

Porovnávání rozměrové přesnosti dílů vyrobených pomocí aditivní metody FDM

Tomáš Patsch

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta managementu a ekonomiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta managementu a ekonomiky
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Patsch**
Osobní číslo: **M17939**
Studijní program: **B6209 Systémové inženýrství a informatika**
Studijní obor: **Řízení výroby a kvality**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Porovnávání rozměrové přesnosti dílů vyrobených pomocí aditivní metody FDM**

Zásady pro vypracování

Úvod

Definujte cíle práce a použité metody zpracování práce.

I. Teoretická část

- Proveďte literární rozbor aditivních technologií s důrazem na aditivní metodu FDM a použité aditivní materiály.

II. Praktická část

- Navrhněte a vyrobte normalizované vzorky a proveďte měření rozměrové přesnosti.
- Proveďte porovnání a zpracování výsledků.
- Zhotovte příklad prototypového modelu a zhodnotte ekonomickou výhodnost procesu.

Závěr

Rozsah bakalářské práce: **cca 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers, 2016, 591 s. ISBN 978-1-56990-582-1.
CHUA, Che Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 978-80-251-4876-1.
SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 444 s. ISBN 978-1-4987-1477-8.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **6. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2020**

L.S.

doc. Ing. David Tuček, Ph.D.
děkan

Ing. Eva Juříčková, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. ledna 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na elektronickém nosiči v příruční knihovně Fakulty managementu a ekonomiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s tím, že pokud je uzavřena licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

1. že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
2. že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

Jméno a příjmení:

.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl porovnání rozměrové přesnosti dílů vyrobených pomocí technologie *Rapid Prototyping* a konstrukci prototypového modelu.

Modely pro měření rozměrové přesnosti byly navrženy v parametrickém programu *SolidWorks* a upraveny pro tisk v programu *CatalystEX*. Vytisknuty byly na 3D tiskárně *Dimension uPrint* z materiálu ABSplus aditivní metodou *Fused Deposition Modeling*.

Model prototypu byl vytvořen s využitím technologie reverzního inženýrství skutečné lidské lebky a byl vytisknut z materiálu fotopolymeru na tiskárně *Kelant s400* aditivní metodou *Stereolitografie*. V závěru práce je ekonomické zhodnocení různých možností výroby.

Klíčová slova: Rozměrová přesnost, Rapid Prototyping, SolidWorks, 3D tisk, Fused Deposition Modeling, lebka, Stereolitografie

ABSTRACT

The thesis aims to comparing the dimensional accuracy of parts manufactured using *Rapid Prototyping* technology and the construction of a prototype model.

Dimensional accuracy models were designed in the *SolidWorks* parametric program and adapted for printing in *CatalystEX*. They were printed on a *Dimension μPrint* out of PLA material via the additive method of *Fused Deposition Modeling*.

The prototype model was created by reverse engineering of a real human skull and printed out of photopolymer material on a *Kelant s400* printer using *Stereolithography*. At the end of the thesis there is an economic evaluation of various production possibilities.

Keywords: Dimensional accuracy, Rapid Prototyping, SolidWorks, 3D Printing, Fused Deposition Modeling, skull, Stereolithography

Děkuji vedoucímu práce docentu Ing. Josefu Sedlákovu, Ph.D. za cenné rady, připomínky, odborné vedení bakalářské práce a pomoc při realizaci 3D tisku. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za pomoc a rady při výrobě 3D modelů.

Chtěl bych také poděkovat mé rodině, která mě podporovala ve vysokoškolském studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 RAPID PROTOTYPING	12
1.1 ADITIVNÍ METODA FUSED DEPOSITION MODELING.....	16
1.1.1 Vybrané materiály používané pro technologii <i>Fused Deposition Modeling</i>	17
1.2 ADITIVNÍ METODA STEREOLITOGRAFIE.....	18
1.3 OSTATNÍ METODY <i>RAPID PROTOTYPING</i>	19
1.3.1 Laserové spékání.....	19
1.3.2 Aditivní metoda <i>Laminated Object Manufacturing</i>	19
1.3.3 Aditivní metoda <i>MultiJet Fusion</i>	20
1.3.4 Aditivní metoda <i>PolyJet</i>	21
1.3.5 Aditivní metoda <i>Solid Ground Curing</i>	21
2 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	23
2.1 TECHNOLOGIE SLÉVÁRENSTVÍ.....	23
2.2 OBLAST ZDRAVOTNICTVÍ	25
2.3 AUTOMOBILOVÝ A LETECKÝ PRŮMYSL	26
2.4 BUDOUCÍ PRŮMYSLOVÉ APLIKACE	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
3 NÁVRHY VZORKŮ PRO MĚŘENÍ PŘESNOSTI	29
3.1 PARAMETRICKÝ PROGRAM SOLIDWORKS	29
3.2 PROGRAM CATALYSTEX.....	30
3.3 POSTPROCESSING MODELŮ	35
4 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	36
4.1 3D TISKÁRNA DIMENSION UPRINT	36
4.2 3D TISKÁRNA REPRAP SINUHED	37
4.3 3D TISKÁRNA DA VINCI 2.0.....	40
4.4 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ DAT	41
5 NÁVRH PROTOTYPOVÉHO MODELU	44
5.1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ.....	44
5.2 PROCESSING A POSTPROCESSING PROTOTYPU.....	46
6 ZHODNOCENÍ EKONOMICKÉ VÝHODNOSTI	48
6.1 NÁKLADY NA VÝROBU PROTOTYPU ADITIVNÍ METODOU STEREOLITOGRAFIE	48

6.2	KOMERČNÍ VÝROBA LEBKY	48
6.3	NÁKLADY NA TISK ZMENŠENÉHO PROTOTYPOVÉHO MODELU.....	50
6.4	SOUČASNÝ TRH	50
ZÁVĚR		51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		56
SEZNAM OBRÁZKŮ		58
SEZNAM GRAFŮ		60
SEZNAM TABULEK.....		61
SEZNAM PŘÍLOH.....		62
6.5	PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY REFERENČNÍCH VZORKŮ KOULÍ Z TISKÁRNY DIMENSION UPRINT (ABSPLUS)	63
6.6	PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY REFERENČNÍCH VZORKŮ KOULÍ Z TISKÁRNY REPRAP SINUHED (PLA)	65
6.7	PŘÍLOHA P III: NAMĚŘENÉ HODNOTY REFERENČNÍCH VZORKŮ KOULÍ Z TISKÁRNY DA VINCI 2 (ABS)	67

ÚVOD

V dnešní době snad každý slyšel o možnostech 3D tisku. Metody 3D tisku spadající pod technologii Rapid Prototyping se velmi rychle vyvíjejí a zdokonalují. Stejně jako materiál vhodný pro 3D tisk. Lze použít nejen různé druhy plastů, ale i keramiku, kov, beton či lidské kmenové buňky. Otevírají se nové a nové způsoby využití v průmyslové i v soukromé sféře. (Rapid prototyping, 2017)

Technologie Rapid Prototyping představuje rychlou a levnou výrobu prototypových modelů. Velkou výhodou oproti klasickým metodám obrábění je, že pomocí technologií 3D tisku lze vytvořit mnohem složitější tvary, než by bylo možné obráběním. Aditivní metoda Rapid Prototyping nabízí efektivní řešení prototypové výroby nejen pro velké firmy, ale i pro malé podnikatelské subjekty a organizace. Existuje mnoho metod 3D tisku, každá z nich má své klady i zápory. (Rapid prototyping, 2017)

Práce je zaměřena především na nejběžnější metodu 3D tisku – *Fused Deposition Modeling*. Seznamuje s principem metody a v praktické části se věnuje porovnání rozměrové přesnosti tisku touto metodou. K výrobě referenčních vzorků byly použity různé materiály a zařízení.

Schopnost dosáhnout přesných detailů je demonstrována na modelu lebky. Skutečná lidská lebka byla digitalizována 3D skenerem a vytisknuta pomocí aditivní metody *Stereolitografie*.

Cílem bylo prokázat vysoce přesnou a detailní výrobu.

CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je návrh a výroba modelů, pro měření rozměrové přesnosti, za použití aditivní technologie Rapid Prototyping. Návrhy byly vytvořeny pomocí parametrického modelovacího CAD programu SolidWorks. Modely byly vytisknuty na tiskárnách Dimension uPrint, RepRap Sinuhed a da Vinci 2.0 s využitím aditivní metody Fused Deposition Modeling.

Dalším cílem byla výroba prototypového modelu reálné lidské lebky za použití technologie reversního inženýrství. Pro tisk byla použita aditivní metoda Stereolitografie a tiskárna Kelant s400.

V závěru práce je uvedené ekonomické zhodnocení výroby prototypového modelu a porovnání s komerční výrobou.

I. TEORETICKÁ ČÁST

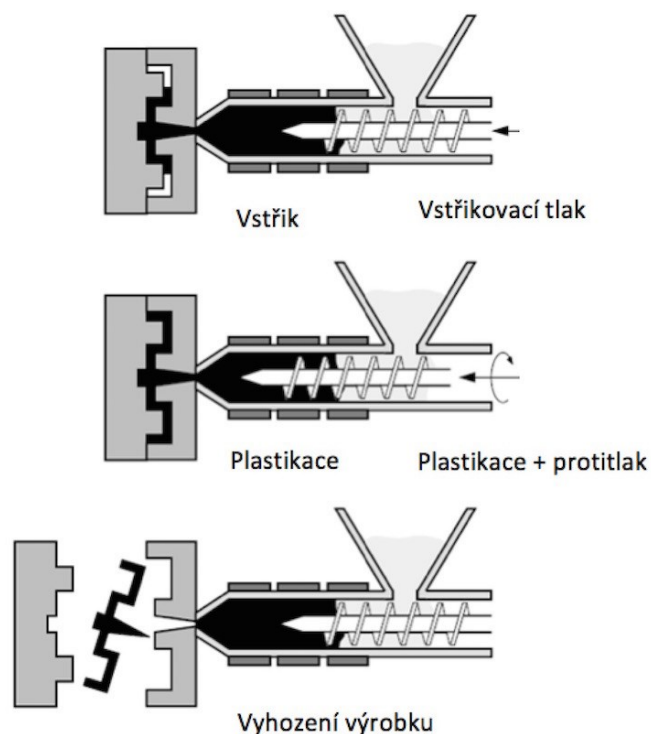
1 RAPID PROTOTYPING

„Termínem Rapid Prototyping (RP) jsou od poloviny 80. let minulého století označovány technologie, které výrobek vytváří neklasickými postupy – obvykle tzv. vrstveným (aditivním) procesem. Při tomto způsobu výroby se neodebírá z polotovaru materiál s cílem získat konečný tvar výrobku (jako například při obrábění) ani se materiál nepřidává najednou (například při odlévání). Konečný tvar výrobku se získá poskládáním vrstev, na které je výrobek rozřezán.“ (3D tech, 2016)

Existují tři základní výrobní procesy – aditivní, substraktivní a formativní. Tyto procesy lze navzájem kombinovat.

Během substraktivního výrobního procesu je nutno počítat s větší spotřebou materiálu. Postupným odebráním materiálu vznikne daný výrobek. Substraktivní výrobní procesy představují různé formy obrábění – vrtání, frézování, řezání laserovým a vodním paprskem a další.

Při formativním procesu jsou využívány formy, které mohou vzniknout jinou metodou RP. Do forem se tvaruje požadovaný materiál pomocí vstřikolísování (viz Obr. 1), ohýbání, kování, tváření a dalších metod. (Chua, Leong a Lim, 2010)



Obr. 1 Průběh metody vstřikolísování plastů (Technologie zpracování plastů)

Aditivní proces je založen na postupném přidávání materiálu tak, aby vznikl finální produkt. Jedná se například o slinování a 3D tisk. Tavitelný vstupní materiál umožňuje správné zpracování. (Kloski a Kloski, 2017)

Aditivní výrobní proces byl použit při tisku referenčních vzorků k měření rozměrové přesnosti.

Proces RP lze rozdělit na tři fáze – *Preprocessing*, *Processing* a *Postprocessing*.

Preprocessing

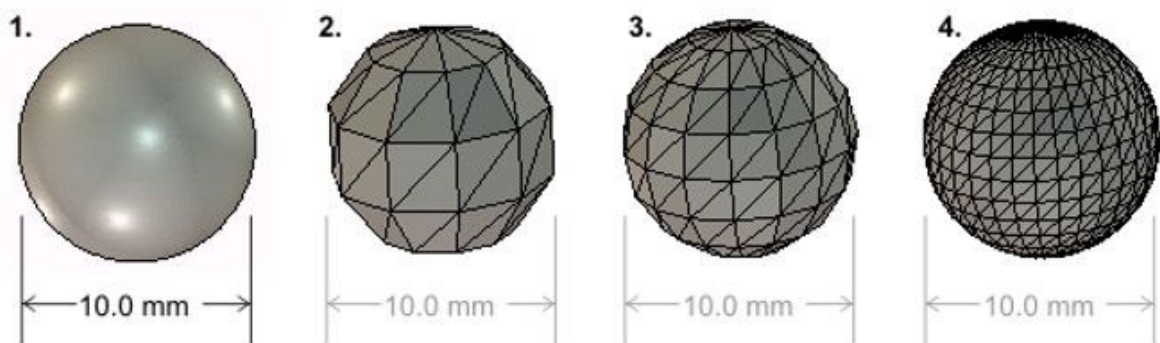
V této fázi se navrhuje samotný výrobek v počítači. K vytvoření požadovaného tvaru existuje různý modelovací software (CAx programy). Pokud se ovšem jedná o složitější tvar, nebo je žádoucí dosáhnout co největších detailů, lze využít technologii reverzního inženýrství.

„V procesu reverzního inženýrství jde o získání 3D tvaru jakéhokoliv fyzického objektu a vytvoření 3D CAD modelu pro design, výrobu nového modelu, nebo analýzu součásti. Nasnímaná data mohou být dále upravena na CAD plošné nebo objemové modely, které lze načíst v libovolném CAD systému.“ (SolidVision, 2010)



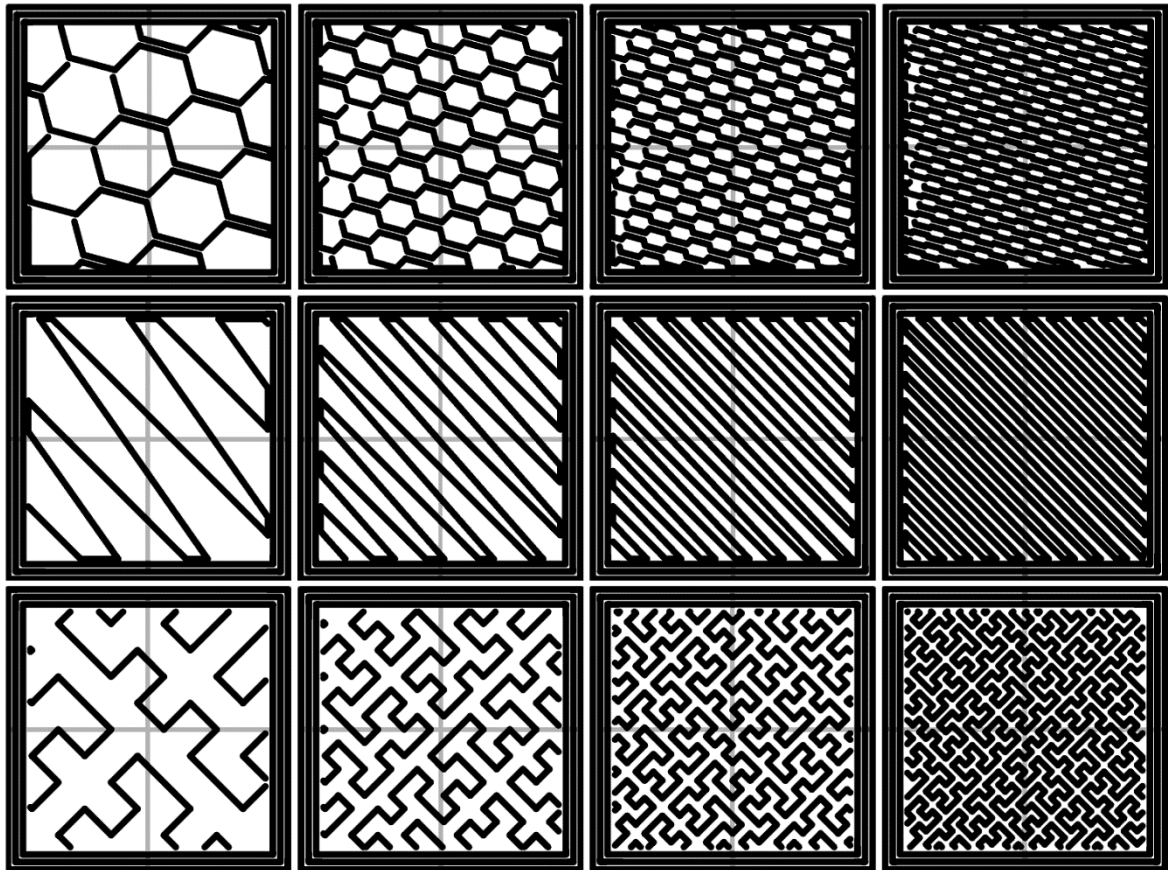
Obr. 2 Průběh 3D skenování objektu bezdrátovým skenerem (Shining 3D announces two wireless handheld 3D scanners, 2018)

Nasnímaná data (viz Obr. 2) se poté převedou do formátu STL, který využívá většina 3D tiskáren. Při převádění dat na formát STL je model přetvořen na soubor trojúhelníkových plošek. Čím složitější a detailnější model je požadován, tím více bude vytvořených rovinných trojúhelníkových plošek (viz Obr. 3). Každý trojúhelník je určený třemi souřadnicemi vrcholů a směrovým kosinem normály. Pro bezproblémový tisk musí být řezy modelu uzavřené, aby nebyla narušena jeho integrita. Pro STL soubory lze použít binární formát, který má menší velikost a je tedy používanější, nebo formát ASCII. (Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing, 2015)



Obr. 3 STL soubory pro tisk koulí s rozdílnou úrovní přesnosti (Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing, 2015)

Jestliže se model skládá z více částí, ale je požadováno vytisknout model v jednom kuse, musí být programem vnímán jako jeden celek. V opačném případě by se mohl výtisk rozpadnout. Následně jsou vygenerovány podpory, které zajistí, aby se model nezdeformoval během tisku. Většina programů si dokáže tyto podpory vytvořit sama. Jestliže je to nezbytné, lze podpory přidat i manuálně. Dále se zvolí typ a množství výplně (viz Obr. 4). Výplň se vybere tak, aby se minimalizovaly náklady a čas potřebný k tisku, a zároveň byla zachována potřebná odolnost. (Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing, 2015)



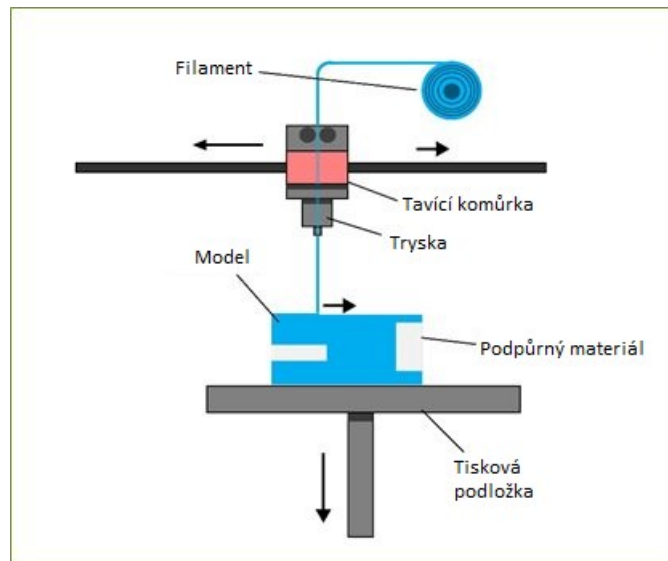
Obr. 4 Typy výplní, zleva doprava 20 %, 40 %, 60 % a 80 % výplně. (Infill Patterns and Density, 2011)

Následuje rozvržení pozice modelu na tiskové podložce. Jestliže je model umístěn co nejbližší výchozí poloze tiskové hlavy, lze zkrátit časovou náročnost tisku. Takto nachystaný model je programem rozřezán na jednotlivé vrstvy, zkontrolován a připraven k tisku.

Před zahájením samotného tisku lze tiskovou podložku potříit speciálním lepidlem, které zajistí dokonalejší přilnavost prvních vrstev tisku. (Adhezivní přípravky, 2019)

Processing

Processingem se rozumí samotná výroba modelu nanášením vrstev roztaveného plastu nebo vytvrzováním prášku/fotopolymery.



Obr. 5 Schéma aditivní metody FDM. (3D printing, 2020)

Samotný tisk je časově náročnější, ale celkový proces výroby je ve výsledku rychlejší než při použití konvenčních obráběcích metod. (Rapid prototyping, 2017)

Postprocessing

Během postprocessingu se vytisknutý model zbaví všech podpor, zbroší se, a pokud je tvořen z více částí, slepí se dohromady. Podpory se odstraní mechanicky prostým odlomením a následným zabroušením jemným smirkovým papírem. Další možností odstranění podpůrného materiálu je jejich vymytí, kdy se model ponoří do chemické lázně, která podpory rozpustí. Opracovaný model lze natřít barvami podle požadavků zadavatele a na závěr nalakovat. (Postprocessing 3D výtisků krok za krokem, 2018)

Pro technologii Rapid Prototyping lze využít například tyto vybrané metody.

1.1 Aditivní metoda Fused Deposition Modeling

Technologie *Fused Deposition Modeling* (FDM) je jednou z nejběžnějších metod 3D tisku, a to především pro svoji jednoduchost. Na Obr. 5 lze vidět její schéma. Filament tvořený termoplastickým materiálem prochází tiskovou hlavou, kde se nahřívá na pracovní teplotu a v polotekutém stavu je nanášena na pracovní podložku. Díky digitální předloze ve formě STL souboru, tisková hlava přesně umísťuje nanášený materiál.

Výhodami aditivní metody FDM je vysoká přesnost, použití odolných materiálů se stabilními mechanickými vlastnostmi, a také rychlost. Metoda je vhodná k tisku detailních funkčních prototypů i výrobních nástrojů. (Fused Deposition Modeling, 2019)

1.1.1 Vybrané materiály používané pro technologii *Fused Deposition Modeling*

- ABS – tento termoplast na bázi oleje je vysoce odolný a umožňuje dosáhnout jemných detailů. Objekty vytisknuté z ABS jsou obecně více odolnější, pevnější a pružnější než objekty z PLA. Porovnání základních vlastností materiálů ABS a PLA je v *Tab. 1*. Cena filamentu ABS je cca 0,50 Kč/g. (Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017)
- PC – polykarbonáty nabízí vysokou rázovou a teplotní odolnost. Cena polykarbonátové struny začíná od 0,50 Kč/g. (Fused Deposition Modeling, 2019)
- PC-ABS – polykarbonátový ABS je směsí PC a ABS, s vysokou odolností, a proto se hodí pro tisk objektů, které budou použity v náročných technických prostředích. (Fused Deposition Modeling, 2019)
- PC-ISO – polykarbonát ISO má podobné vlastnosti jako PC-ABS, avšak disponuje také biokompatibilitou a splňuje ISO 10993-1. Díky tomu je oblíbenou volbou při tisku obalů a různých zdravotnických pomůcek či přístrojů. (Fused Deposition Modeling, 2019)
- PET-G – tento materiál je PET modifikovaný glykolem, díky čemuž je jasnější a méně křehčí. Materiál je recyklovatelný a bere si z PLA a ABS ty nejlepší vlastnosti. Na druhou stranu jsou kladeny vyšší nároky na nastavení parametrů tiskárny. Cena filamentu se pohybuje přibližně od 0,37 Kč/g. (Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017)
- PLA – bio plast vyráběný z kukuřičného škrobu. Je rozložitelný a šetrný k přírodě. Cena PLA struny je od 0,35 Kč/g. (Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017)

Tab. 1 Přehled základních vlastností materiálů ABS a PLA (Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017)

	PLA	ABS
Teplota trysky	180-230 °C	210-250 °C
Teplota podložky	20-60 °C	80-110 °C
Tisková podložka	Nepovinná	Povinná
Komora při tisku	Nepovinná	Doporučuje se
Přilnutí první vrstvy	Dobré	Drobné problémy
Výpary	Skoro žádné	Silné
Absorpce vlhkosti	Ano	Ano
Youngův modul (GPa)	3,5	2,4
Modul pružnosti (GPa)	4	2,2
Pevnost v ohybu (MPa)	80	65
Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)	40	31-80
Pevnost v tahu (MPa)	110	37-110
Deformace při teplotě (°C)	65	100
Tepelná kapacita (J/kg*K)	1800	1470
Tepelná vodivost (W/m*K)	0,13	0,17
Tepelná difuzivita (m ² /s)	0,058	0,12

1.2 Aditivní metoda Stereolitografie

„Stereolitografie (SLA) je označení procesu aditivní výroby nebo 3D tisku. Model při tomto postupu vzniká působením ultrafialového laserového paprsku na tekutou fotopolymerickou pryskyřici, která je působením laseru vytvrzována ve vrstvách, jejichž tvar vždy odpovídá dané vrstvě řezu STL modelu. Po vytvrzení vrstvy se platforma posune ve vertikálním směru o tloušťku další vrstvy (mezi 0,05 až 0,15 mm), nanese se další vrstva pryskyřice a laser v ní opět vytvrdí vzor dle řezu STL modelu.“ (Stereolitografie, 2013)

Aditivní metoda SLA využívá k vytvrzování záření ve vlnových délkách od 310 do 410 nm a je velmi přesná. Povrch modelů bývá hladký, velmi detailní a jednotlivé tiskové vrstvy většinou nelze rozeznat. (Technologie 3D tisku, 2016)

Tisková podložka se ponoří do materiálu fotopolymeru. Během tisku dochází k vytvrzování fotopolymeru. Následuje odtržení vytvrzené části modelu od membrány. Při tomto kroku může lehce dojít k poškození modelu. Je tedy nutné, aby STL soubor byl bezchybný a neobsahoval nechtěné mezery mezi jednotlivými vrstvami. Po odtržení se vše opět ponoří do fotopolymeru a následně přitiskne na membránu, kde bude vytvrzena další vrstva. Postup se opakuje až do ukončení tisku. (Technologie 3D tisku, 2016)

Fotopolymery lze míchat dle požadavků a díky tomu lze ovlivnit barevnost, průhlednost nebo pružnost výsledného modelu. (Fotopolymer, 2018)

Nevýhodou této metody může být vyšší cena tiskárny i fotopolymerů. V minulém desetiletí se pořizovací cena materiálu pohybovala přibližně okolo 10 000 Kč/kg, dnes lze stejný materiál pořídit už od 800 Kč/kg. Vzhledem k tomu, že jsou fotopolymery citlivé na světlo, neschválně výrobkům UV záření. Mohou tedy časem blednout a ztrácet na pevnosti. (Fotopolymer, 2018)

1.3 Ostatní metody *Rapid Prototyping*

Představené aditivní metody FDM a SLA, jsou v této práci použity k tisku modelů. Možnosti 3D tisku se progresivně vyvíjejí. V současné době se používají a zkouší nejrůznější metody tisku.

1.3.1 Laserové spékání

Tato metoda, spočívá ve spékání kovových, plastových, keramických a jiných prášků, pomocí laseru. Podle řezu STL modelu v počítači se vytvrdí příslušná část modelu a nanese se další vrstva prášku. Proces se opakuje, dokud není model hotový. (Přehled technologií 3D tisku, 2018)

Podle použitého prášku lze tuto techniku rozdělit na:

- Aditivní SLS metodu, jenž využívá především jemné keramické a plastové prášky. Výhodami jsou téměř nulový odpadní materiál a jeho nízká cena. Bohužel cena samotné tiskárny je oproti jiným vysoká.
- Poměrně novou SHS technologii firmy BLUE PRINTER (patentováno 2002), kdy se k vytvrzování materiálu používají topná tělesa namísto laseru.
- DMLS 3D tisku, který používá kovový prášek a umožňuje další obrábění dokončených modelů. Vzhledem k tomu, že se k tisku využívá prášková ocel, titan, bronz nebo žáruvzdorné materiály používané v letectví, musí být laser mnohem výkonnější než u aditivní metody SLS. (Přehled technologií 3D tisku, 2018)

1.3.2 Aditivní metoda *Laminated Object Manufacturing*

Technologii *Laminated Object Manufacturing* (LOM) vyvinula americká firma Helisys, která měla za cíl najít levný a běžně dostupný materiál pro 3D tisk. V roce 2005 poprvé realizovali tisk z obyčejného kancelářského papíru. Metoda spočívá v lepení jednotlivých papírových vrstev na sebe a jejich ořezávání laserem nebo velmi kvalitním nožem podle počítačového 3D modelu. Přebytečný materiál je rozřezán tak, aby byl postprocessing

co nejjednodušší. Tisk z papíru umožňuje vytvářet velice věrné barevné modely (viz Obr. 6). Tuto metodu lze využít k výrobě výtvarných návrhů, k tisku 3D barevných map nebo k výrobě formy přesného lití se spalitelným modelem. (Daniel, 2013)



Obr. 6 Postprocessing aditivní metody LOM a jeho konečný výsledek (Daniel, 2013)

Nevýhodou modelů vytvořených LOM technologií je jejich materiálová degradace a křehkost. Stále se totiž jedná o běžný papír, který je náchylný k mechanickému poškození a vlhkosti.

1.3.3 Aditivní metoda *MultiJet Fusion*

Aditivní metoda MultiJet Fusion (MJF) nepoužívá k vytvrzení práškových materiálů laser. Má tedy lepší kvalitu povrchu a menší pórovitost. Výtisk je vytvrzován kombinací spojovacího činidla a zahřívací lampy. Výrobky nepotřebují téměř žádný postprocessing, proto je tato technologie ideální pro výrobu funkčních prototypů. (MultiJet Fusion, 2019)

Bezesporu nejvýraznějším kladem této metody je však rychlost tisku. Ta se ukázala jako velmi zásadní i v nedávné krizi COVID 19. Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky, který je součástí ČVUT v Praze (CIIRC ČVUT), se rozhodl vytvořit

na 3D tiskárně prototyp respirátoru, který lze vytisknout s odpovídající technologií kdokoli a kdekoli.

„CIIRC ČVUT začal s vývojem tohoto ochranného prostředku před týdnem. Tým výzkumníků, zapojených do evropského centra excelence RICAIP, se zaměřil na vývoj respirátoru tisknutelného na 3D tiskárnách technologií MJF. To, co za normálních okolností trvá měsíce, se podařilo vyřešit za sedm dní. V úzké spolupráci s vládní agenturou CzechInvest a dalšími partnery se podařilo připravit model CIIRC RP95, který získal certifikaci jako ochranná polomaska třídy FFP3 s vyměnitelnými externími filtry. Masku lze používat opakovaně a na 3D tiskárnách vyrábět kdekoli na světě.“ (Respirátor z 3D tiskárny, 2020)

Díky této technologii bylo možné v rekordně krátkém čase vytvořit prototyp s nejvyšší ochrannou certifikací, který prošel procesem schválení a následnou distribucí. Jedinou nevýhodou je, že tiskárny s technologií MJF nejsou u nadšenců do 3D tisku tolik rozšířené, kvůli jejich vysoké pořizovací ceně v řádu milionů.

1.3.4 Aditivní metoda PolyJet

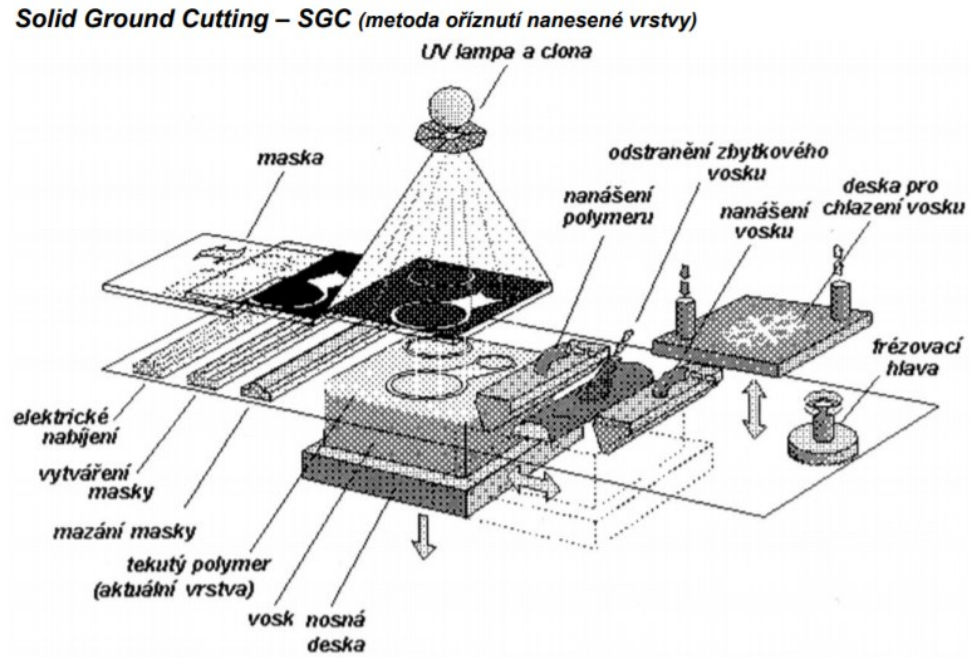
Tato metoda vyniká především možností tisku velice složitých předmětů z různých druhů fotopolymerů. Tiskovou hlavou nanášené tenké vrstvy tekutých fotopolymerů se okamžitě vytvrzují pomocí UV záření. Modely se nemusí dodatečně vytvrzovat a lze je prakticky okamžitě po vytisknutí používat. Podpory jsou zde vytvořeny z gelu vymývatelného vodou.

Použitím PolyJet technologie lze dosáhnout minimální tloušťky stěny 0,6 mm a tloušťky horizontální vrstvy 16 μm . Je tedy možné vyrobit velmi složité díly s velice jemnými detaily. Velmi často je tato metoda využívána při tisku přesných mechanických prototypů. (PolyJet, 2019)

1.3.5 Aditivní metoda Solid Ground Curing

Aditivní metoda *Solid Ground Curing* (SGC) byla vyvinuta v roce 1986 firmou Cubital Ltd. Stejně jako Stereolitografie využívá fotopolymeru citlivého na světlo, avšak princip vytvrzování se mírně liší. Při této metodě se vytvrzuje najednou celá vrstva fotopolymeru pomocí UV lampy. Světlo proniká tzv. negativní maskou v místech odpovídajících řezu STL modelu. Po osvětlení negativní masky a vytvrzení fotopolymeru se zbývající prostor vyplní voskem, který zároveň slouží jako podpora. Dále je povrch ofrézován na požadovanou výšku a je opět nanášena vrstva fotopolymeru (viz Obr. 7). Tento cyklus

se opakuje, dokud není model celý vytisknutý. Voskové podpory se poté mohou vymýt chemickou cestou. (Nekonvenční technologie, 2008)



Obr. 7 Princip aditivní metody SGC (Solid ground curing, 2018)

Značnou výhodou je zde čas vytvrzení jedné vrstvy, který je neměnný nezávisle na detailnosti dané vrstvy. Díky tomu je celkový čas tisku rychlejší. Technologie SGC dnes patří k překonaným metodám (Nekonvenční technologie, 2008)

2 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Technologie RP byla světu poprvé představena firmou 3D Systems již v roce 1987. Její největší výhodou je zkrácení doby dodání výrobku na trh. Zpočátku si pořízení RP strojů mohly dovolit pouze velké firmy, a to zejména kvůli jejich ceně. Nicméně dnes lze tato zařízení najít prakticky všude. Dokonce vznikají i malé firmy, přímo orientované na metody RP, které pronajímají své služby větším firmám. Tím odbourávají problém s pořizovací cenou těchto technologií. (Srivatsan a Sudarshan, 2016)

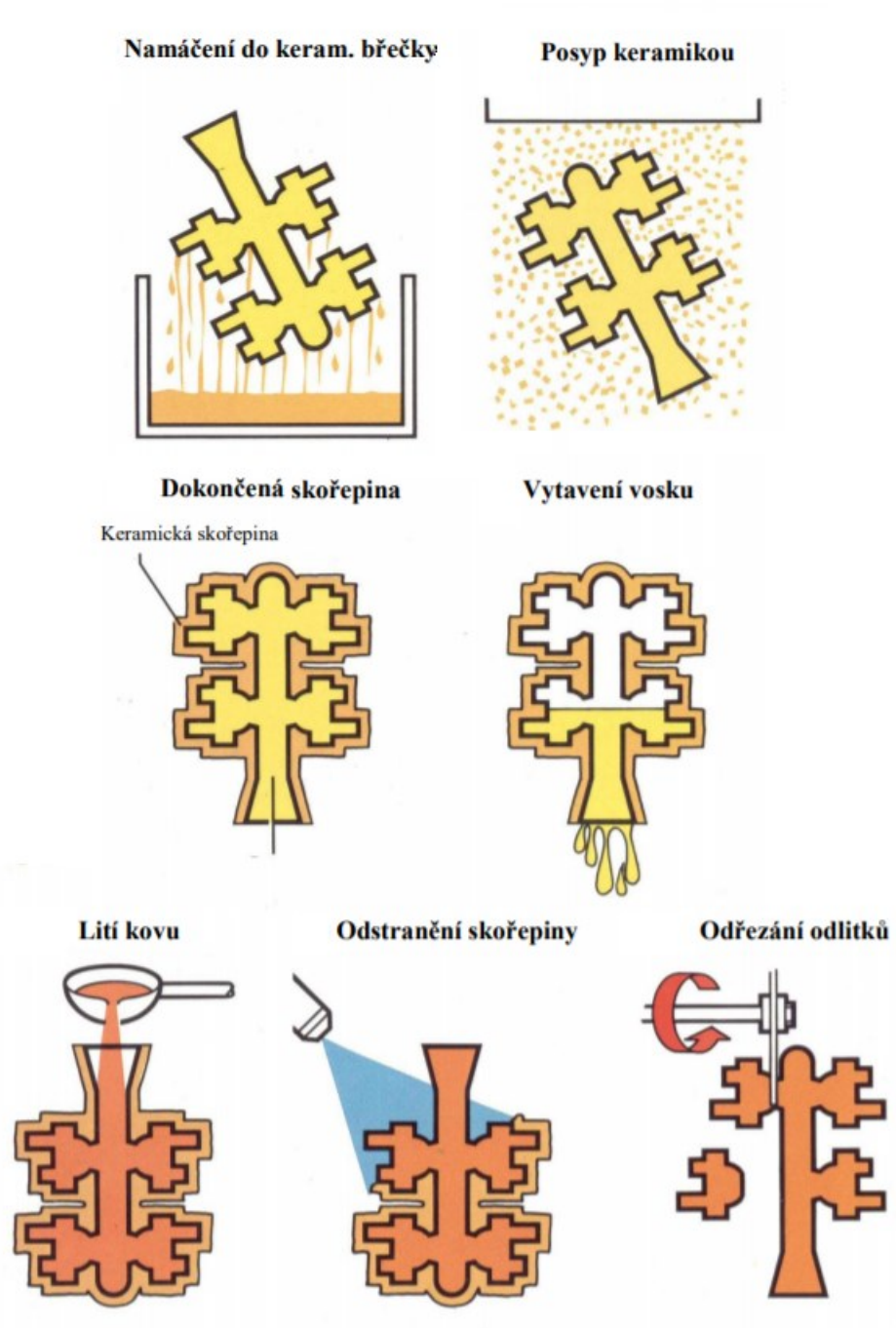
Metody RP nevyužívají pouze firmy, ale také tzv. domácí kutilové. Díky dnešním přehledným programům k vytvoření CAD modelu, zvládne návrh lehčí prototypové součástky (například zahradní a domácí pomůcky) téměř každý. Není ovšem výjimkou, že i domácí kutilové přerostou v úspěšné podnikatele. Nejzářnějším příkladem může být Josef Průša, který se sám označuje za kutila, vynálezce a investora. Jeho firma se od jejího založení roku 2012 dokázala vyšplhat na nejvyšší příčky světových žebříčků. (O nás, 2012)

2.1 Technologie slévárenství

RP technologie ve slévárenství jsou využívány převážně k tvorbě voskových modelů pro vytavitelné lití. Princip této metody spočívá ve vytisknutí požadovaného modelu z vosku a jeho následném obalení tzv. keramickou břechkou. Po tepelném vytvrzení keramické břechky vznikne skořápka, do které se odlévá koncový kovový materiál (viz Obr. 8). (Horáček, 2009)

Voskové formy se dají vytvářet i konvenčními metodami. Většinou je ovšem potřeba dodatečných úprav kvůli komplikovanosti a přesnosti modelů. Díky technologii RP lze ušetřit čas i peníze. (Gebhardt a Hötter, 2016)

Formy pro vytavitelné lití lze vytvořit i pomocí ostatních metod RP. Jednou z nejběžnějších aditivních metod je FDM, kdy se pro formu vytvoří tenkostěnný model z ABS materiálu. Dále lze použít metodu QuickCast, která využívá polodutých modelů vytvořených pomocí SLA technologie. (Chua, Leong a Lim, 2010)



Obr. 8 Proces vytváření skořápky pro koncový kovový materiál (Horáček, 2009)

Metodou QuickCast byl například vytvořen model pro vytavitelné lití čtyřválcového motoru pro vůz značky Mercedes-Benz třídy A. Celý proces využívající technologie RP trval pouze šest týdnů. Konvenční metody obrábění by zabraly až osmnáct týdnů. Také náklady byly sníženy, a to přibližně o 150 000 dolarů. Je tedy jasné, že z hlediska ceny a rychlosti uvedení na trh, se vyplatí použít technologii RP. (Chua, Leong a Lim, 2010)

2.2 Oblast zdravotnictví

Metod RP se v medicíně využívá především k výrobě implantátů, protéz, replik orgánů, či pomocných modelů pro operace. Vytisknuté implantáty se mohou přímo vložit do lidského těla, anebo se nejprve vytiskne jejich vosková forma pro následné odlití požadovaným materiálem. V obou případech je nutno používat biokompatibilní materiály speciálně navržené tak, aby je tělo dokázalo přijmout. (Chua, Leong a Lim, 2010)

Na trhu je velké množství implantátů a protéz a pro většinu pacientů lze najít vyhovující řešení. Jsou ovšem případy, kdy je potřeba zvláštní protéza z důvodu atypické velikosti nebo funkčnosti, či zabránění dalšímu poškození tkání. Zde RP nabízí řešení za přijatelnou cenu. (Chua, Leong a Lim, 2010)

K vytvoření protéz, implantátů, modelů a všech ostatních pomůcek jsou nezbytné snímky z počítačové tomografie (tzv. CT), aby bylo možné v počítači vymodelovat přesné tvary na míru konkrétnímu pacientovi.

Modely a pomocníky operací představují především komplikované modely jedinečných situací. Model lebek siamských dvojčat na Obr. 9 byl použit pro lepší vizualizaci a naplánování oddělení lebek od sebe tak, aby nebylo narušené správné okysličování mozků obou dvojčat. (Chua, Leong a Lim, 2010)



Obr. 9 Model lebek a jejich oběhového systému siamských dvojčat (Chua, Leong a Lim, 2010)

Nespornou výhodou RP modelů je rychlost tisku, která je nanejvýše v řádu dnů i s CT skenováním a počítačovým modelováním. Rychlost tisku je ceněná při akutních operacích, kdy čas hraje velkou roli.

Rozvoj medicíny a technologie 3D tisku otvírá prostor pro další experimenty. Probíhají první pokusy s 3D tiskem orgánů pro transplantace. K tisku se nepoužívají samozřejmě plastové či kovové materiály, ale tzv. bio-inkoust, který je tvořený z embryonálních kmenových buněk. Tyto buňky mají schopnost se vyvinout v jakékoliv buňky lidského těla. Metoda je ovšem zatím v začátcích, takže tisk skutečně funkčních a biokompatibilních orgánů zatím není komerčně realizovatelný. Nicméně se nám díky podobným výzkumům otevírají dosud nevídané možnosti. (3D Biofabrication Strategies for Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 2014)

2.3 Automobilový a letecký průmysl

Z počátku byla cena RP metod vysoká. Proto ji používaly zejména automobilové a letecké firmy, které měly kapitál na jejich pořízení. Pokrok ve vývoji RP technologií způsobil, že tyto metody jsou přístupné mnohem širšímu okruhu uživatelů.

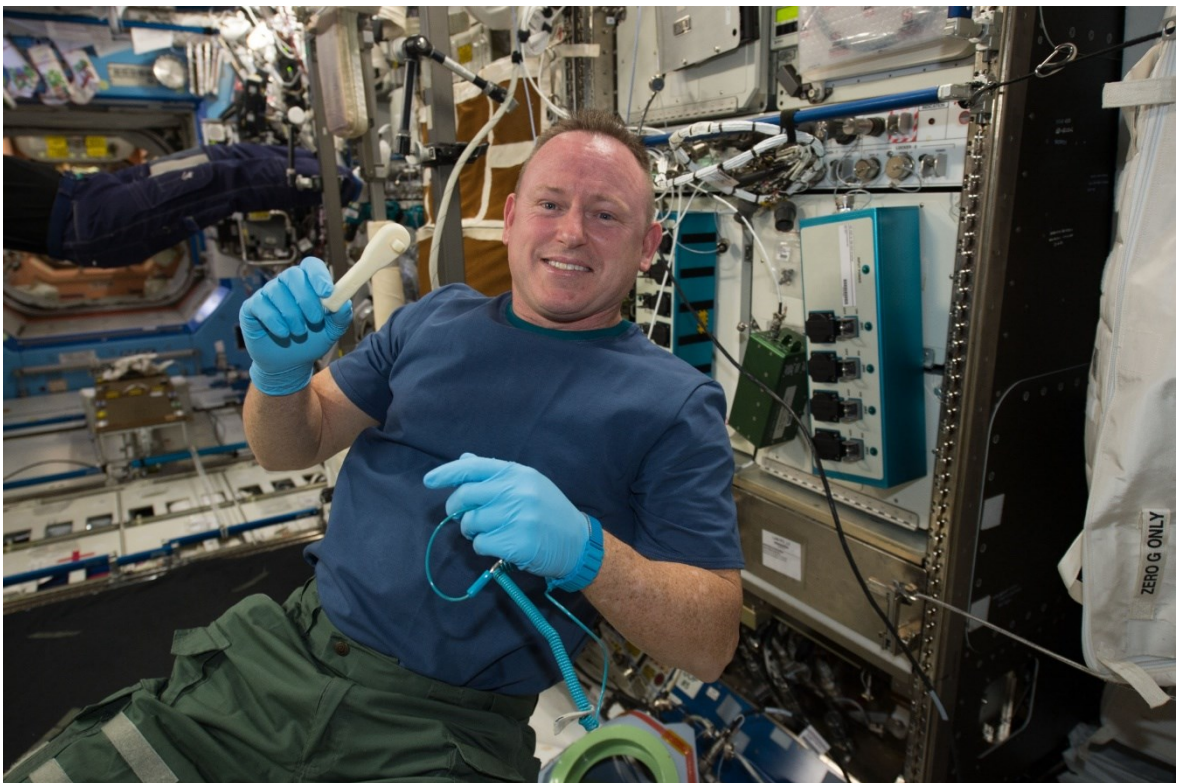
Velmi často se proces RP využívá v koncepčním designu. Požadovaná součástka je navržena a zmenšena, následně vytisknuta a otestována v aerodynamickém tunelu. Díky 3D tisku jsou výrazně sníženy náklady a zkrácen čas na přípravu modelů. Koncepční modely mohou také sloužit k otestování smontovatelnosti celého modelu. (Chua, Leong a Lim, 2010)

Nemusí se ovšem jen vytvářet modely, ale mohou se tisknout i funkční díly. Nejčastěji se jedná o drobné plastové díly. Na VUT v Brně byly vytisknuty součásti motoru studentské formule. „*V rámci snižování hmotnosti vozu studenti využili také technologii kovového 3D tisku. Na voze je vytisknuté kovové turbodmychadlo, přední i zadní těhlice, pro jejichž tisk konstruktéři použili nově vyvinutý hliníkový prášek s nejlepším poměrem vlastností na trhu.*“ (Studentská formule z VUT chce znovu dobýt svět, 2018)

2.4 Budoucí průmyslové aplikace

Největším potenciálem 3D tisku je bezesporu možnost vytvářet cokoli a kdekoliv, samozřejmě za předpokladu dostupnosti tiskového materiálu. Díky tomu 3D tisk pravděpodobně sehraje důležitou roli při budování základen mimo Zemi. Od roku 2014 provádí National Aeronautics and Space Administration, dále jen NASA, pokusy s 3D tiskem ve stavu snížené gravitace na Mezinárodní vesmírné stanici. Cílem

těchto pokusů je zjistit, zda má snížená gravitace vliv na mechanické vlastnosti výtisků. 3D tisk by se využil především na výrobu nejrůznějších součástek potřebných k udržení bezproblémového chodu Mezinárodní vesmírné stanice (viz Obr. 10). V současnosti musí astronauti čekat na zásobovací rakety, nebo improvizovat za pomoci součástek, které mají již k dispozici. Díky 3D tisku mohou inženýři na zemi navrhnout součástku, odeslat návrh na vesmírnou stanici, kde se vytiskne a tím se celková dodací doba několikanásobně zkrátí. (Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing, 2019)



Obr. 10 NASA astronaut Barry (Butch) Wilmore drží ráčnový klíč vytisknutý v roce 2014 na Mezinárodní vesmírné stanici (Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing, 2019)

Pokud budou pokusy s 3D tiskem ve vesmíru úspěšné, počítá se například s tiskem základen na Měsíci či Marsu, s rozšiřováním Mezinárodní vesmírné stanice a se stavěním kosmických lodí přímo ve vesmíru.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 NÁVRHY VZORKŮ PRO MĚŘENÍ PŘESNOSTI

Pro návrh referenčních vzorků pro měření rozměrové přesnosti byl zvolen parametrický program SolidWorks. Navržená krychle má hranu délky 20 mm. Právě takové krychle se využívají ke kalibraci 3D tiskáren. Jako druhý referenční vzorek byla zvolena koule o průměru 39,30 mm. S tvarem koule je obecně, vzhledem k jeho náročnosti, při výrobě problém. Konvenční metody jsou většinou nákladné a metody 3D tisku musí mít dobře nastavené podpory. Tisk musí probíhat ze správně zvoleného materiálu, aby se koule při tisku nedeformovala.

K tisku referenčních vzorků, pomocí aditivní metody FDM, která byla blíže popsána v teoretické části, byly použity materiály PLA, ABS a ABSplus. Výtisky byly zhotoveny na třech různých tiskárnách, konkrétně na Dimension uPrint (ABSplus), RepRap Sinuhed (PLA) a da Vinci 2.0 (ABS).

Celkem bylo vytisknuto dvanáct modelů pro měření rozměrové přesnosti. Na každé tiskárně se vytisknula krychle a tři koule s různým počtem polygonů. Počet polygonů určuje, z kolika trojúhelníkových plošek se model skládá. Čím více jich je, tím detailnější a přesnější bude tisk.

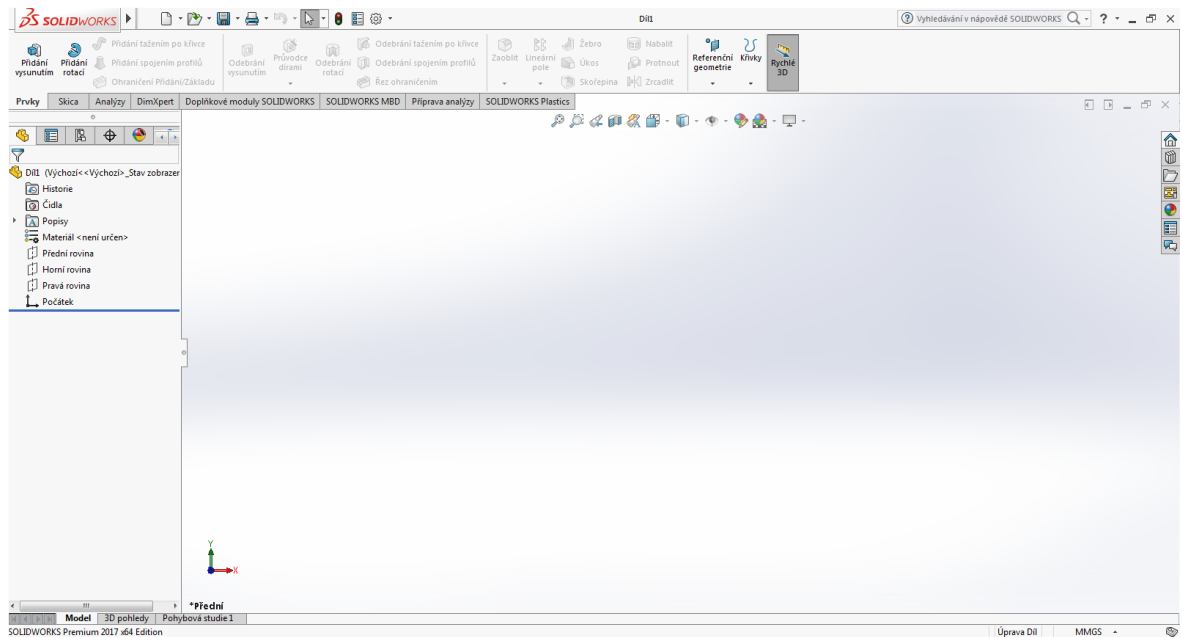
V této kapitole je popsán proces výroby vzorků na tiskárně Dimension uPrint (viz Obr. 11) od firmy Stratasys z materiálu ABS-P430.



Obr. 11 Tiskárna Dimension uPrint (Stratasys)

3.1 Parametrický program SolidWorks

Program SolidWorks je jedním z nejpoužívanějších CAD programů (viz Obr. 12). Společnost Dassault Systèmes, která stojí za vývojem tohoto programu, dokonce produkt kompletně lokalizovala pro český trh.

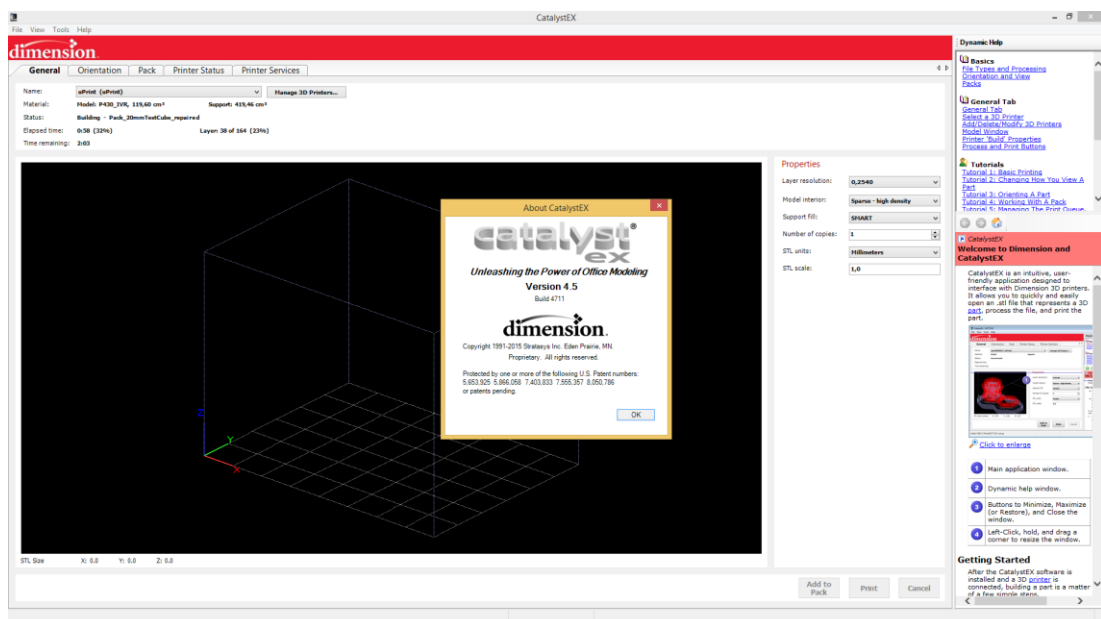


Obr. 12 Pracovní prostředí programu SolidWorks (vlastní zpracování)

Po dokončení návrhu modelu v programu SolidWorks se může CAD soubor konvertovat do formátu STL. S tímto formátem bude pracovat další program, kde budou nastaveny parametry 3D tisku.

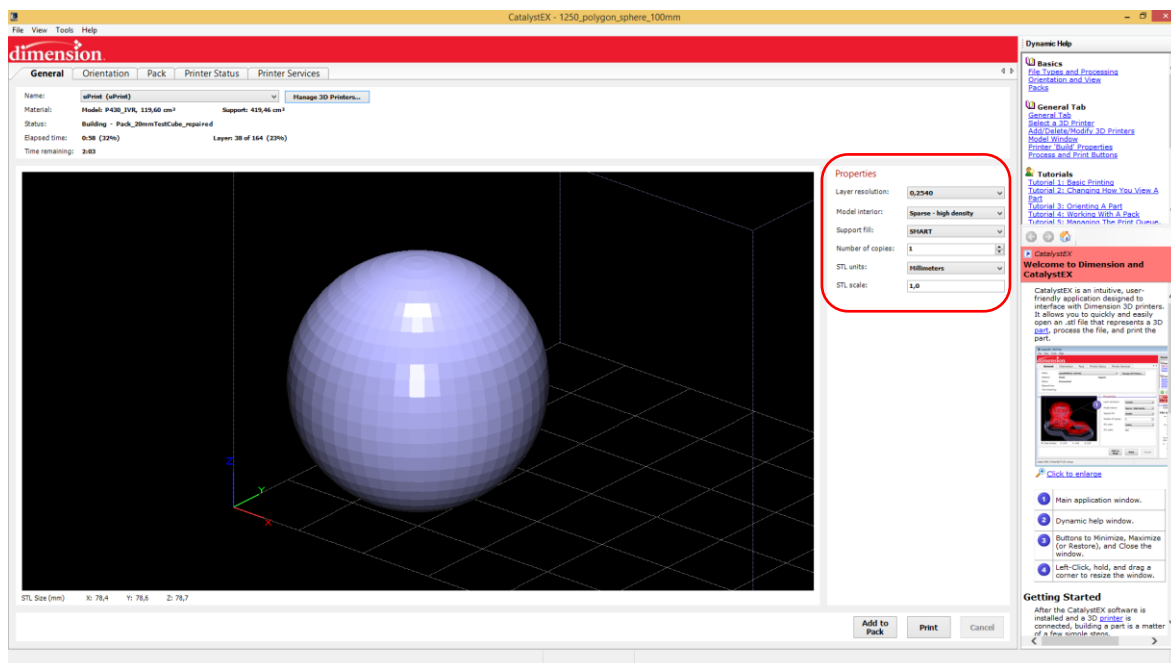
3.2 Program CatalystEX

Program CatalystEX od firmy *Dimensions* (viz Obr. 13), který se dodává jako příslušenství k tiskárně Dimension uPrint, umožňuje vygenerovat podpory a nastavit další parametry 3D tisku. (UPrint SE, 2012)

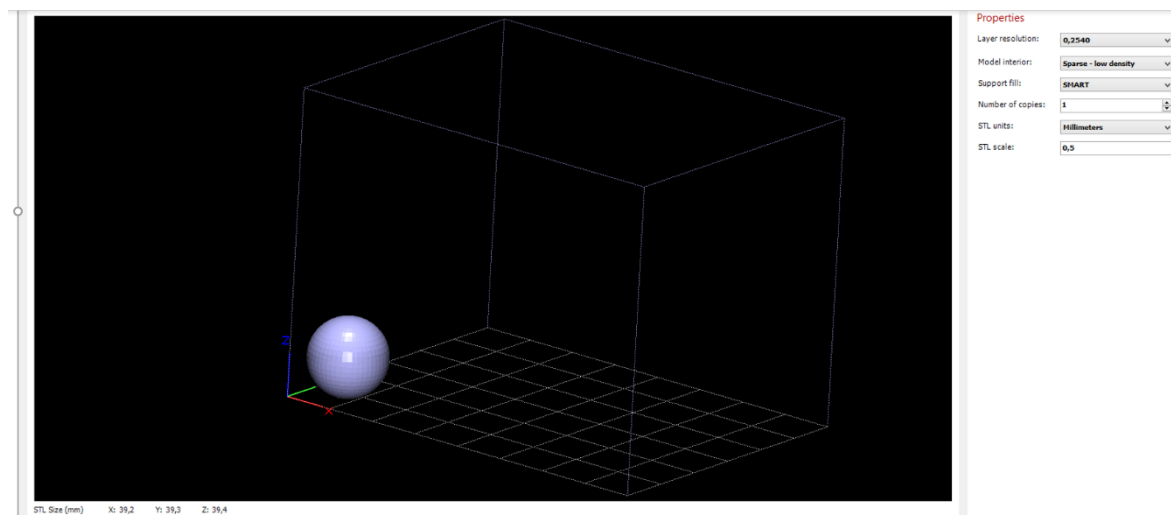


Obr. 13 Pracovní prostředí programu CatalystEX (vlastní zpracování)

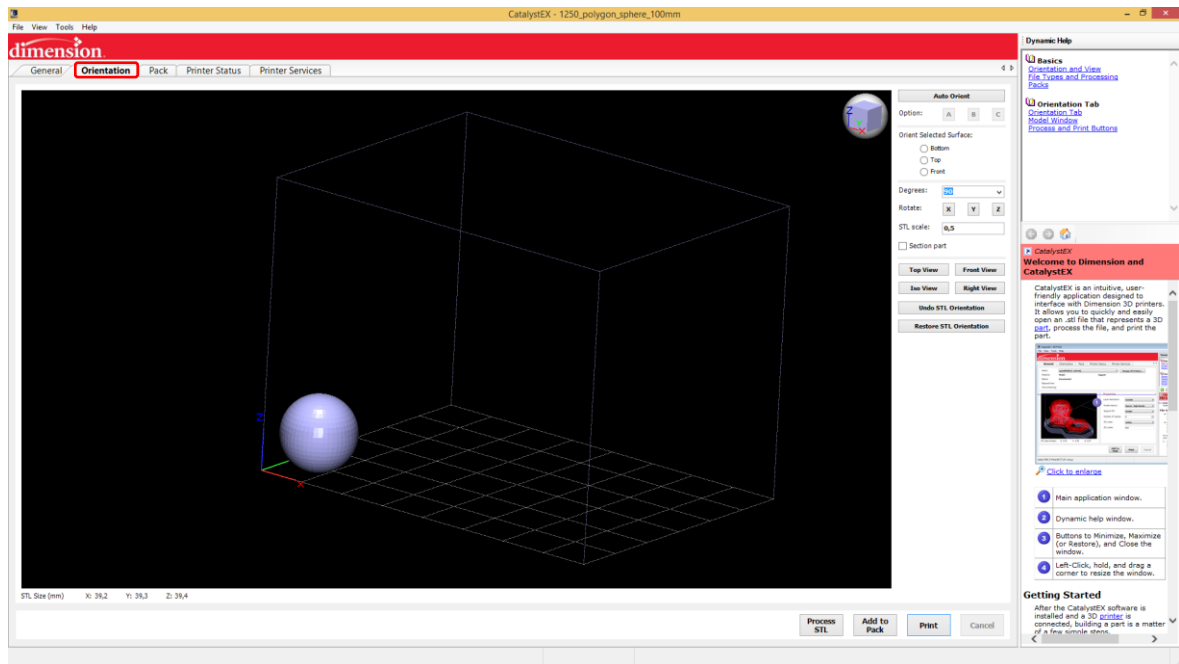
Po nahrání STL souboru se vygeneruje 3D model v pracovním prostoru tiskárny uPrint (viz Obr. 14). Na pravé straně se zvolí základní parametry. Tloušťka vrstvy byla nastavena na 0,2540 mm, výplň modelovacího materiálu *Sparse*, výplň podpurného materiálu *SMART*. Dále lze navolit počet kopií, jednotky a měřítko modelu (viz Obr. 15).



Obr. 14 Model koule v programu CatalystEX, bezprostředně po nahrání (vlastní zpracování)



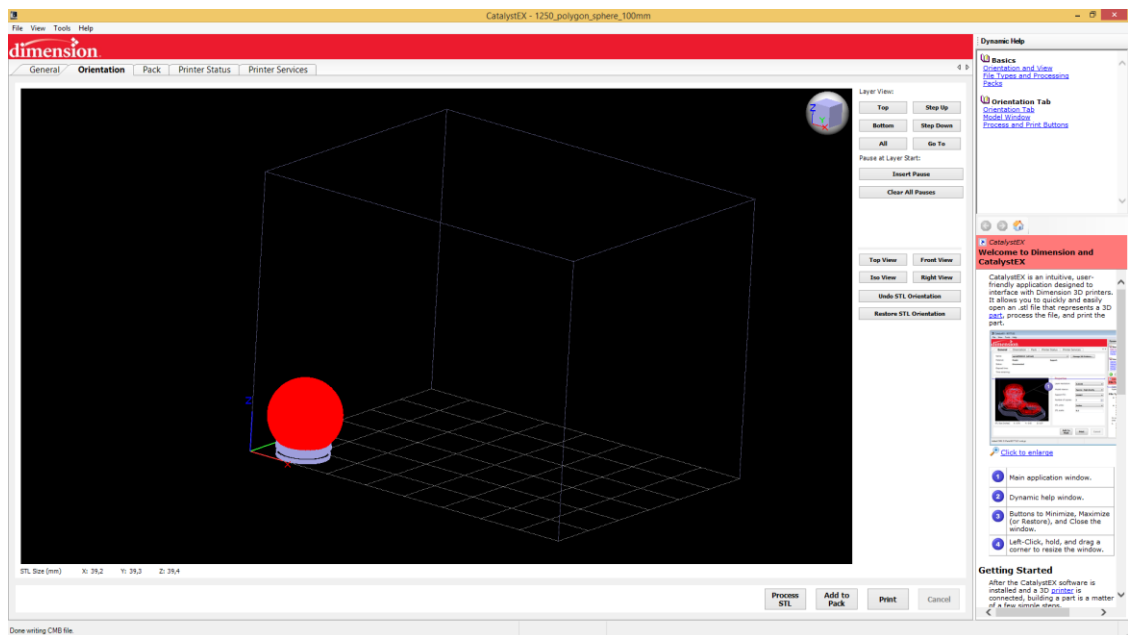
Obr. 15 Model koule v programu CatalystEX s požadovanými parametry tisku (vlastní zpracování)



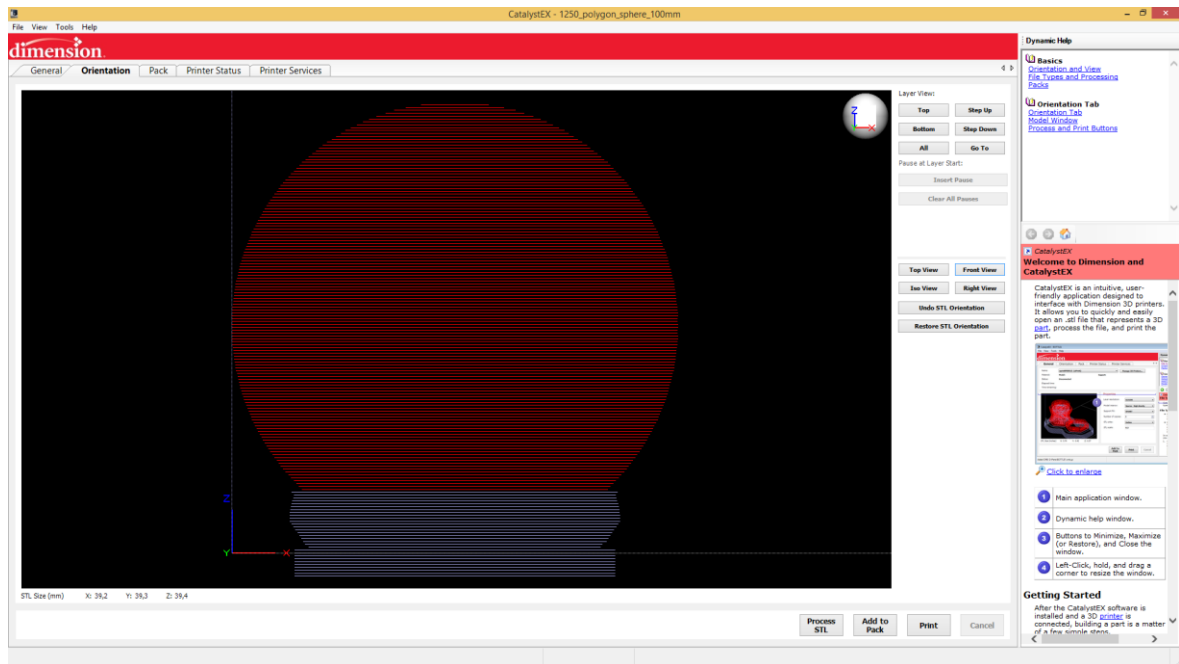
Obr. 16 Nastavení orientace 3D modelu v softwaru CatalystEX (vlastní zpracování)

Na Obr. 16 jsou patrné možnosti nastavení orientace 3D modelu v záložce *Orientation*. Nastavením správných parametrů se ovlivňuje nejen množství potřebných podpor, ale také kvalitu tisku.

Dalším krokem je digitální rozřezání modelu (červená barva) a vygenerovaných podpor (šedá barva) na jednotlivé vrstvy pro 3D tisk (viz Obr. 17 a Obr. 18).



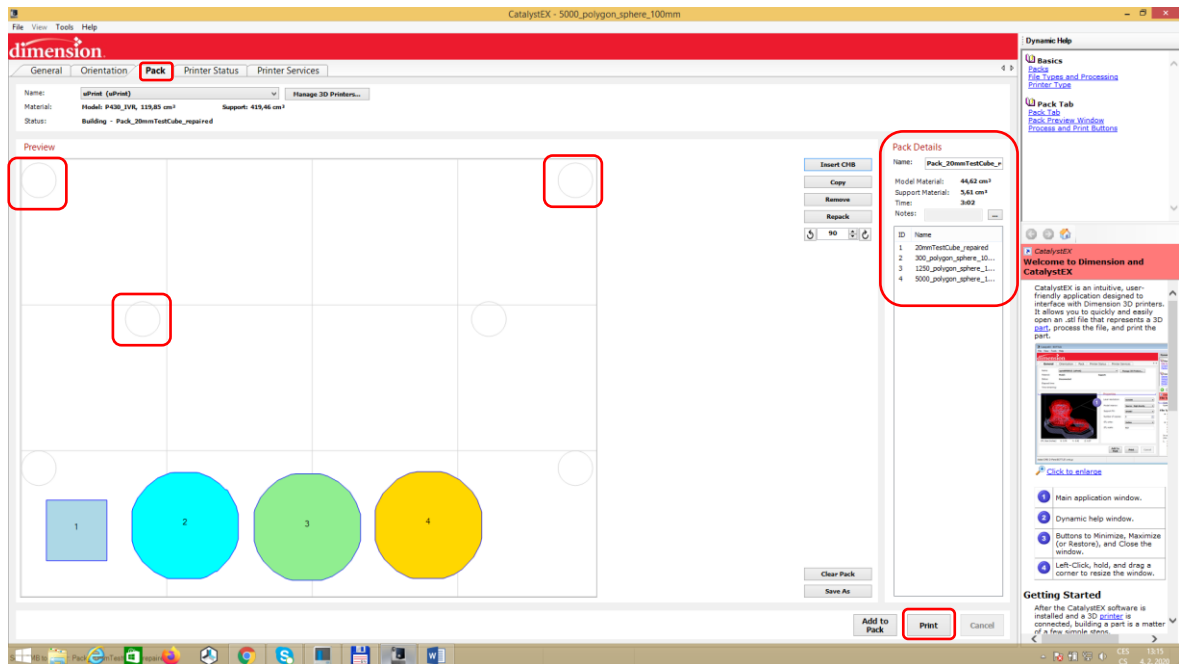
Obr. 17 Vygenerování jednotlivých vrstev 3D modelu a jeho podpor softwarem CatalystEX (vlastní zpracování)



Obr. 18 Bokorys jednotlivých vrstev modelu v programu CatalystEX (vlastní zpracování)

Samotný proces tisku omezuje velikost pracovního prostoru 3D tiskárny. Je nutno si pečlivě rozvrhnout uspořádání modelů na tiskové podložce. Software CatalystEX umožňuje nastavit rozvržení v záložce *Pack* (viz Obr. 19).

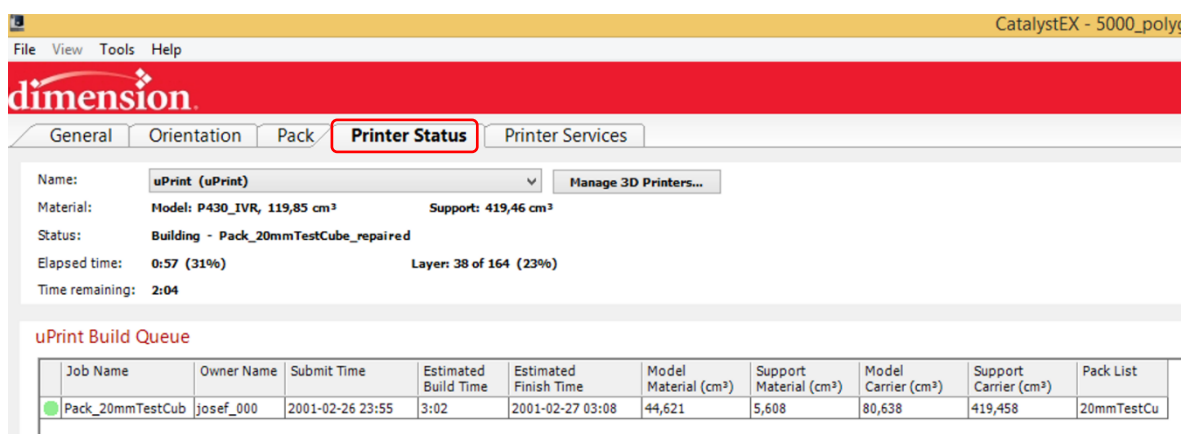
Modely je možné jednoduše přesouvat pomocí myši. V pravé části obrazovky se zobrazují základní informace o tisku – název, objem modelového a podpůrného materiálu a předpokládaná doba tisku. Také se zde nachází názvy dílčích modelů, z kterých se tisk skládá. Pravidelně rozmístěné tenké kružnice šedé barvy slouží ke kalibraci tiskové podložky. Tyto kontrolní body 3D tiskárna používá k určení jejího stavu. Pokud by byla podložka prohnutá, či jinak deformovaná, 3D tisk se nezahájí.



Obr. 19 Rozvržení modelů na tiskové podložce v softwaru CatalystEX (vlastní zpracování)

Po spuštění tisku tlačítkem *Print* v pravém dolním rohu záložky *Pack* je možné sledovat průběh tiskové úlohy v záložce *Printer Status*. 3D tiskárna uPrint umožňuje přesouvat tiskové úlohy ve frontě nahoru, nebo naopak dolů, podle jejich důležitosti. K dispozici jsou informace o zásobách tiskového i podpurného materiálu v cartridgech 3D tiskárny uPrint. Také lze sledovat uplynulý a předpokládaný čas dokončení (viz Obr. 20)

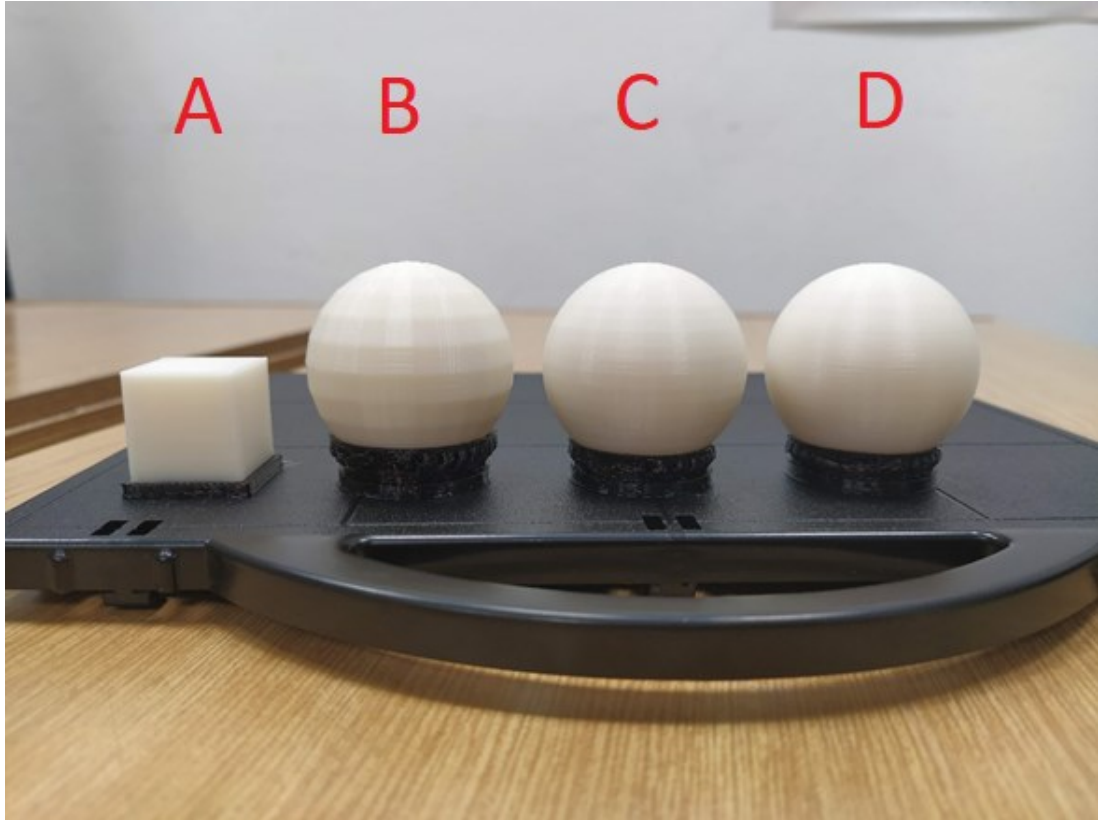
Obsluha tiskárny uPrint probíhá zcela online přes program CatalystEX.



Obr. 20 Tisková fronta s detaily tisku v programu CatalystEX (vlastní zpracování)

3.3 Postprocessing modelů

Vzhledem k měření rozměrové přesnosti vyrobených modelů byl jejich povrch očištěn jemným smirkovým papírem se zrnitostí 2000 od zbytků podpor tak, aby bylo co nejméně zasaženo do rozměrů modelu jako takového.



Obr. 21 Hotové výtisky z tiskárny uPrint na tiskové podložce (vlastní zpracování)

Na Obr. 21 jsou zobrazeny výtisky z materiálu ABSplus. Objekt A je model krychle, který je využíván ke kalibraci tiskárny. Objekt B je koule složená ze 300 polygonů. Na tomto modelu je nejvíce patrná struktura 3D tisku. Na objektu C, koule s počtem 1250 polygonů, a na objektu D, koule složená z 5000 polygonů, jsou jednotlivé polygony mnohem méně patrné. Objekty C a D jsou vzhledově ucelenější.

4 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Všechny modely prošly dodatečnou úpravou povrchu pro odstranění zbytkových podpor s důrazem na zachování původních rozměrů. Následně byly všechny modely změřeny mikrometrem s přesností na tisícinu milimetru a digitálním posuvným měřidlem s přesností na setinu milimetru, aby se zjistila rozměrová přesnost jednotlivých výtisků.

Ke zpracování a vyhodnocení naměřených dat byl použit program *MS Excel*.

4.1 3D tiskárna Dimension uPrint

3D tiskárna Dimension uPrint se dá považovat za zástupce profesionálních tiskáren. 3D tiskárna se dodává kompletně složená a se softwarem *CatalystEX*, díky kterému lze tiskárnu velmi jednoduše ovládat na dálku.

K tisku těchto modelů byl použit materiál ABSplus.

Tab. 2 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABSplus posuvným měřidlem (vlastní zpracování)

	Číslo měření	Série měření		
		1	2	3
Posuvné měřidlo	1	19,89	19,99	19,92
	2	20,01	20,07	20,05
	3	20,21	20,20	20,19
	4	20,22	20,24	20,25
	5	19,90	19,95	20,02
	6	20,03	20,01	20,00
	7	19,88	19,89	19,94
	8	19,92	19,93	19,89
	9	20,01	20,06	20,05
	10	19,99	20,04	20,10
	Průměr	20,006	20,038	20,041
	Průměrná odchylka	0,090	0,084	0,087
	Celkový průměr			20,028
Celková průměrná odchylka			0,087	

Z *Tab. 2* lze vyčíst, že vyrobená krychle se od modelu liší o 0,028 mm s průměrnou odchylkou 0,087 mm.

Tab. 3 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABSplus mikrometrem (vlastní zpracování)

		Série měření		
		1	2	3
Mikrometr	Číslo měření			
	1	19,976	19,982	19,984
	2	20,204	20,174	20,217
	3	19,869	19,899	19,885
	4	20,240	20,195	20,218
	5	19,995	20,023	20,007
	6	20,043	20,049	20,017
	7	19,898	19,894	19,908
	8	19,911	19,900	19,885
	9	20,203	20,205	20,189
	10	20,219	20,238	20,183
	Průměr	20,056	20,056	20,049
	Průměrná odchylka	0,129	0,118	0,122
	Celkový průměr			20,054
Celková průměrná odchylka			0,123	

Tab. 3 obsahuje přesnější data díky použití mikrometru. Krychle se tedy od modelu liší pouze o 0,054 mm s průměrnou odchylkou 0,123 mm.

Naměřená data pro jednotlivé výtisky koulí na tiskárně uPrint jsou v příloze I. Výsledky měření jednoznačně říkají, že koule z 300 polygonů je nejméně přesná. Model koule měl mít průměr 39,3 mm. Vytisknutý 300 polygonový model má pouze 38,982 mm s průměrnou odchylkou 0,176 mm, respektive 39,0777 mm s průměrnou odchylkou 0,1241 mm, což jsou data získaná pomocí přesnějšího mikrometru. Model koule z 1250 polygonů měřil 39,338 mm s průměrnou odchylkou 0,138 mm, respektive 39,2371 mm s průměrnou odchylkou 0,0547 mm. Nejdetailnější model složený z 5000 polygonů měřil 39,361 mm s průměrnou odchylkou 0,113 mm, respektive 39,2960 mm s průměrnou odchylkou 0,0925 mm.

Na modelech krychle i koulí je patrná přesnost tiskárny uPrint. Podobné výsledky, se vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o profesionální tiskárnu, daly očekávat.

4.2 3D tiskárna RepRap Sinuhed

3D tiskárna RepRap Sinuhed zastupuje kategorii RepRap, tedy *Replicating Rapid Prototyper*. RepRap je mezinárodní komunitní projekt, založený na otevřeném softwaru a cenové dostupnosti. Tyto tiskárny odpovídají svému názvu a jsou schopné vlastní replikace a rychlého prototypování. Základní charakteristikou je možnost tisku většiny jejich

plastových dílů na jiném zařízení RepRap. Díky těmto výhodám se staly velmi oblíbené u domácích kutilů a u lidí, kteří s 3D tiskem začínají a nechtějí investovat vysoké částky do pořízení tiskárny.

K tisku těchto modelů byl použit materiál PLA.

Tab. 4 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu PLA posuvným měřidlem (vlastní zpracování)

	Číslo měření	Série měření		
		1	2	3
Posuvné měřidlo	1	20,19	20,33	20,31
	2	20,09	20,19	20,20
	3	20,26	20,25	20,22
	4	20,17	20,25	20,26
	5	20,06	20,16	20,24
	6	20,33	20,44	20,29
	7	20,16	20,11	20,08
	8	20,28	20,24	20,26
	9	20,25	20,26	20,28
	10	20,15	20,19	20,16
	Průměr	20,194	20,242	20,230
	Průměrná odchylka	0,069	0,064	0,052
	Celkový průměr			20,222
Celková průměrná odchylka			0,062	

Z Tab. 4 je patrné, že vyrobená krychle se liší od návrhu o 0,222 mm s průměrnou odchylkou 0,062 mm.

Tab. 5 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu PLA mikrometrem (vlastní zpracování)

	Číslo měření	Série měření		
		1	2	3
Mikrometr	1	20,119	20,304	20,074
	2	20,066	20,079	20,214
	3	20,042	20,101	20,088
	4	20,051	20,050	20,033
	5	20,238	20,252	20,213
	6	20,264	20,209	20,186
	7	20,098	20,218	20,065
	8	20,109	20,337	20,189
	9	20,216	20,247	20,278
	10	20,127	20,142	20,109
	Průměr	20,1330	20,1939	20,1449
	Průměrná odchylka	0,0638	0,0807	0,0711
	Celkový průměr	20,1573		
Celková průměrná odchylka	0,0719			

Tab. 5 obsahuje přesnější hodnoty měření díky použití mikrometru. Krychle se tedy od návrhu liší o 0,1573 mm s průměrnou odchylkou 0,0719 mm.

Naměřená data pro jednotlivé výtisky koulí na 3D tiskárně Sinuhed jsou v příloze II. Z výsledků měření vyplývá, že koule z 300 polygonů je nejvíce přesná. Model koule měl mít průměr 39,3 mm. Vytisknutý 300 polygonový model má 39,263 mm s průměrnou odchylkou 0,209 mm, respektive 39,4287 mm s průměrnou odchylkou 0,2259 mm, což jsou data získaná pomocí přesnějšího mikrometru. Model koule z 1250 polygonů měřil 39,674 mm s průměrnou odchylkou 0,263 mm, respektive 39,6774 mm s průměrnou odchylkou 0,2085 mm. Nejdetailnější model složený z 5000 polygonů měřil 39,612 mm s průměrnou odchylkou 0,189 mm, respektive 39,5223 mm s průměrnou odchylkou 0,1265 mm.

Z naměřených dat se zdá, že nejpřesnější je 300 polygonový model, který se od návrhu liší nejméně, a to o 0,037 mm. Při porovnání naměřených hodnot dalších dvou modelů koule je patrné, že se průměrná odchylka snižuje. Je tedy velmi pravděpodobné, že tiskárna nebyla správně zkalibrována, a proto se jeví 300 polygonový model jako nejpřesnější.

4.3 3D tiskárna da Vinci 2.0

3D tiskárna da Vinci 2.0 je zástupcem levnějších tiskáren, které jsou zkompletované již z výroby. Není tedy nutné se o nic dalšího starat a po zapojení lze rovnou tisknout. 3D tiskárna da Vinci 2.0 se dodává se softwarem *XYZware*, který je navržen pro začátečníky. Díky tomu je obsluha tiskárny jednoduchou záležitostí.

K tisku těchto modelů byl použit materiál ABS.

Tab. 6 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABS posuvným měřidlem (vlastní zpracování)

	Číslo měření	Série měření		
		1	2	3
Posuvné měřidlo	1	20,12	19,96	19,98
	2	20,22	20,27	20,30
	3	20,14	20,13	20,09
	4	20,08	20,09	20,07
	5	20,00	19,97	20,02
	6	20,00	19,95	19,97
	7	19,96	19,99	19,99
	8	20,11	20,12	20,15
	9	20,26	20,28	20,23
	10	19,98	19,97	19,99
	Průměr	20,087	20,073	20,079
	Průměrná odchylka	0,083	0,105	0,091
	Celkový průměr			20,080
Celková průměrná odchylka			0,093	

Z Tab. 6 je patrné, že ABS krychle vytisknutá na 3D tiskárně da Vinci se liší od návrhu o 0,080 mm s průměrnou odchylkou 0,093 mm.

Tab. 7 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABS mikrometrem (vlastní zpracování)

Mikrometr	Číslo měření	Série měření		
		1	2	3
	1	20,067	20,078	20,072
	2	19,937	20,046	20,015
	3	19,879	19,910	19,936
	4	20,013	19,980	20,072
	5	20,094	20,124	20,161
	6	19,879	19,892	19,907
	7	19,976	20,024	19,995
	8	19,873	19,874	19,887
	9	20,106	20,179	20,243
	10	20,100	20,057	20,185
	Průměr	19,992	20,016	20,047
	Průměrná odchylka	0,084	0,082	0,099
	Celkový průměr			20,019
	Celková průměrná odchylka			0,088

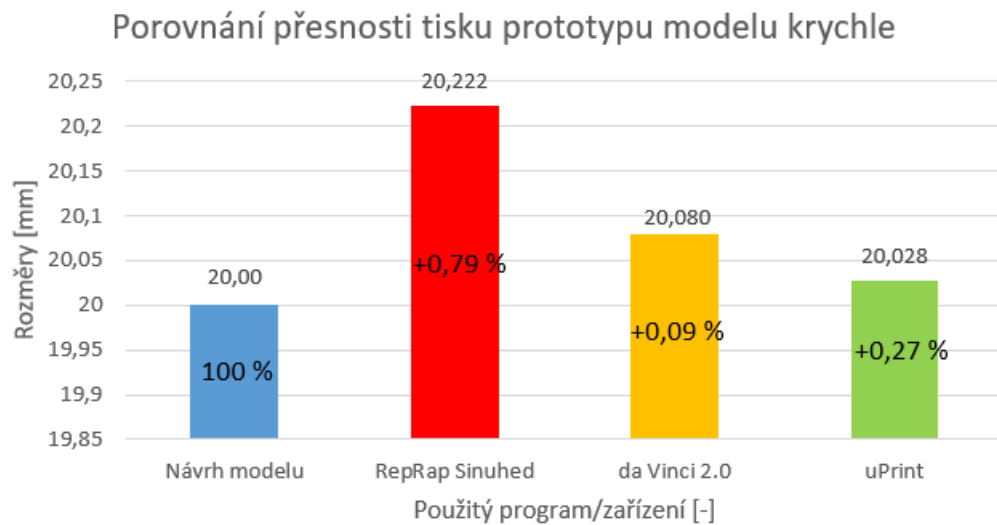
Tab. 7 obsahuje přesnější měření díky použití mikrometru. Krychle se od návrhu tedy liší o pouhých 0,019 mm s průměrnou odchylkou 0,088 mm.

Naměřená data pro jednotlivé výtisky koulí na 3D tiskárně da Vinci 2.0 jsou v příloze III. Výsledky měření jsou podobné jako u tiskárny uPrint, tedy koule z 300 polygonů je nejméně přesná. Model koule měl mít průměr 39,3 mm. Vytisknutý 300 polygonový model má pouze 39,076 mm s průměrnou odchylkou 0,214 mm, respektive 39,0608 mm s průměrnou odchylkou 0,1507 mm, což jsou data získaná pomocí přesnějšího mikrometru. Model koule z 1250 polygonů měřil 39,168 mm s průměrnou odchylkou 0,175 mm, respektive 39,2882 mm s průměrnou odchylkou 0,1379 mm. Nejdetailejší model složený z 5000 polygonů měřil 39,341 mm s průměrnou odchylkou 0,103 mm, respektive 39,3348 mm s průměrnou odchylkou 0,0978 mm.

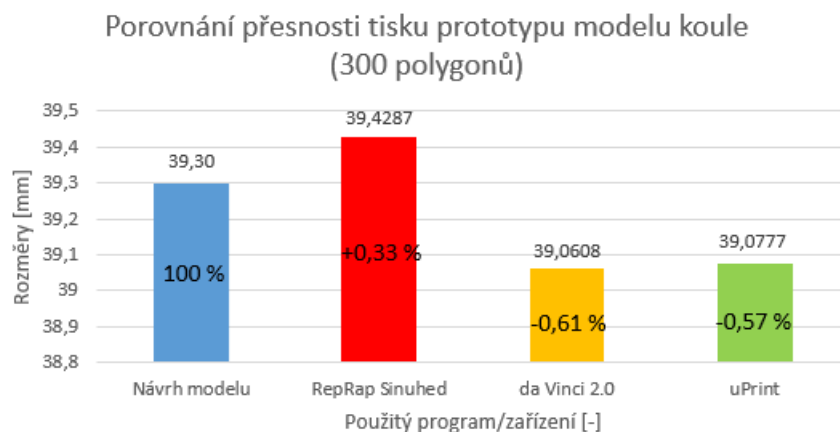
3D tiskárna da Vinci 2.0 je přes svoji relativně nízkou pořizovací cenu velmi přesná. Nejdetailejší kouli zvládla vytisknout s rozdílem pouhých 0,0348 mm oproti 3D modelu.

4.4 Celkové vyhodnocení dat

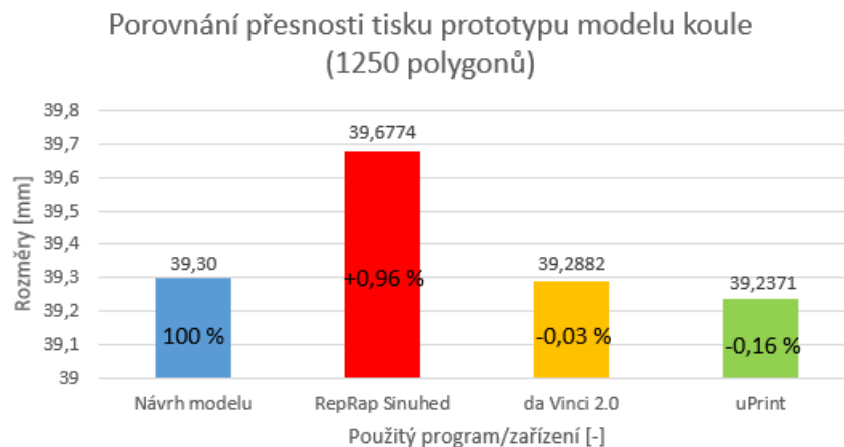
Graf 1 až Graf 4 znázorňují rozměrovou přesnost použitých 3D tiskáren. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejméně přesnou je 3D tiskárna RepRap. 3D tiskárny da Vinci 2.0 a uPrint pracují na podobné úrovni přesnosti.



Graf 1 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu krychle v procentech (vlastní zpracování)

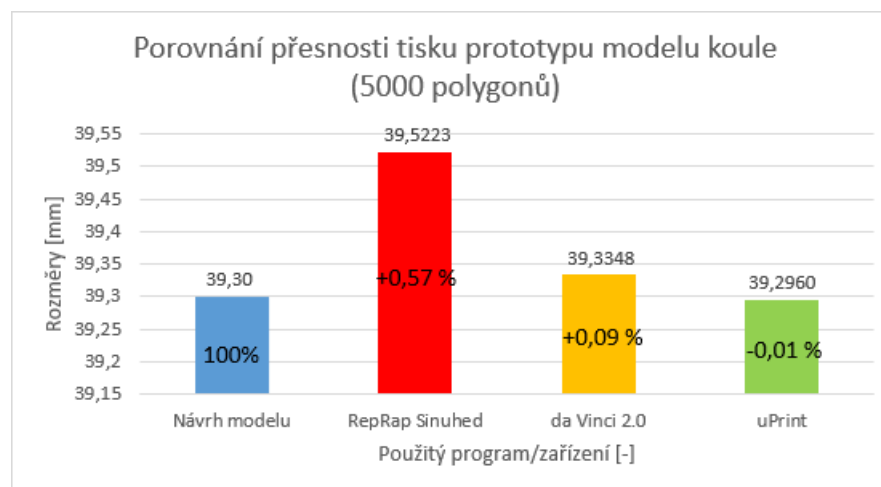


Graf 2 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (300 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)



Graf 3 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (1250 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)

Z dat vyplývá, že nejpresněji vytiskla 1250 polygonový model koule tiskárna da Vinci 2.0 (viz Graf 3). 3D tiskárna uPrint dokázala model koule vytisknout také velmi přesně. U 3D tiskárny RepRap Sinuhed je patrná největší odchylka přesnosti.



Graf 4 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (5000 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)

Dimension uPrint vytiskla model koule z 5000 polygonů s nejmenší chybou (viz Graf 4), a to s rozdílem 0,0040 mm. Tiskárny podobného typu se používají k tisku prototypových součástí a jejich přesnost je tedy na místě. 3D tiskárny da Vinci 2.0 a RepRap Sinuhed jsou spíše pro nadšence nebo pro tisk dílů, které nevyžadují maximální přesnost.

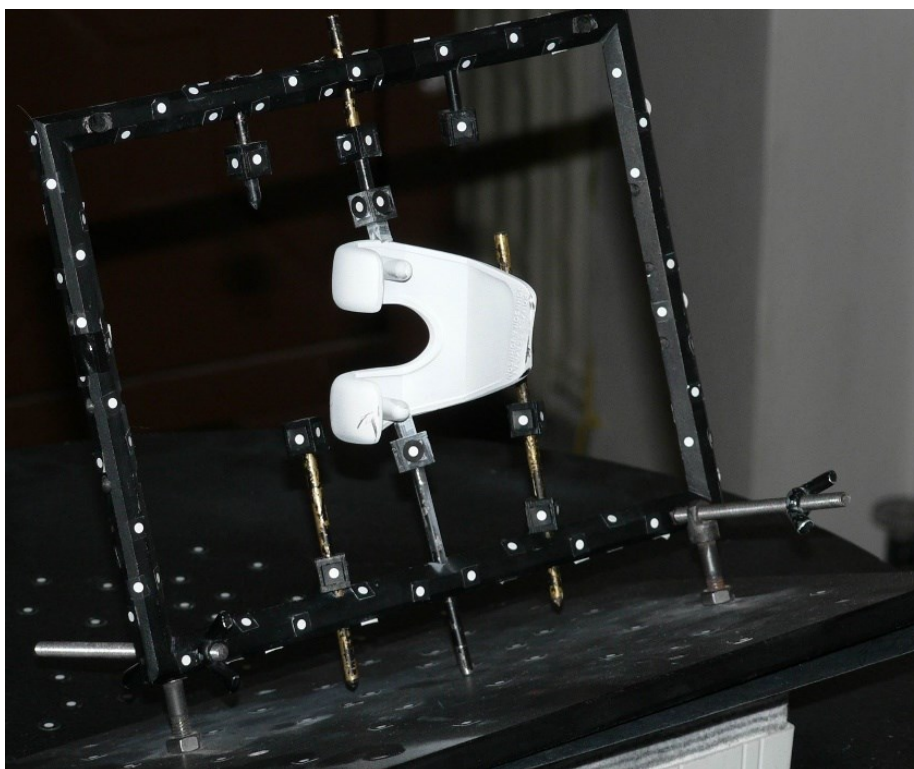
5 NÁVRH PROTOTYPOVÉHO MODELU

Prototyp modelu lebky byl vytvořen pro 3D tiskárny *MakerBot* pomocí 3D digitalizace skutečné lidské lebky. Model byl rozdělen na tři části, dolní čelist a dvě lebeční části. Pro potřeby tisku prototypu byly lebeční části spojeny. Vznikl tak model lebky a dolní čelisti. Model byl stažen z webu *Thingiverse*. (Human skull, 2015) Stránky slouží jako modelová databáze, kde může každý přidávat svoje návrhy pro 3D tisk volně ke stažení.

Prototyp se tisknul z fotopolymeru aditivní metodou SLA.

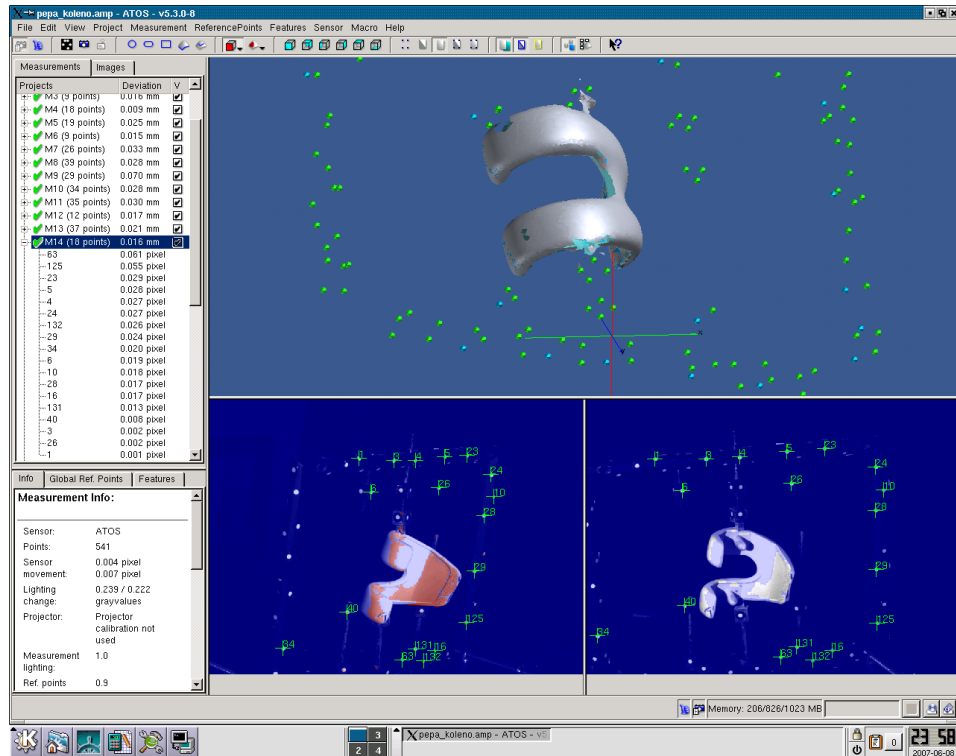
5.1 Reverzní inženýrství

Podstatou reverzního inženýrství je 3D digitalizace objektu. Takto se dá dosáhnout detailů, které nelze vymodelovat nebo by to bylo příliš náročné.



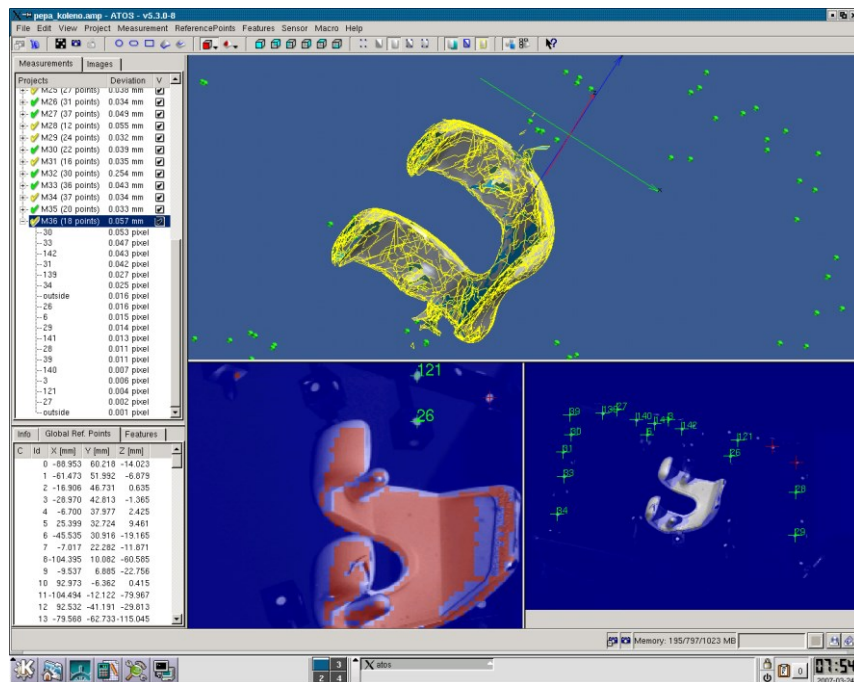
Obr. 22 Proces 3D skenování (Sedlák, 2013)

Na model, nebo do jeho bezprostřední blízkosti, jsou umístěny referenční body (bílé nálepky) pro optický skener a vše se pečlivě nasnímá (viz Obr. 22). Skener odesílá data v reálném čase do počítače, kde se začne generovat 3D model výrobku (viz Obr. 23). Výrobky mohou být dále upravovány a editovány podle potřeby.

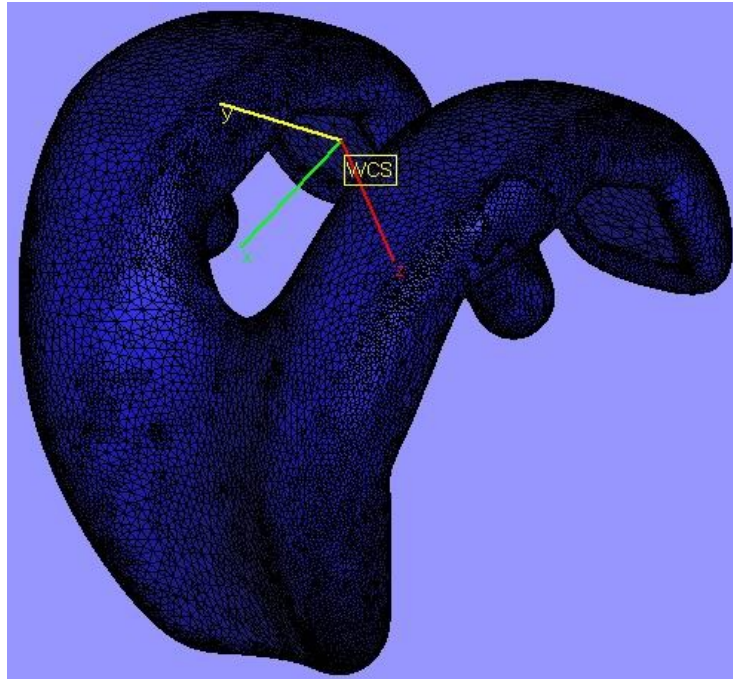


Obr. 23 Spojení a polygonizace skenů (Sedlák, 2013)

Z nasbíraných dat ve formě mraku bodů se poté vytvoří polygonová síť, která se převede na CAD model (viz Obr. 24 a Obr. 25). Tento proces je jedním z nejnáročnějších v celém procesu výroby prototypu.



Obr. 24 Zpracování mraku bodů (Sedlák, 2013)



Obr. 25 Vytvoření výsledné polygonové sítě (Sedlák, 2013)

5.2 Processing a postprocessing prototypu

Jelikož se prototypový model lebky tisknul dutý, musel být v CAD programu přidán otvor (viz Obr. 26), kterým se po vytisknutí odstranil přebytečný fotopolymer. Tisk probíhal na tiskárně Kelant s400 a trval přibližně 7 hodin.



Obr. 26 Vytisknuté modely lebky a dolní čelisti před postprocessingem (vlastní zpracování)

Modely lebky a čelisti byly mechanicky zbaveny podpor (viz Obr. 27). Odlamování podpor je jednoduchý krok, ale musí se dávat pozor, aby nedošlo k odlomení části modelu.



Obr. 27 Prototypový model lebky po mechanickém odstranění podpor (vlastní zpracování)

Po odstranění podpor následuje broušení. Lebka byla broušena jemným broušicím papírem se zrnitostí 2000 a jemnými pilníky. Na Obr. 28 jsou vidět výsledky postprocessingu.



Obr. 28 Model lebky po fázi postprocessingu (vlastní zpracování)

6 ZHODNOCENÍ EKONOMICKÉ VÝHODNOSTI

Tato část je zaměřená na zhodnocení ekonomické výhodnosti tisku. Tisk prototypu lebky na domácí 3D tiskárně ve skutečné velikosti byl porovnán s tiskem na profesionální tiskárně ve firmě *Materialise*, s metodou vstřikolisování plastů a s tiskem pomocí aditivní metody *PolyJet* u firmy *Tecnotrade s.r.o.*

Pro aditivní metody *Stereolitografie* a *PolyJet* se uvažovala stejná výška vrstvy fotopolymeru 0,050 mm.

6.1 Náklady na výrobu prototypu aditivní metodou Stereolitografie

Výroba prototypového modelu lebky ve skutečné velikosti na domácí tiskárně spotřebuje 3 373 ml materiálu fotopolymeru. Cena prototypového modelu byla stanovena na 1000 Kč za 1 000 ml fotopolymeru. Celková cena prototypu je tedy spočítána na 3 373 Kč.

6.2 Komerční výroba lebky

Komerční výroba by mohla být realizovaná pomocí vstřikolisování plastů.

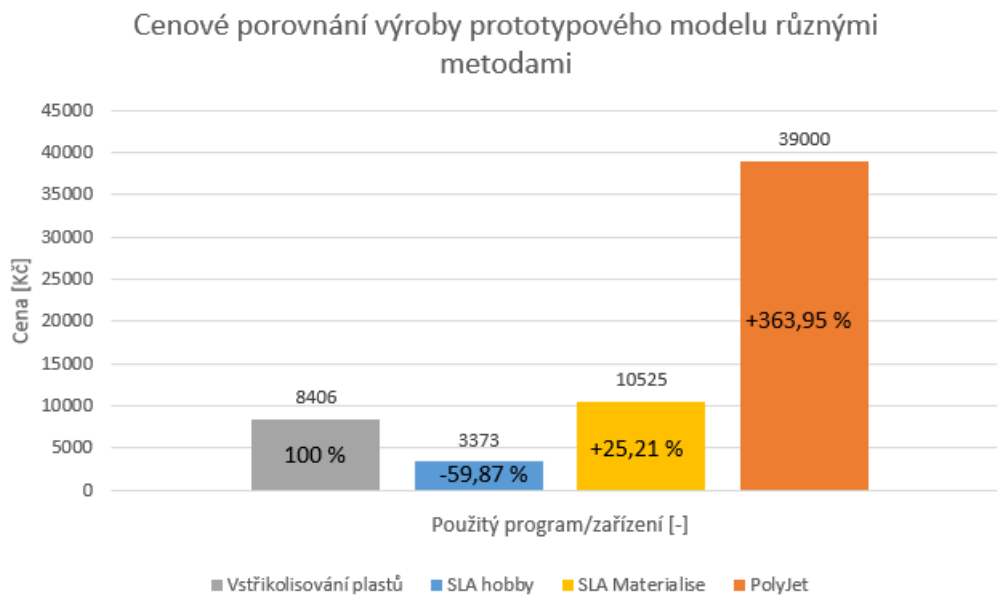
K tomuto typu výroby je zapotřebí vyrobít formu, do níž se bude plastový materiál vstřikovat. S ohledem na cenu, byla vybrána forma silikonová. Velikost formy byla spočítána na 8 200 cm³. Cena silikonové pryskyřice byla stanovena na 1 000 Kč/cm³. Silikonová forma byla naceněna na 8 200 Kč. Materiál z fotopolymeru není možné pro tento výrobní proces použít. Byl proto nahrazen materiálem ABS. Spotřeba materiálu ABS byla spočítána na 411 g. Při ceně 0,5 Kč/g je celková cena modelu 206 Kč. Cena silikonové formy byla rozpočítána mezi výrobky jako fixní náklad.

Do firmy *Tecnotrade s.r.o.* byla zaslána poptávka k nacenění 3D tisku prototypového modelu lebky ve skutečné velikosti aditivní metodou *PolyJet*. K výrobě modelu je potřeba 6 kg modelového a 2 kg suportového materiálu. Cena za výrobu aditivní metodou *PolyJet* byla stanoven na 39 000 Kč.

Firma *Materialise* nacenila 3D tisk prototypového modelu lebky aditivní metodou SLA. Cena výroby prototypového modelu byla stanovena na 10 525 Kč. Pokud by se tiskl stejný model vícekrát, cena by se snižovala.

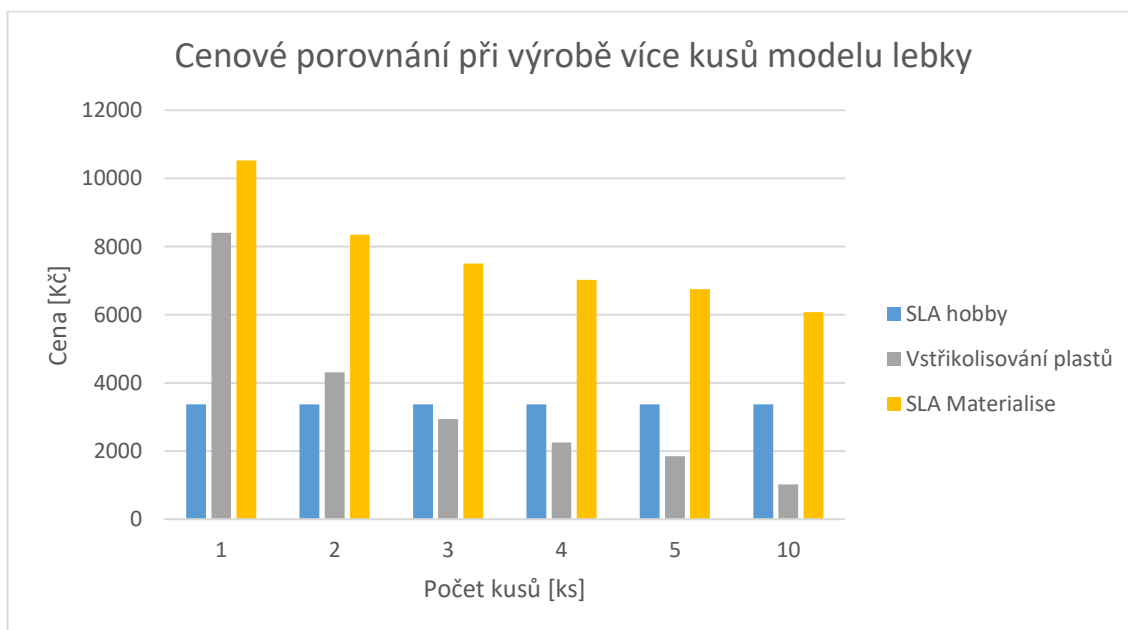
V *Graf 5* je znázorněno cenové porovnání výroby prototypového modelu lebky pomocí domácí SLA tiskárny (SLA hobby), vstřikolisování plastů, profesionální *PolyJet* tiskárny

ve firmě *Tecnotrade s.r.o.* a profesionální SLA tiskárny ve firmě *Materialise* (SLA Materialise).



Graf 5 Náklady na výrobu prototypového modelu lebky různými metodami (vlastní zpracování)

Graf 6 zobrazuje porovnání poklesu ceny za jeden výtisk prototypového modelu lebky, při tisku více kusů.



Graf 6 Nákladové porovnání metod vstřikolisování a Stereolitografie podle počtu kusů (vlastní zpracování)

Z grafů vyplývá, že cena výroby prototypového modelu na profesionální tiskárně firmy *Materialise* a výroby pomocí vstřikování plastů klesá s počtem vytisknutých kusů.

Výroba vstřikováním plastů je na začátku více jak dvojnásobně dražší než 3D tisk na hobby tiskárně aditivní metodou SLA. Od počtu tří kusů je tato metoda nejlevnější variantou výroby.

6.3 Náklady na tisk zmenšeného prototypového modelu

Pro účely demonstrace přesnosti tisku aditivní metody SLA byl vytvořen prototypový model v měřítku 1:2,4. Model byl vytisknut na tiskárně Kelant s400. Spotřeba materiálu fotopolymeru činila 53 ml. Cena modelu byla stanovena na 53 Kč.

6.4 Současný trh

Současná situace na trhu je taková, že modely lebek se prodávají od cca 2 000 Kč až po 75 000 Kč za kus. Výši ceny určuje detailnost, s jakou je lebka vytvořena. (Modely lebky, 2010)

Díky aditivní metodě Stereolitografie lze dosáhnout detailnosti, jakou disponují nejlepší modely lebek na trhu. Výhodou této metody je možnost navrhnout a vytisknout další příslušenství lebky, jako je mozek, oko nebo cévní systém.

Další využití 3D tisku se nabízí v oblasti školství. Díky možnosti navržení jakéhokoliv modelu by bylo možné tisknout různé učební pomůcky – anatomicky přesné modely do biologie, geometrické modely do matematiky, modely molekul do chemie, 3D mapy do zeměpisu atd.

ZÁVĚR

Teoretická část se zabývala aditivní technologií *Rapid Prototyping* – základní princip, jednotlivé fáze výroby, používané metody a aditivní materiály. Konkrétněji byly charakterizovány aditivní metody *Fused Deposition Modeling* a *Stereolitografie*.

Praktická část se zabývala návrhem a konstrukcí referenčních vzorků. Byly popsány jednotlivé kroky v programech *SolidWorks* a *CatalystEX*. Referenční vzorky byly změřeny a data zpracována za účelem zjištění rozměrových přesností. Data pocházela ze tří rozdílných 3D tiskáren z různých cenových a užitkových kategorií. Nejlevnější kategorii představovala 3D tiskárna RepRap Sinuhed, ta byla podle očekávání nejméně přesná. Poloprofesionální 3D tiskárna da Vinci 2.0 a profesionální 3D tiskárna Dimension uPrint dosahovaly obdobných výsledků. Model koule z 5000 polygonů, tedy s nejvyšší mírou detailů, byla vytisknuta 3D tiskárnou Dimension uPrint s odchylkou pouhých 0,01 %.

Dále se praktická část zabývala návrhem prototypového modelu lebky a jeho 3D tisku pomocí aditivní metody *Stereolitografie*. Byly zhodnoceny náklady na prototypovou výrobu a navrženy metody pro komerční výrobu s jejich porovnáním. 3D tisk prototypového modelu pomocí aditivní technologie *PolyJet* byl naceněn firmou *Tecnotrade s.r.o.* na částku 39 000 Kč, je tak bezesporu nejdražší. Cena prototypového modelu vytvořeného na domácí tiskárně aditivní technologií *Stereolitografie* byla stanovena na částku 3 373 Kč. O nacenění této metody byla oslovena také firma *Materialise*. Za výrobu prototypového modelu na profesionální tiskárně požaduje částku 10 525 Kč. Cena se snižuje při větším počtu výtisků. Výroba pomocí vstřikování plastů obnášela vytvoření silikonové formy za 8 200 Kč. Celková cena při výrobě jednoho kusu byla stanovena na částku 8 406 Kč. V této částce je započítána cena vlastního modelu 206 Kč. Cena silikonové formy je rozpočítána mezi prototypové modely, tedy čím více je jich vytvořeno, tím menší bude jednotková cena prototypového modelu.

Zmenšený prototypový model lebky byl vytisknut na domácí tiskárně Kelant s400. Tato výroba byla naceněna na částku 53 Kč.

Práce dokázala, že aditivní metody *Rapid Prototyping* jsou vhodné pro prototypovou výrobu v krátkém čase a malosériovou výrobu.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

3D Biofabrication Strategies for Tissue Engineering and Regenerative Medicine [online], 2014. 16(247-276) [cit. 2020-06-10]. ISSN 1523-9829. Dostupné z: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-bioeng-071813-105155>

3D printing: Fused Deposition Modeling (FDM), 2020. *The Technology House* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.tth.com/3d-printing/fdm-prototyping/>

3D skenování, 2015. *Protocom* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.protocom.cz/3d-skenovani>

3D tech: Rapid prototyping, 2016. *3D tech* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>

Adhezivní přípravky, 2019. *Material pro 3D* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/adhezivni-pripravky/>

DANIEL, Adam, 2013. 3D tisk modelů z běžného kancelářského papíru A4. *CAD.cz* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/hardware/78-hardware/4719-3d-tisk-modelu-z-bezneho-kancelarskeho-papiru-a4.html>

Fotopolymer, 2018. *Trider* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://trider.cz/material/fotopolymer>

Fused Deposition Modeling, 2019. *Materialise* [online]. [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER, 2016. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-582-1.

Human skull, 2015. *Thingiverse* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:622390/files>

HORÁČEK, Milan, 2009. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu [online]. Brno [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM, c2010. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific. ISBN 978-981-277-897-0.

Infill Patterns and Density, 2011. *Slic3r* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings#infill-patterns>

KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI, 2017. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-4876-1.

Modely lebky, 2010. *Anatomické pomůcky* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.anatomicke-pomucky.cz/4-modely-lebky#>

MultiJet Fusion, 2019. *Materialise* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/multi-jet-fusion>

Nekonvenční technologie: Solid Ground Curing, 2008. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>

O nás, 2012. *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/o-nas/>

PolyJet, 2019. *Materialise* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/polyjet>

Postprocessing 3D výtisků krok za krokem, 2018. *Prusa Printers* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/postprocessing-3d-vytisku-krok-za-krokem_33964/

Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing, 2015. *Solid Solutions* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.solidsolutions.co.uk/blog/2015/04/preparing-SOLIDWORKS-models-for-3d-printing/#.Xud220UzZPY>

Přehled technologií 3D tisku, 2018. *Dk metal prominent* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>

Rapid prototyping, 2017. *Evektor* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>

Respirátor z 3D tiskárny, 2020. *Sciencemag* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/respirator-z-3d-tiskarny/>

Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017. *Material pro 3D* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

SEDLÁK, Josef, 2013. *Moderní technologie výroby implantátu kolenního kloubního se specifickými požadavky na tvarové a funkční plochy: Habilitační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie

Shining 3D announces two wireless handheld 3D scanners, 2018. *Spar 3D* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.spar3d.com/news/hardware/shining-3d-announces-two-wireless-handheld-3d-scanners/>

Solid ground curing, 2018. *HiSoUR* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.hisour.com/solid-ground-curing-40617/>

SOLIDVISION, 2010. 3D skenování. *SolidVision* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>

Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing, 2019. *NASA* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/3d-printing-in-space-long-duration-spaceflight-applications

SRIVATSAN, T.S. a T.S. SUDARSHAN, 2016. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4987-1477-8.

Stereolitografie, 2013. *3D-tisk.cz* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>

Stratasys [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/>

Studentská formule z VUT chce znovu dobýt svět, 2018. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vut/f19528/d170748>

Technologie 3D tisku, 2016. *Na3D* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>

Technologie zpracování plastů: Technologie vstřikování. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/183/01.html>

uPrint SE, 2012. *Dimension* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z:
<http://www.3dimensionprint.co.uk/printers/printing-uprint.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Třírozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIIRC	Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky
CT	Počítačová tomografie
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFP3	Filtering Face Piece 3
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJF	MultiJet Fusion
MS	Microsoft
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
PC	Polykarbonát
PET-G	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Kyselina polyléčná
RICAIP	Výzkumné a inovační centrum pro pokročilou průmyslovou výrobu
RP	Rapid Prototyping
SGC	Solid Ground Curing
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolitografie

STL	Stereo Lithography
UV	Ultrafialový
VUT	Vysoké Učení Technické

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Průběh metody vstřikolisování plastů (Technologie zpracování plastů).....	12
Obr. 2 Průběh 3D skenování objektu bezdrátovým skenerem (Shining 3D announces two wireless handheld 3D scanners, 2018).....	13
Obr. 3 STL soubory pro tisk koulí s rozdílnou úrovní přesnosti (Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing, 2015).....	14
Obr. 4 Typy výplní, zleva doprava 20 %, 40 %, 60 % a 80 % výplně. (Infill Patterns and Density, 2011).....	15
Obr. 5 Schéma aditivní metody FDM. (3D printing, 2020)	16
Obr. 6 Postprocessing aditivní metody LOM a jeho konečný výsledek (Daniel, 2013)	20
Obr. 7 Princip aditivní metody SGC (Solid ground curing, 2018).....	22
Obr. 8 Proces vytváření skořápky pro koncový kovový materiál (Horáček, 2009)	24
Obr. 9 Model lebek a jejich oběhového systému siamských dvojčat (Chua, Leong a Lim, 2010).....	25
Obr. 10 NASA astronaut Barry (Butch) Wilmore drží ráčnový klíč vytisknutý v roce 2014 na Mezinárodní vesmírné stanici (Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing, 2019)	27
Obr. 11 Tiskárna Dimension uPrint (Stratasys).....	29
Obr. 12 Pracovní prostředí programu SolidWorks (vlastní zpracování)	30
Obr. 13 Pracovní prostředí programu CatalystEX (vlastní zpracování).....	30
Obr. 14 Model koule v programu CatalystEX, bezprostředně po nahrání (vlastní zpracování)	31
Obr. 15 Model koule v programu CatalystEX s požadovanými parametry tisku (vlastní zpracování).....	31
Obr. 16 Nastavení orientace 3D modelu v softwaru CatalystEX (vlastní zpracování)	32
Obr. 17 Vygenerování jednotlivých vrstev 3D modelu a jeho podpor softwarem CatalystEX (vlastní zpracování).....	32
Obr. 18 Bokorys jednotlivých vrstev modelu v programu CatalystEX (vlastní zpracování)	33
Obr. 19 Rozvržení modelů na tiskové podložce v softwaru CatalystEX (vlastní zpracování)	34
Obr. 20 Tisková fronta s detaily tisku v programu CatalystEX (vlastní zpracování).....	34
Obr. 21 Hotové výtisky z tiskárny uPrint na tiskové podložce (vlastní zpracování).....	35
Obr. 22 Proces 3D skenování (Sedlák, 2013).....	44
Obr. 23 Spojení a polygonizace skenů (Sedlák, 2013).....	45
Obr. 24 Zpracování mraku bodů (Sedlák, 2013)	45
Obr. 25 Vytvoření výsledné polygonové sítě (Sedlák, 2013).....	46

Obr. 26 Vytisknuté modely lebky a dolní čelisti před postprocessingem (vlastní zpracování)	46
Obr. 27 Prototypový model lebky po mechanickém odstranění podpor (vlastní zpracování)	47
Obr. 28 Model lebky po fázi postprocessingu (vlastní zpracování)	47

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu krychle v procentech (vlastní zpracování)</i>	<i>42</i>
<i>Graf 2 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (300 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)</i>	<i>42</i>
<i>Graf 3 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (1250 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)</i>	<i>43</i>
<i>Graf 4 Porovnání přesnosti tisku prototypu modelu koule (5000 polygonů) v procentech (vlastní zpracování)</i>	<i>43</i>
<i>Graf 5 Náklady na výrobu prototypového modelu lebky různými metodami (vlastní zpracování)</i>	<i>49</i>
<i>Graf 6 Nákladové porovnání metod vstřikování a Stereolitografie podle počtu kusů (vlastní zpracování)</i>	<i>49</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Přehled základních vlastností materiálů ABS a PLA (Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG, 2017)</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 2 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABSplus posuvným měřidlem (vlastní zpracování)</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 3 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABSplus mikrometrem (vlastní zpracování)</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 4 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu PLA posuvným měřidlem (vlastní zpracování).....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu PLA mikrometrem (vlastní zpracování)</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABS posuvným měřidlem (vlastní zpracování)</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7 Hodnocení rozměrové přesnosti modelu prototypu krychle vyrobené z aditivního materiálu ABS mikrometrem (vlastní zpracování).....</i>	<i>41</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Naměřené hodnoty referenčních vzorků z tiskárny Dimension uPrint (ABSplus)

Příloha P II: Naměřené hodnoty referenčních vzorků z tiskárny RepRap Sinuhed (PLA)

Příloha P III: Naměřené hodnoty referenčních vzorků z tiskárny da Vinci 2.0 (ABS)

6.5 PŘÍLOHA P I: Naměřené hodnoty referenčních vzorků koulí z tiskárny Dimension uPrint (ABSplus)

Posuvné měřidlo	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,60	39,30	38,90	1	39,10	39,60	39,15	1	39,10	39,60	39,15
	2	38,79	39,23	38,94	2	39,44	39,18	39,09	2	39,55	39,56	39,20
	3	38,98	39,18	39,02	3	39,41	39,46	39,31	3	39,48	39,42	39,26
	4	39,16	38,89	39,26	4	39,35	39,42	39,61	4	39,39	39,19	39,33
	5	39,24	38,87	39,28	5	39,52	39,53	39,25	5	39,13	39,22	39,44
	6	39,08	38,61	38,78	6	39,33	39,15	39,14	6	39,19	39,35	39,46
	7	39,01	39,05	38,97	7	39,12	39,13	39,33	7	39,29	39,46	39,49
	8	38,66	39,02	38,66	8	39,34	39,57	39,44	8	39,31	39,33	39,56
9	39,30	38,99	38,79	9	39,18	39,18	39,52	9	39,41	39,29	39,51	
10	38,64	39,26	39,00	10	39,59	39,35	39,36	10	39,37	39,37	39,41	
Průměr	38,946	39,040	38,960	Průměr	39,338	39,357	39,320	Průměr	39,322	39,379	39,381	
Průměrná odchylka	0,219	0,164	0,146	Průměrná odchylka	0,124	0,159	0,132	Průměrná odchylka	0,118	0,105	0,117	
Celkový průměr			38,982	Celkový průměr			39,338	Celkový průměr			39,361	
Celková průměrná odchylka			0,176	Celková průměrná odchylka			0,138	Celková průměrná odchylka			0,113	

Mikrometr	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,885	39,311	38,937	1	39,151	39,336	39,218	1	39,126	39,498	39,272
	2	39,256	38,934	39,285	2	39,323	39,155	39,155	2	39,130	39,434	39,128
	3	39,123	39,147	39,307	3	39,224	39,239	39,238	3	39,263	39,315	39,373
	4	39,050	39,186	38,911	4	39,186	39,180	39,313	4	39,261	39,333	39,169
	5	38,953	39,287	39,081	5	39,311	39,162	39,256	5	39,436	39,212	39,196
	6	38,893	38,932	38,870	6	39,187	39,303	39,302	6	39,154	39,497	39,133
	7	38,961	38,975	38,895	7	39,172	39,206	39,311	7	39,245	39,165	39,440
	8	39,164	39,051	39,082	8	39,193	39,276	39,222	8	39,253	39,410	39,378
9	39,249	39,061	39,115	9	39,320	39,166	39,157	9	39,474	39,408	39,169	
10	39,303	39,029	39,097	10	39,221	39,300	39,329	10	39,406	39,350	39,252	
Průměr	39,0837	39,0913	39,0580	Průměr	39,2288	39,2323	39,2501	Průměr	39,2748	39,3622	39,2510	
Průměrná odchylka	0,1353	0,1132	0,1238	Průměrná odchylka	0,0535	0,0585	0,0521	Průměrná odchylka	0,0983	0,0872	0,0920	
Celkový průměr			39,0777	Celkový průměr			39,2371	Celkový průměr			39,2960	
Celková průměrná odchylka			0,1241	Celková průměrná odchylka			0,0547	Celková průměrná odchylka			0,0925	

6.6 PŘÍLOHA P II: Naměřené hodnoty referenčních vzorků koulí z tiskárny RepRap Sinuhed (PLA)

Posuvné měřidlo	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,90	39,70	39,43	1	39,20	40,10	39,82	1	39,30	40,10	40,06
	2	39,43	39,13	39,63	2	39,82	39,87	39,23	2	40,03	40,06	39,80
	3	39,70	39,18	39,47	3	39,91	40,01	39,94	3	39,37	39,30	39,52
	4	39,44	39,34	39,24	4	39,28	39,42	39,54	4	39,38	39,53	39,42
	5	39,01	39,43	39,04	5	39,77	39,43	39,62	5	39,35	39,36	39,81
	6	38,91	39,03	39,00	6	39,58	39,24	40,00	6	39,67	39,44	39,48
	7	39,39	39,52	39,33	7	40,07	39,57	39,27	7	39,50	39,31	39,88
	8	38,99	39,62	39,05	8	39,84	40,01	39,45	8	39,47	39,51	40,01
9	39,15	39,02	39,06	9	39,42	39,91	39,48	9	39,73	39,44	39,81	
10	39,05	39,56	39,15	10	40,02	39,39	40,02	10	39,63	39,37	39,72	
Průměr	39,197	39,353	39,240	Průměr	39,691	39,695	39,637	Průměr	39,543	39,542	39,751	
Průměrná odchylka	0,234	0,213	0,180	Průměrná odchylka	0,257	0,285	0,246	Průměrná odchylka	0,178	0,215	0,173	
Celkový průměr			39,263	Celkový průměr			39,674	Celkový průměr			39,612	
Celková průměrná odchylka			0,209	Celková průměrná odchylka			0,263	Celková průměrná odchylka			0,189	

Mikrometr	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,984	39,792	39,765	1	39,276	39,989	39,982	1	39,270	39,795	39,274
	2	39,764	39,286	39,791	2	39,693	39,647	39,368	2	39,352	39,671	39,646
	3	39,337	39,671	39,155	3	39,905	39,578	39,576	3	39,368	39,366	39,317
	4	39,233	39,789	39,688	4	39,920	39,816	39,872	4	39,386	39,427	39,747
	5	39,132	39,225	39,645	5	39,787	39,628	39,958	5	39,564	39,282	39,720
	6	39,405	39,198	39,165	6	39,669	39,981	39,495	6	39,394	39,561	39,603
	7	39,386	39,755	39,561	7	39,986	39,372	39,404	7	39,565	39,589	39,512
	8	39,692	39,779	39,200	8	39,371	39,319	39,332	8	39,654	39,663	39,766
9	39,028	39,424	39,449	9	39,894	39,927	39,601	9	39,621	39,380	39,662	
10	38,990	39,489	39,084	10	39,350	39,836	39,790	10	39,472	39,439	39,602	
Průměr	39,2951	39,5408	39,4503	Průměr	39,6851	39,7093	39,6378	Průměr	39,4646	39,5173	39,5849	
Průměrná odchylka	0,2217	0,2164	0,2397	Průměrná odchylka	0,2149	0,2005	0,2102	Průměrná odchylka	0,1106	0,1385	0,1303	
Celkový průměr			39,4287	Celkový průměr			39,6774	Celkový průměr			39,5223	
Celková průměrná odchylka			0,2259	Celková průměrná odchylka			0,2085	Celková průměrná odchylka			0,1265	

6.7 PŘÍLOHA P III: Naměřené hodnoty referenčních vzorků koulí z tiskárny da Vinci 2.0 (ABS)

Posuvné měřidlo	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,60	39,50	38,96	1	38,90	39,60	39,19	1	39,15	39,65	39,35
	2	39,44	39,46	39,16	2	39,10	39,31	39,04	2	39,35	39,33	39,16
	3	39,38	39,33	39,33	3	39,19	39,06	39,31	3	39,30	39,26	39,43
	4	39,12	39,15	39,49	4	38,93	39,03	38,94	4	39,42	39,24	39,19
	5	39,02	39,06	39,13	5	38,92	39,07	39,43	5	39,28	39,20	39,44
	6	38,77	38,66	38,88	6	39,29	38,91	39,59	6	39,39	39,43	39,41
	7	38,92	38,79	39,29	7	39,28	39,04	38,99	7	39,35	39,28	39,17
	8	39,01	38,94	38,95	8	39,12	39,39	38,91	8	39,45	39,54	39,21
	9	38,69	38,82	39,18	9	38,99	39,36	39,38	9	39,60	39,38	39,40
	10	39,26	39,22	38,77	10	39,29	39,07	39,42	10	39,27	39,42	39,19
	Průměr	39,021	39,093	39,114	Průměr	39,101	39,184	39,220	Průměr	39,356	39,373	39,295
Průměrná odchylka	0,223	0,239	0,179	Průměrná odchylka	0,133	0,185	0,206	Průměrná odchylka	0,087	0,111	0,111	
Celkový průměr			39,076	Celkový průměr			39,168	Celkový průměr			39,341	
Celková průměrná odchylka			0,214	Celková průměrná odchylka			0,175	Celková průměrná odchylka			0,103	

Mikrometr	300 polygonů	Série měření			1250 polygonů	Série měření			5000 polygonů	Série měření		
	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3	Číslo měření	1	2	3
	1	38,730	39,429	39,071	1	38,990	39,429	39,261	1	39,130	39,527	39,343
	2	39,066	39,070	39,119	2	39,260	39,260	39,222	2	39,261	39,343	39,230
	3	39,398	39,382	38,813	3	39,274	39,062	39,178	3	39,267	39,242	39,338
	4	38,891	39,260	39,125	4	39,279	39,277	39,521	4	39,444	39,230	39,450
	5	39,072	39,213	38,733	5	39,403	39,445	39,479	5	39,293	39,288	39,183
	6	39,007	39,070	38,940	6	39,119	39,369	39,074	6	39,504	39,227	39,423
	7	38,949	38,969	38,882	7	39,529	39,161	39,190	7	39,490	39,137	39,261
	8	38,795	39,050	39,152	8	39,346	39,371	39,148	8	39,382	39,432	39,247
	9	38,942	38,953	39,333	9	39,476	38,995	39,498	9	39,223	39,460	39,445
	10	38,779	39,311	39,321	10	39,460	39,099	39,470	10	39,368	39,436	39,441
	Průměr	38,9629	39,1707	39,0489	Průměr	39,3136	39,2468	39,3041	Průměr	39,3362	39,3322	39,3361
Průměrná odchylka	0,1383	0,1483	0,1655	Průměrná odchylka	0,1292	0,1340	0,1503	Průměrná odchylka	0,1014	0,1074	0,0847	
Celkový průměr			39,0608	Celkový průměr			39,2882	Celkový průměr			39,3348	
Celková průměrná odchylka			0,1507	Celková průměrná odchylka			0,1379	Celková průměrná odchylka			0,0978	