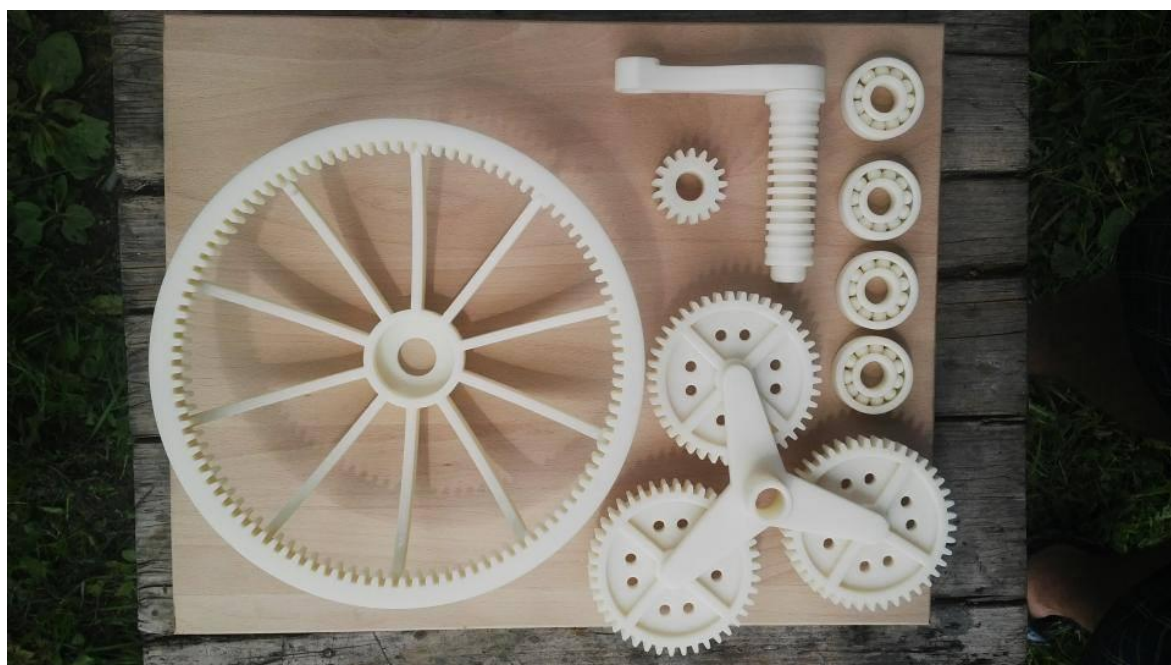


Obr.3.5 3D tiskárna uPrint [11]

Po dokončení tisku, se musí využít tzv. ultrazvuková čistička, pomocí které odstraníme podpůrný materiál, který nám posloužil pouze pro výrobu daných součástí. Ultrazvuková čistička je kovová lázeň naplněná emulzí vody s čisticím roztokem.



Obr.3.6 Ultrazvuková čistička



Obr.3.7 Vyhotovené součásti pomocí metody Rapid Prototyping

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro kusovou výrobu součástí je vhodné použít technologii Rapid Prototyping, používá se tedy především pro zhotovení funkčních prototypu. Pro výrobu planetové převodovky byla tato metoda vybrána z důvodu nejjednodušší výroby, oproti běžným způsobům výroby. Cena použitého materiálu činí 14.40 Kč/1cm³. V tabulce 4.1 je vypsán seznam zhotovených součástí s objemy materiálů a cenou tisku.

Tab. 4.1 Seznam zhotovených součástí pomocí 3D tiskárny

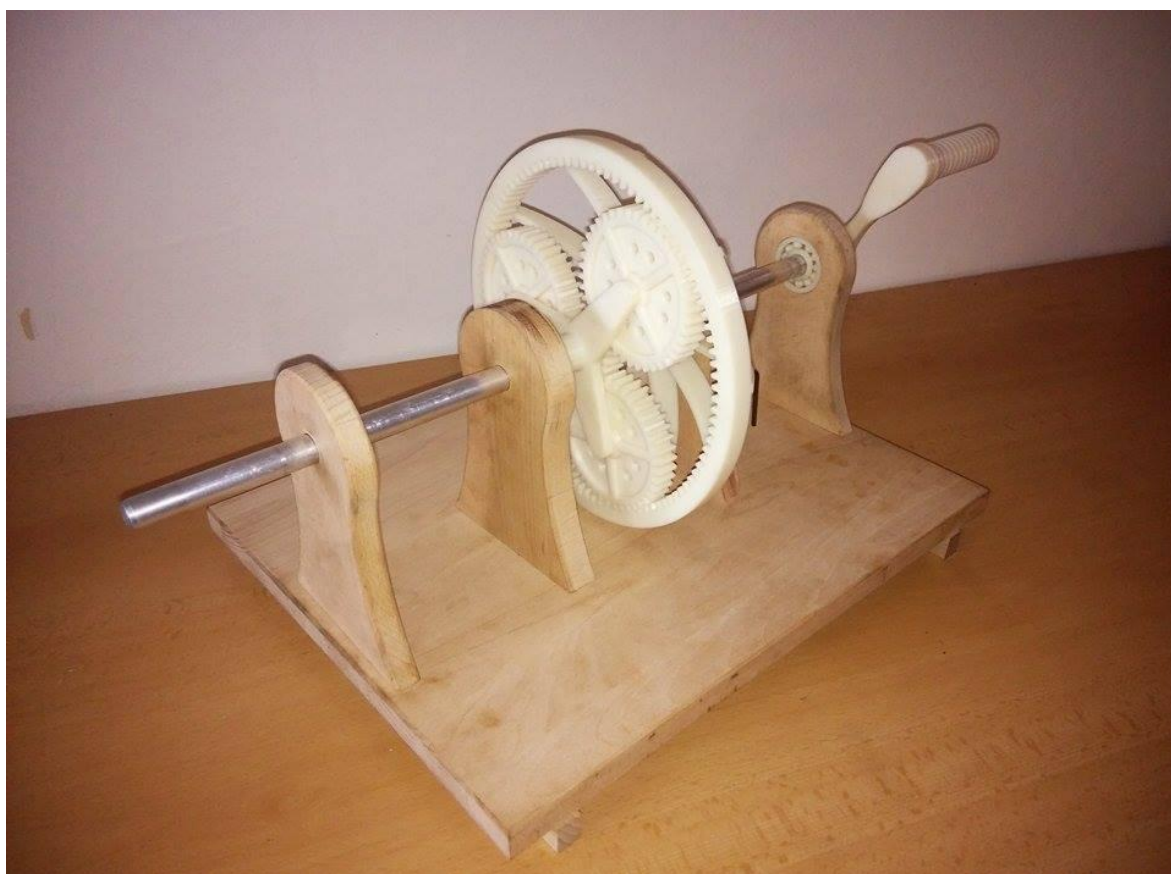
	Hlavní materiál [cm ³]	Podpůrný materiál [cm ³]	Cena tisku [Kč]	Počet
Ložisko	45,65	12,42	836,21	5
Přívod	10,46	3,72	204,19	1
Rukojeť	22,73	4,56	392,98	1
Satelit	170,64	27,36	2 851,20	3
Tření	11,15	4,36	223,34	1
Unašeč	33,06	14,38	683,14	1
Zátka	2,31	0,54	41,04	3
Záslepka	0,93	1,29	31,97	1
Klička	36,86	9,62	669,31	1
Korunové kolo	208,26	321,115	7 623,00	1
Souhrn	542,05	372,01	13 556,38	18

Pro ekonomickou úsporu bylo zvoleno vyrobit ostatní komponenty planetové převodovky ze dřeva běžnými metodami na stolní frézce. Těmito díly byly podpůrné stojany celého mechanického ústrojí a základní deska, která není vhodná pro využití aditivní metody RP. V tabulce níže je uveden pouze objem hlavního materiálu součástí, který by byl použit pro díly zhotovených ze dřeva.

Tab. 4.2 Seznam součástí zhotovených ze dřeva

	Hlavní materiál [cm ³]	Cena tisku [Kč]	Počet
Stojan	516,88	7 443,07	4
Podpora	64,76	932,54	1
Souhrn	581,64	8 375,62	5

Jak je vidět v tabulce 4.2, lze dosáhnout pomocí ostatních metod výroby úspor přesahujících 8000 Kč, když náklady na zhotovení součástí ze dřeva byli takřka nulové. Je třeba si vždy předem stanovit, co je potřebné vyrobit aditivní metodou RP.



Obr. 4.1 Model planetové převodovky

5 DISKUZE

- Všeobecné posouzení

Při vypracování praktické části zejména se jedná o výrobu ložiska pomocí technologie Rapid Prototyping, nastala komplikace s navrhnutím rozměru vůle mezi kuličkou ložiska a samotnou kostrou ložiska. Prvně bylo vytisknuto po odborné konzultaci s expertem obsluhující 3D tiskárnu uPrint, ložisko s vůlí 0,4". Šlo o neznalost, jak bude moci 3D tiskárna vyrobit kuličky ložiska vně kostry a to na jednu jako nerozebíratelnou součást. Po prozkoumání zhotoveného ložiska, kdy se zjistilo, že kuličky ložiska dočista plavaly v kostře, se usoudilo, že se může vůle snížit. Upravil se tedy model a nechalo se vytisknout ložisko s vůlí 0,3", které vykazovalo lepší funkčnost nežli předešlé ložisko s vůlí 0,4". Přece jen se zdálo, že by se mohla ještě vůle snížit, nechalo se tedy experimentálně vyrobit ložisko s vůlí 0,2". Poslední zmíněné ložisko se vyrobilo v pořádku, nemuselo už to být v rozlišovací schopnosti použité 3D tiskárny. Toto ložisko plně postačuje pro splnění funkce v planetové převodovce, nebude nijak extrémně zatěžováno ani zahříváno, což by plastovému výrobku mohlo škodit. Krouticí moment u modelu planetové převodovky bude zatím vyvozen ručně, tudíž budou otáčky nízké.

Také nastal problém s výrobou korunového kola, které má příliš velké rozměry pro zhotovení ve školou poskytnuté 3D tiskárně. Korunové kolo se muselo tedy nechat zhotovit v externí firmě. Korunové kolo je nejdražší položkou při stavbě planetové převodovky. Bylo na něj spotřebováno 208,26 cm³ stavebního materiálu a 322,12 cm³ podpůrného materiálu v celkové ceně 7 623 Kč.

- Možnosti dodatečných úprav výrobku

Z hlediska časové náročnosti se nestihlo experimentálně vyrobit ložisko s vůlí nižší než 0,2", což by bylo zajímavé do budoucna vyzkoušet, až do jaké míry bude schopna 3D tiskárna tak přesná. Zjištění tohoto parametru usnadní navrhování při dalších projektech. Pro porovnání se nechalo zhotovit ložisko rozdílnou metodou poskytnutou firmo Honeywell, při stejné vůli.

Co se týče pohonu planetové převodovky, je v plánu přidat elektromotor, který se bude regulovat dle potřeby. Zjistí se, jak budou snášet ložiska vyrobená z plastu vyšší otáčky, popřípadě se může zjistit životnost v závislosti na otáčkách, ale muselo by se vyrobit víc zkušebních vzorků. Také by mohlo inovací projít potřebné blokování korunového kola potřebné pro chod planetové převodovky. Mohlo by se jednat o elektromagnetické brzdění použitím malých magnetů ve skládaných po obvodu korunového kola se spínaným magnetem přidělaným k základní desce.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření vzorku součásti aditivní technologií Rapid Prototyping, která si našla uplatnění ve více oblastech průmyslu, počínaje lékařstvím až po stavebnictví. Metoda Rapid Prototyping je ve strojírenství vhodná z hlediska ceny materiálu zatím převážně pro výrobu prototypů. Pro příklad využití této metody výroby ve strojírenství byl vytvořen model planetové převodovky. Planetová převodovka nese svůj název podle obíhajících satelitů mezi centrálním a korunovým kolem, což připomíná pohyb planet. V praxi se využívá pro konstrukci velkých převodových poměrů.

V první části bylo představeno shrnutí dnes běžně používaných aditivních metod Rapid Prototyping, stručný popis základních principů daných metod, používané materiály pro výrobu a přehledná schémata jednotlivých metod. Dále bylo vysvětleno, jak se postupuje při navrhování a vytváření 3D modelu za pomoci Autodesk Inventoru. Předposlední kapitola popisuje převod do formátu podporovaného 3D tiskárnou, nastavení jednotlivých parametrů tisku, a popis 3D tiskárny uPrint. V poslední kapitole bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, kde je vysvětlené, jak se mohou ušetřit náklady na výrobu modelu planetové převodovky jakožto učební pomůcky.

Na výrobu hlavních součástí modelu planetové převodovky bylo použito 3D tiskárny uPrint. Zbývající části byly zhotoveny pomocí NC frézy a dokončeny ručními nástroji. Tím bylo ušetřeno značné množství materiálu. Celková úspora činila 38% objemu. V porovnání s konvenční jednorázovou výrobou součásti např. korunového kola s vnitřním ozubením s přímými zuby by se musel zprvu vytvořit odlitek, a až po té obrobít zubové mezery, proto je výhodnější použít metodu Rapid Prototyping, u které není potřeby návrhu formy, a potřebné dokončovací operace.

Technologie Rapid Prototyping je a bude nezastupitelnou výrobní technologií, která představuje zcela nový pohled na výrobní postupy jak pro profesionální použití výroby funkčních prototypů, tak do budoucna pro běžné domácí použití.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Custompartnet. *Fused Deposition Modeling* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>.
- [2] Stratasys. *FDM materiály* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.objet.cz/materialy/materialy-fdm>>.
- [3] Custompartnet. *Stereolithography* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>.
- [4] Laserproto. *Stereolithography Materials* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.laserproto.com/services/stereolithography/Stereolithography-Materials>>.
- [5] Elizabeth Palermo. Livescience. *Stereolithography* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.livescience.com/38190stereolithography.html>>.
- [6] Custompartnet. *Selective Laser Sintering* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>.
- [7] Lasersintering. *Laser Sintering Material* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.lasersintering.com/sls-material.php>>.
- [8] Custompartnet. *Laminated Object Manufacturing* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.
- [9] Robert Navrátil. *Multi Jet Modelling* [online]. [cit. 04-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main11.html>>.
- [10] MCAE SYSTEMS, spol. s r.o., Kuřim, ČR. *Dimension uPrint* [online]. [vid. 2012-04-23]. Dostupné z <http://www.mcae.cz/dimension-uprint>.
- [11] Stratasys. *Uprint SE* [online]. [cit. 10-05-2014]. Dostupné na WWW: <<http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se>>.
- [12] JAMES O. HAMBLÉN, James O. Tyson S. *Rapid prototyping of digital systems*. 2nd ed. New York: Springer, 2007. ISBN 03-877-2670-5.
- [13] KAMRANI, Ali K a Emad Abouel NASR. *Rapid prototyping: theory and practice*. New York, N.Y.: Springer, c2006, xxxiii, 323 p. ISBN 978-038-7232-911.
- [14] VENUVINOD, Patri K a Weiyin MA. *Rapid prototyping: laser-based and other technologies*. Boston: Kluwer Academic, 2004, xviii, 389 p. ISBN 14-020-7577-4.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	Dvourozměrný
3D	[-]	Trojrozměrný
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
Al	[-]	Aluminium
CAD	[-]	Computer Aided Design
ESD	[-]	ElectroStatic Discharge
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
FR	[-]	Flame Resistance
Inco	[-]	Nickel-chromium
ISO	[-]	International Organization Standar.
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
MJM	[-]	Multi Jet Modeling
PC	[-]	Polycarbonate
PP	[-]	Polypropylene
PPSF	[-]	Polyphenylsulfone
RP	[-]	Rapid Prototyping
SL	[-]	Stereolitografie
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
Ti	[-]	Titanium
UV	[-]	Ultra Violet

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

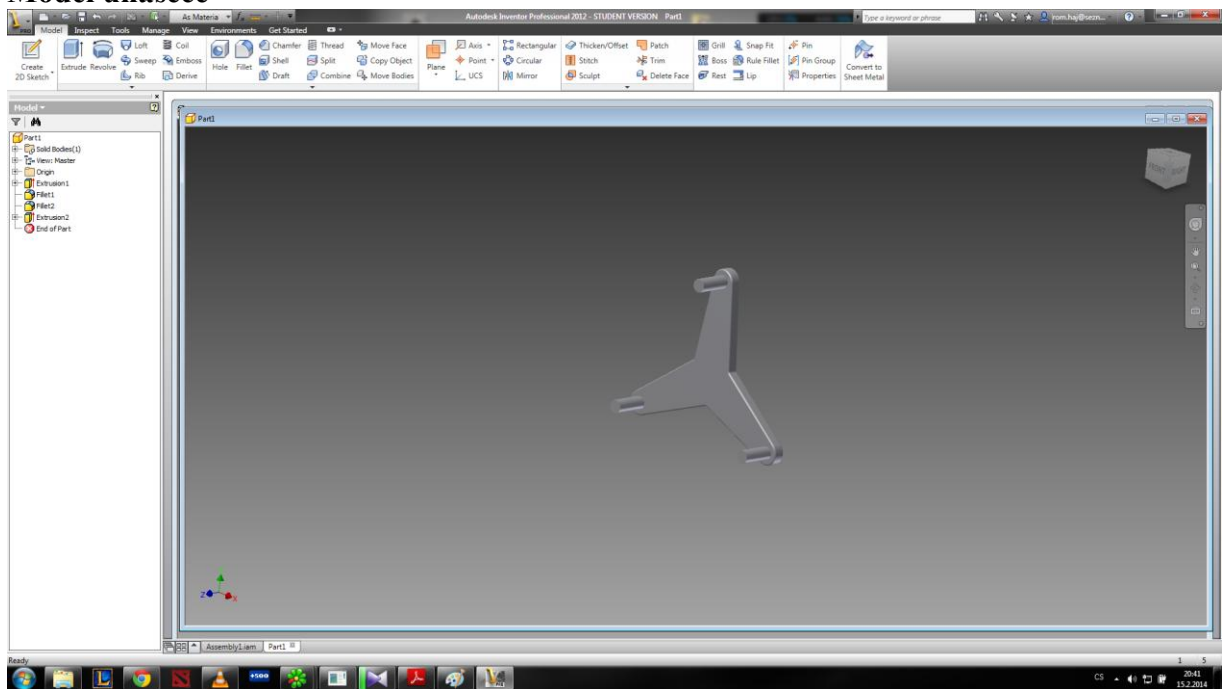
Symbol	Jednotka	Popis
c	[mm]	hlavová vřle
d_1	[mm]	roztečná kružnice pastorku
d_{1h}	[mm]	hlavová kružnice pastorku
d_{1p}	[mm]	patní kružnice pastorku
d_2	[mm]	roztečná kružnice satelitu
d_{2h}	[mm]	hlavová kružnice satelitu
d_{2i}	[mm]	předběžná roztečná kr. satelitu
d_{2p}	[mm]	patní kružnice satelitu
d_3	[mm]	roztečná kružnice korunového kola
d_{3h}	[mm]	hlavová kružnice korunového kola
d_{3i}	[mm]	předběžná roztečná kr. korunového kola
d_{3p}	[mm]	patní kružnice korunového kola
m	[-]	modul
R_m	[MPa]	Pevnost v tahu
z_1	[-]	počet zubů pastorku
z_2	[-]	počet zubů satelitu
z_3	[-]	počet zubů korunového kola

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Model unášeče
Příloha 2	Model planetového soukolí
Příloha 3	Model planetového soukolí s nábojem
Příloha 4	Zobrazení pracovního prostředí programu Catalyst EX
Příloha 5	Klička
Příloha 6	Ložisko
Příloha 7	Unášeč se satelity
Příloha 8	Model planetové převodovky

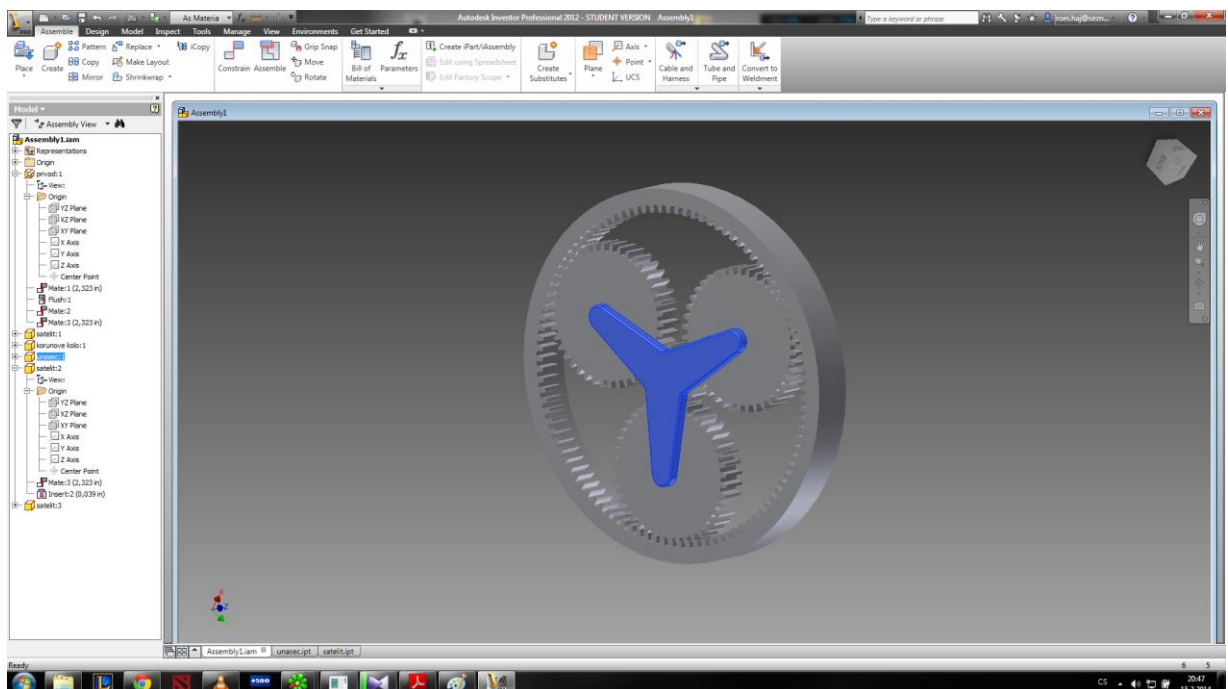
PŘÍLOHA 1

Model unášeče



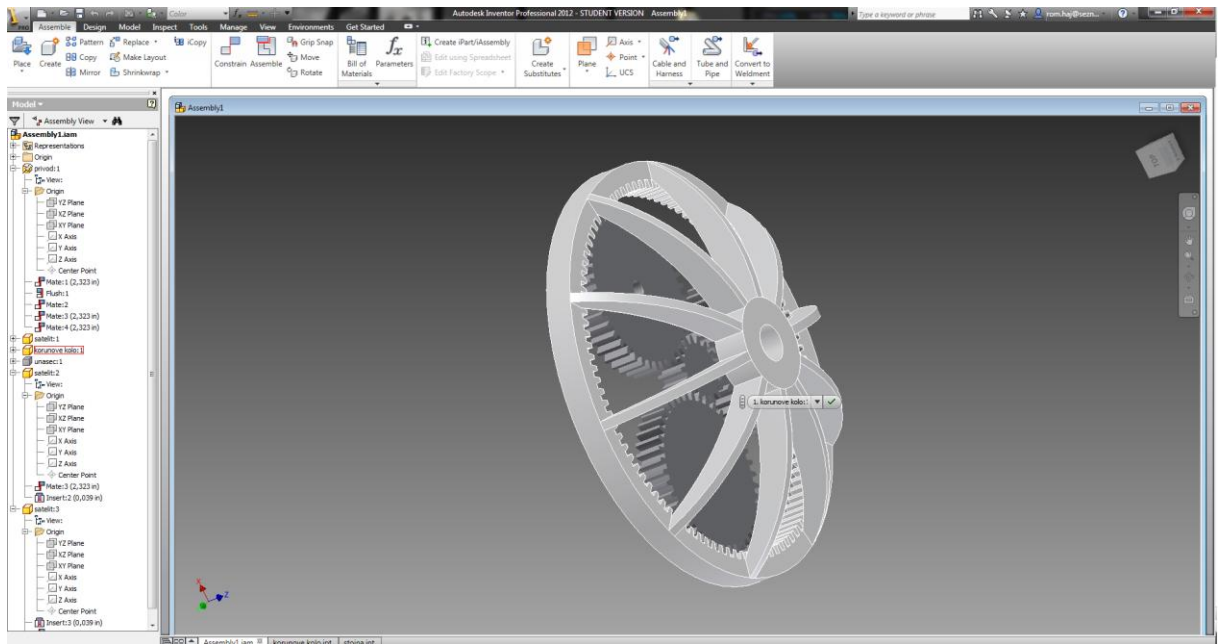
PŘÍLOHA 2

Model planetového soukolí



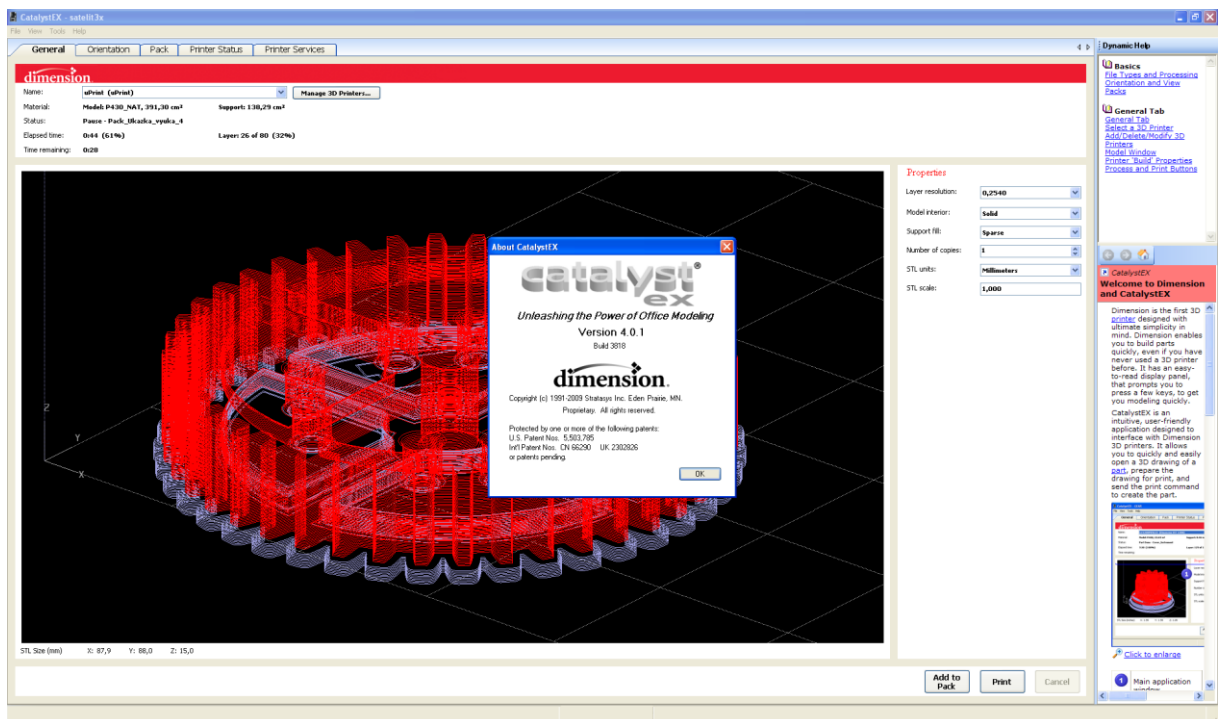
PŘÍLOHA 3

Model planetového soukolí s nábojem



PŘÍLOHA 4

Zobrazení pracovního prostředí programu Catalyst EX



PŘÍLOHA 5

Klička



PŘÍLOHA 6

Ložisko



PŘÍLOHA 7

Unašič se satelity



PŘÍLOHA 8

Model planetové převodovky

