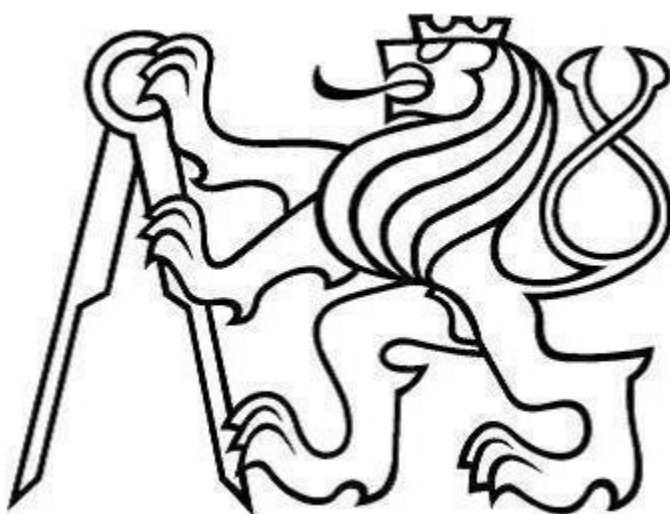


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Bakalářská práce

Technologické možnosti aditivních technologií

Praha 2018

Autor: Václav Knotek

Vedoucí: Ing. Libor Beránek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knotek** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **460005**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologické možnosti aditivní výroby

Název bakalářské práce anglicky:

Technological possibilities of additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Vývoj aditivních technologií v oblasti 3D tisku polymerních materiálů
2. Technologie 3D tisku polymerů z prášku, kapalné fáze a extrudovaného drátu
3. Srovnání používaných materiálů a kvalitativních parametrů tisku
4. Realizace návrhu a tisku vybrané součásti
5. Rozměrová kontrola kvality vybraného dílu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

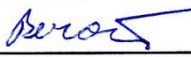
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

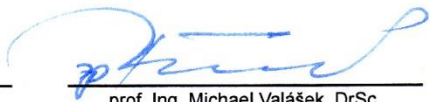
Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

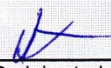

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27. 4. 2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a na základě literatury a pramenů uvedených v Seznamu použité literatury

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a všem, kteří mě při psaní bakalářské práce podporovali.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá aditivními technologiemi v oblasti polymerních materiálů. Teoretická část je zaměřena na vznik a vývoj této technologie. Dále popisuje princip nejrozšířenějších metod, jejich využití ve výrobě a kvalitu tisku. Na závěr jsou uvedeny nejpoužívanější materiály a jejich technické specifikace. V praktické části je popis procesu výroby dílu v podobě ráčny a následuje tisk tří právě těchto součástí v různých kvalitativních provedeních. V závěrečné části jsou výsledky měření, které byly provedeny pro porovnání dílů.

Klíčová slova: Aditivní technologie, 3D tisk, polymerní materiály, ráčna

Abstract

Bachelor thesis deals with additive manufacturing in polymer materials. The theoretical part is focused on the development of this technology. It also describes the principle of the most widely used methods, their use in production and print quality. In conclusion, are presented the most used materials and their technical specifications. The practical part describes the production process of the part in the form of a ratchet, followed by the printing of three of these parts in various qualitative designs. In the final section are the results of the measurements made for comparison of the parts.

Key words: Additive manufacturing, 3D printing, polymeric materials, ratchet

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Definice Aditivní technologie (3D tisku).....	9
2.1	Výrobní proces.....	9
2.1.1	Tvorba 3D modelu	10
2.1.2	Transformace do STL (Standard Tessellation Language).....	10
2.1.3	Výroba modelu.....	10
2.1.4	Postprocessing.....	11
2.2	Historie a vývoj 3D tisku	11
2.3	3D tisk v nynější podobě.....	13
2.3.1	Inovace v oblasti polymerních materiálů	13
2.3.2	Vývoj softwaru.....	14
2.3.3	Rychlejší tisk a zvýšená produktivita.....	14
3	Přehled technologií 3D tisku polymerů.....	15
3.1	Technologie vytvrzování tekutého materiálu.....	16
3.1.1	Stereolitografie (SLA).....	16
3.1.2	DLP (Direct LightProcessing).....	21
3.1.3	PolyJet.....	23
3.2	Technologie spékání práškového materiálu	25
3.2.1	SLS (Selective Laser Sintering)	25
3.3	Technologie extruze	28
3.3.1	FDM (FusedDeposition Modeling).....	29
3.4	Technologie nanášení fóliového materiálu	32
3.4.1	LOM (Laminated Object Manufacturing).....	32
3.5	Porovnání nejpoužívanějších metod 3D tisku (SLA, SLS, FDM)	34
4	Přehled polymerních materiálů	35
4.1	Materiály pro metodu FDM	35
4.1.1	ABS (Akrylonil Butadien Styren).....	35
4.1.2	PLA (Polylactic Acid).....	36

4.1.3	PVA (Polyvinylalkohol).....	36
4.1.4	Srovnání mechanických vlastností dalších používaných materiálů	37
4.2	Materiály pro metodu SLA	38
4.2.1	Standardní pryskyřice.....	38
4.2.2	Jasná pryskyřice	39
4.2.3	Tvrdá pryskyřice	39
4.3	Materiály pro metodu SLS.....	39
4.3.1	Polyamid 12	39
4.3.2	Skleněný nylon.....	40
4.3.3	Nylon s uhlíkovými vlákny	40
5	Tisk a měření funkční součásti (Ráčny).....	41
5.1	3D Model součásti	41
5.2	Konverze STL.....	42
5.3	Import STL do 3D tiskárny	42
5.3.1	Z-SUITE: Model	42
5.3.2	Z-SUITE: Analýza	43
5.3.3	Z-SUITE: Podpůrná konstrukce.....	44
5.3.4	Nastavení tisku	44
5.4	Provedení tisku.....	47
5.5	Měření součástí	47
5.5.1	Měření na souřadnicovém měřicím přístroji ZEISS UMC 1000	47
5.5.2	Měření drsností pomocí měřicího zařízení MarSurf LD 120	54
5.5.3	Vizuální kontrola.....	57
6	Závěr	59
7	Seznam použitých zkratk.....	60
8	Seznam použité literatury.....	61

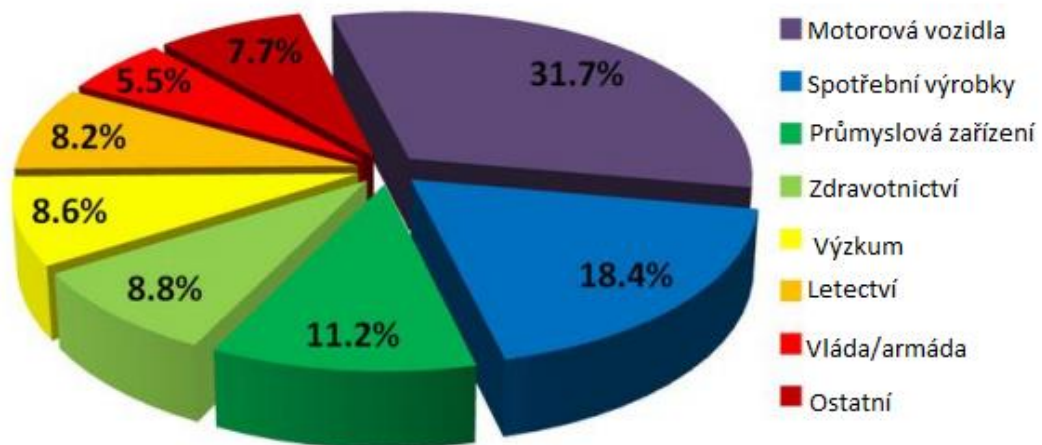
1 Úvod

Aditivní technologie neboli 3D tisk je odvětví technologie, které se rozvíjí každým dnem. 3D tisk je rozsáhlý v obrovské škále průmyslu, od strojírenství přes stavebnictví až po zdravotní průmysl. Principem je nanášení vrstev daného materiálu na sebe a formování tak žádaného objektu, který je předlohou v CAD systému. Jelikož jde vývoj stále dopředu, a tím se zvyšuje kvalita tisku a tudíž i samotného výrobku, zjišťuje se, že aditivní technologie nemusí sloužit jen na výrobu prototypů používaných ve velkosériové výrobě při optimalizaci produktů, ale dokáže nahradit součásti, které byly vyráběny složitější a dražší formou. V dnešní době můžeme tisknout téměř jakýkoliv tvar a velikost výrobku a máme na výběr velké množství tisknutelných materiálů. V bakalářské práci se budu zabývat tiskem z polymerních materiálů, které jsou nejrozšířenější v oblasti 3D tisku, ale lze již tisknout ze skla, dřeva nebo kovu. Cílem teoretické části je přiblížení aditivní technologie, a to pomocí definice 3D tisku, výrobním procesem a historickým vývojem této mladé technologie. Popis využívaných technologií a následné specifikace polymerních materiálů by měly poukázat na klady a zápory při využití 3D tisku.

Praktická část je zaměřena na výrobní proces a měření funkční součásti (ráčny) ve třech kvalitativních provedeních. Ráčnu jsem vybral z důvodu, jelikož je to součást vhodná právě pro zobrazení schopností 3D tisku. Lze zde ukázat jak průběh tisku rovinných ploch, tak i válcových. Tisk tří výtisků s různým nastavením parametrů tisku má za úkol zobrazit kvalitu povrchu a také to, zdali si součást dokáže udržet svojí funkčnost. Následné měření má dokázat to, jak moc jsou výtisky přesné, a zdali dosáhnou předem daných tolerancí.

2 Definice Aditivní technologie (3D tisku)

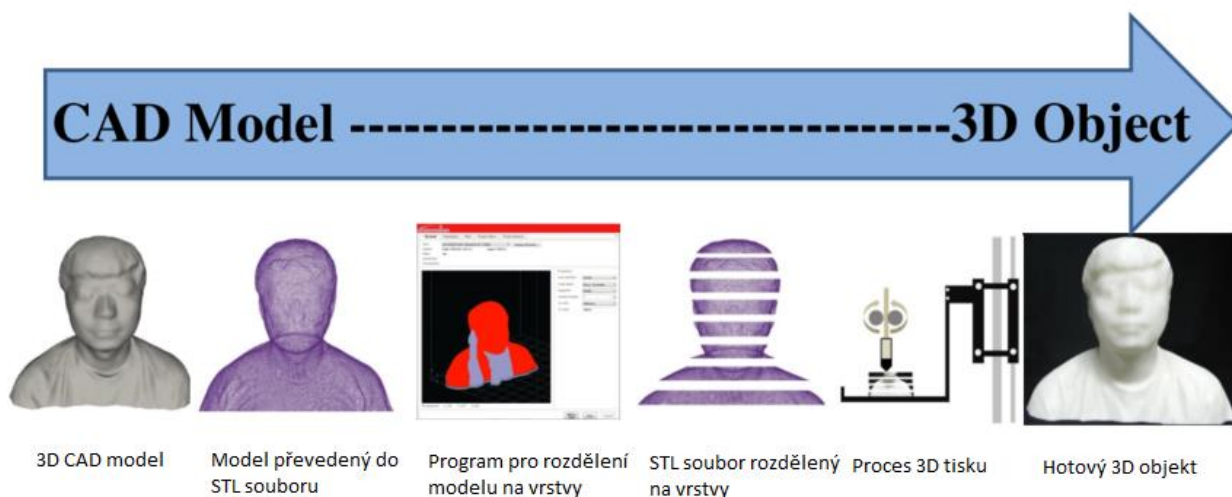
Jelikož je to technologie aditivní, tak materiál přidáváme, na rozdíl od obrábění, kde materiál ubíráme. Aditivní technologie tedy znamená tvoření trojrozměrného objektu vrstvením roztaveného nebo částečně roztaveného materiálu na sebe. K tisku používáme různé materiály, jako je plast, kov, dřevo ale v dnešní době i jedlé látky, jako je čokoláda apod. Objekty digitálně definujeme pomocí 3D CAD softwaru, ve kterém nejprve model vytvoříme a následně rozdělíme na tenké vrstvy. Tato informace pak vede směr trysky nebo tiskové hlavy a nanáší materiál vrstvu po vrstvě. Když materiál vychladne nebo se vytvrdí, vznikne nám trojrozměrný objekt. V příloženém **grafu č. 1** můžeme vidět použití aditivních technologií.[1] [2]



Graf.č1 - Využití Aditivních technologií v průmyslu [52]

2.1 Výrobní proces

Proces výroby je stejný pro všechny způsoby použití 3D tiskárny. Ať již chceme vyrobit testovací artikl nebo funkční výrobek, musíme si výrobu rozdělit na několik částí. Na **obrázku č. 1** lze vidět výrobní proces 3D tisku krok po kroku.



Obrázek č. 1 - Výrobní proces 3D tisku [26]

2.1.1 Tvorba 3D modelu

Prvním krokem je tvorba digitálního modelu. Nejčastější metodou pro tvorbu modelu je CAD software, ale získat ho můžeme i pomocí 3D skeneru. Existuje mnoho CAD programů, ať již bezplatných či profesionálních, a většina nám již umí poskytnout simulaci chování vytisknutého modelu.

2.1.2 Transformace do STL (Standard Tessellation Language)

Hlavním bodem je potřeba převodu 3D modelu do STL souboru. STL používá trojúhelníkovou síť a tím popisuje povrch daného objektu. Čím více je hustější síť, tím kvalitnější povrch výtisku budeme mít. Při převodu na STL soubor musíme vzít v potaz velikost a tvar modelu.

2.1.3 Výroba modelu

Po rozdělení modelu můžeme začít s 3D tiskem. Většina tiskáren je automatizovaná, takže obsluha bude zasahovat pouze při vyčerpání materiálu či softwarové chybě.

2.1.4 Postprocessing

Po vytisknutí a vyjmutí modelu z tiskárny je třeba model očistit a zbavit podpor, pokud byly použity. Následují dokončovací operace, které se liší podle typu 3D tisku. [3]

2.2 Historie a vývoj 3D tisku

Na začátku 90. let byl 3D tisk známý jako rapid prototyping (RP). Prototyp nám umožňuje testovat a kontrolovat daný objekt před zahájením výroby součásti. Rapid prototyping se vyznačuje rychlou výrobou prototypu, která bude trvat několik hodin či dní, podle tvaru a velikosti vyráběné součásti. Modely v RP se tvoří pomocí softwarového programu CAD a ten definuje způsob výroby objektu. S používáním 3D tisku se začalo v Messtechutském technologickém institutu (MIT) a firmě s názvem 3D systems. [4]

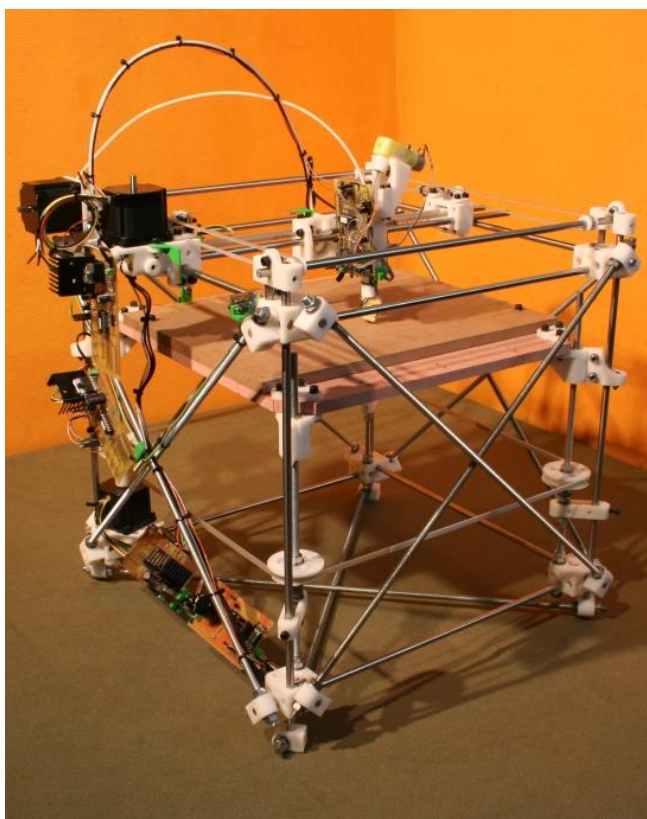
V roce 1986 si Charles Hull nechal patentovat technologii zvanou stereolitografie. Materiál se vytvrzuje pomocí různých vlnových délek, nejčastěji se používá UV záření. Metoda funguje na principu trojrozměrného laserového tisku s použitím UV laseru a tekutého fotonopolymeru. Zařízení pro veřejnost, které dokázalo tisknout ve 3D formátu vytvořil Hull na konci 90. let. Stroj nesl název **SLA-1**, a jednalo se o stereolitografický aparát, který měl nést známky nynějších 3D tiskáren, i když se jako 3D tiskárna neoznačoval. První model, který byl nabídnut veřejnosti, nesl název **SLA-250**. [5]



Obrázek č. 2 - Tiskárna SLA- 1 [27]

V oblasti 3D tisku dlouhou dobu vévodila firma 3D systems, ve které byl i Charles Hull, a ta například v roce 1996 prodala 600 SLA strojů po celém světě. Při nástupu konkurence začaly vznikat nové technologie, a tak nám Carl Deckard představil v roce 1988 na univerzitě v Texasu technologii zvanou SLS, při které nahradil tekutý materiál práškem. Mezitím spoluzakladatel společnosti Stratasys INC. Scott Crump podal patent na jednu z nejvyužívanějších technologií 3D tisku FDM (fusion deposition modeling). V roce 1993 si Massachusettský technologický institut nechal patentovat technologii trojrozměrných technik. Firma 7 Corporation, která koupila licenci právě na tuto technologii, začala vyvíjet stroje pro 3D tisk. V roce 2003 ale patenty vypršely a začaly se objevovat nové technologie využívající fotopolymer. [6] [7]

Přelom v oblasti 3D tisku nastal v roce 2005. Andrew Bowyer založil projekt RepRap s myšlenkou vyrobit 3D tiskárnu, která by vytiskla většinu svých součástí. Projekt byl veden jako Open Source, což znamenalo, že na vývoj tiskárny mohl přispět jakýkoliv nadšenec z celého světa. Z tohoto projektu vzešla v roce 2008 tiskárna s názvem Darwin, viz **obr. č. 3**, která splňovala všechna požadovaná kritéria samo-replikační tiskárny. [8] [9]



Obrázek č. 3 - RepRap Darwin tiskárna [28]

2.3 3D tisk v nynější podobě

Dnes je tisknuto pouze 0,01% funkčních součástí. Namísto toho je technologie využívána převážně k tvorbě prototypů, což umožňuje společnostem upravovat modely výrobků snadněji a levněji než tomu je u tradičních metod jako je např. slévání či obrábění. Avšak pomalu se začíná posouvat za hranice prototypů na výrobu plně používaných produktů. Například letadlová společnost Airbus používá tištěné části ve svých letadlech a 98% naslouchátek vyrobených po celém světě se tiskne pomocí 3D tiskáren, které dokážou vytvořit model na míru podle tvaru ucha zákazníka. [23]



Obrázek č. 4 - Naslouchadlo vytištěné pomocí 3D tisku [29]

2.3.1 Inovace v oblasti polymerních materiálů

Polymerní materiály se rychle vyvíjejí. Nejperspektivnějším materiálem pro výrobu funkčních součástí metodou FDM se zdá ULTEM. Ten se vyznačuje tepelnou a chemickou vodivostí a vysokou pevností v tahu a tím je vhodný pro automobilový a letecký průmysl. Na bázi práškových materiálů se využívá nylon vyztužený uhlíkem či sklem. Například společnost McLaren Racing vyrábí vyztužené nylonové komponenty pro své závodní vozy Formule 1 pomocí 3D tisku ve snaze snížení hmotnosti a tím zvýšení výkonnosti. [24] [30]



Obrázek č. 5 - Hydraulické vedení používané pro vozy F1[30]

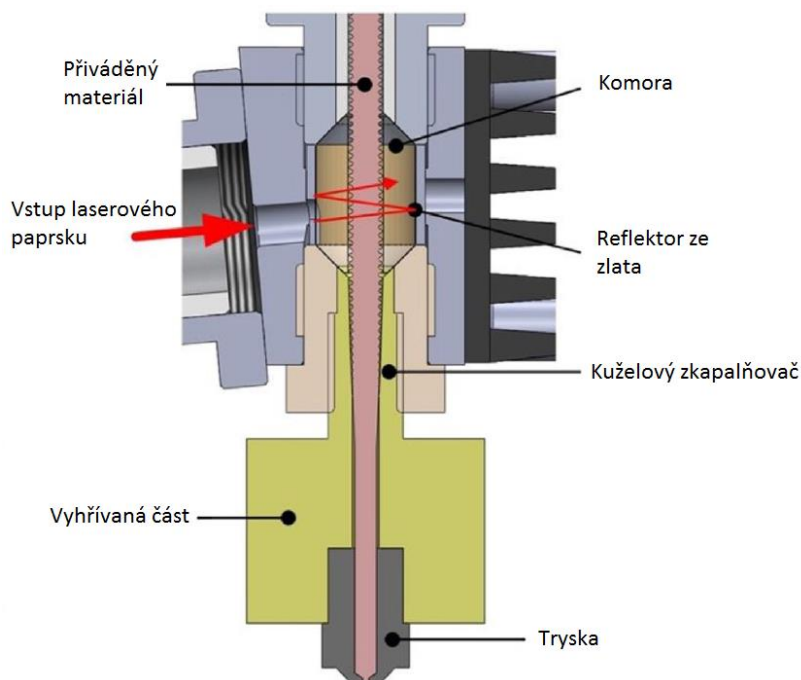
2.3.2 Vývoj softwaru

Pro úspěch aditivní výroby je potřeba vyváženosti hardwaru, materiálu a softwaru. Stávající software neumožňuje inženýrům optimalizovat proces aditivní výroby. Nové typy softwaru přicházející na trh, jako například Autodesk Netfabb, řeší proces výroby s optimalizací, simulacemi a přípravou tisku pro konkrétní stroj a materiály. Software vyžaduje nový formát pro překlad a sledování informací potřebných pro aditivní technologie. Netfabb pracuje s příponou 3MF namísto STL, která zobrazuje model pomocí bodů a trojúhelníků, stejně jako je tomu u STL. Avšak 3MF nabízí rozšíření pro gradienty materiálů, struktury mřížek a vlastnosti stroje. [25]

2.3.3 Rychlejší tisk a zvýšená produktivita

Jedním z hlavních problémů tisku je spojení kvality a rychlosti. Při vysoké rychlosti tisku se zvyšuje frekvence vibrací, což způsobuje snížení kvality. Vědci z Michiganské univerzity vytvořili algoritmus, který dokáže snížit úroveň vibrací při zvýšených rychlostech tiskárny. Algoritmus umožňuje tiskárnám produkovat kvalitní součásti při rychlostech dvakrát vyšších, než u standardních tiskáren. [21]

Současně inženýři z MIT vyvinuli stolní 3D tiskárnu, která dokáže tisknout až desetkrát rychleji, než komerční tiskárny. Polymerní materiál je přiváděn přes tiskací trysku šnekovým mechanismem, zatímco je taven pomocí laseru a umožňuje rychlejší průchod. Objekty, které by byly tisknuty hodiny, mohou být vytištěny v minutách. [21]



Obrázek č.6 - Schéma principu rychle tisknoucí tiskárny [31]

3 Přehled technologií 3D tisku polymerů

V dnešní době existuje spousta technologií 3D tisku. Jelikož se v mé bakalářské práci budu zabývat tiskem polymerů, tak si jednotlivé metody rozdělíme na čtyři oblasti: technologie vytvrzování tekutého materiálu, technologie spékání práškového materiálu, technologie extruze a technologie nanášení fóliového materiálu.

Technologie	Výrobní metoda
Technologie vytvrzování tekutého materiálu	SLA (Stereolitografie)
	DLP (Direct lightprocessing)
	Poly-jet
Technologie spékání práškového materiálu	SLS (Selective Laser Sintering)
Technologie extruze	FDM (FusedDeposition Modeling)
Technologie nanášení fóliového materiálu	LOM (LaminatedObjectManufacturing)

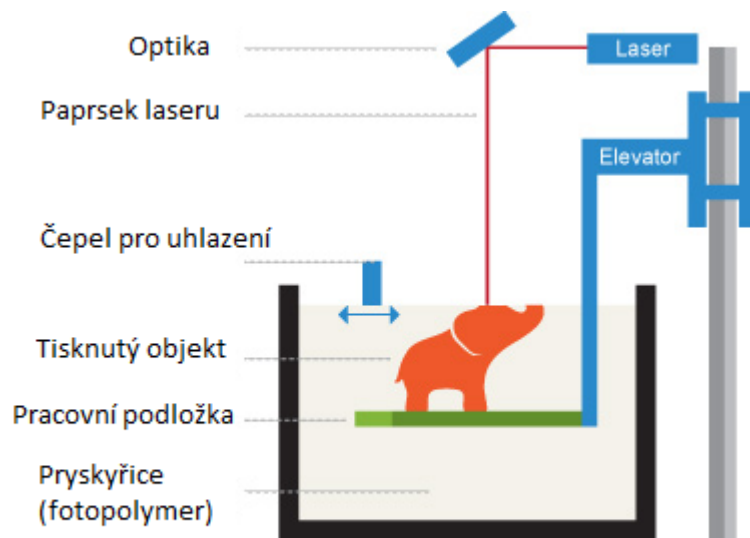
Tabulka č. 1 - Přehled technologií používaných při 3D tisku

3.1 Technologie vytvrzování tekutého materiálu

Do této kategorie patří materiály ve formě tekutého skupenství. Objekt vznikne vytvrzením tekutého materiálu. Patří sem výrobní metody zvané Stereolitografie a Multi-jet modeling.

3.1.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie (SLA) je aditivní technologie, při které tvoříme požadovaný objekt pomocí ultrafialového záření laserového paprsku, který působí na tekutou fotopolymerickou pryskyřici a ta je vytvrzována pomocí laseru ve vrstvách předem daných STL souborem viz **obr. č. 7.** [10]



Obrázek č. 7 - Princip stereolitografie [32]

Na začátku procesu tisku je pracovní podložka umístěna v nádrži s tekutým fotopolymerem a to ve vzdálenosti jedné vrstvy od povrchu kapaliny. Poté UV laser utvoří další vrstvu vytvrzením a zpevněním fotopolymerní pryskyřice. Směr paprsku laseru je tvořen pomocí sady zrcadel. Celý průřez modelu je skenovaný, tudíž vyrobená vrstva je pevná. Po dokončení vrstvy se plošina vrací na počáteční bod v bezpečné vzdálenosti od hladící čepelce, která má za úkol zarovnat tekutou vrstvu pryskyřice a připravit podklad pro další vrstvu. Celý proces se pak opakuje, dokud není objekt hotov. Po vtištění není část

plně vytvrzena a je potřeba dalších dokončovacích operací po UV záření, je-li potřeba vysokých mechanických a tepelných vlastností. [3] [11]

Tekutá pryskyřice tuhne pomocí fotopolymerace. Jde o proces, při kterém jsou monomerní uhlíkové řetězce tvořící tekutou pryskyřici aktivovány UV paprskem laseru. To má za následek zpevňování a vytváření nerozbitných vazeb mezi sebou. Fotopolymerace je nevratný proces a vytisknutý díl nelze přeměnit zpět do tekuté podoby. [3]



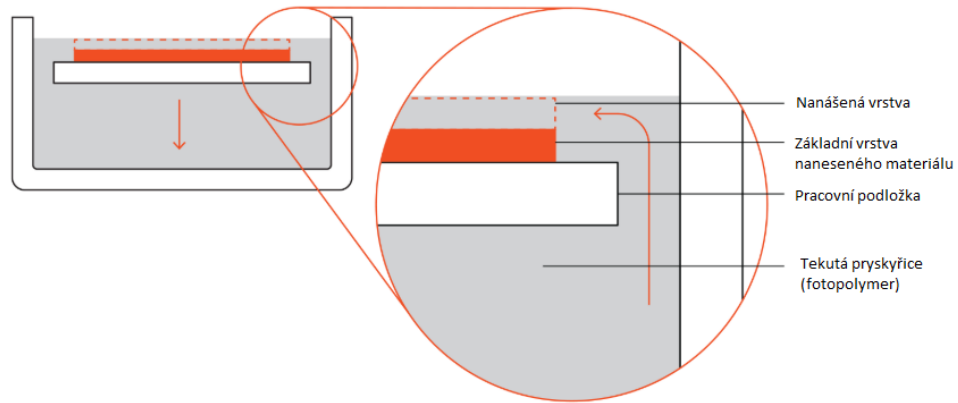
Obrázek č. 8 - SLA vytisknutý model [33]

3.1.1.1 Parametry tiskárny

V SLA systémech je většina parametrů fixována od výrobce a nemůžou být upravovány. Jedinými vstupy jsou výška nanášené vrstvy a orientace dílu. Výška vrstvy se pohybuje mezi 25 až 100 μm . Nižší tloušťka vrstvy zvyšuje přesnost tisku, ale zvyšuje nám čas, náklady a možnost selhání tisku. Pro většinu běžných tisků se používá vrstva 100 μm . [3]

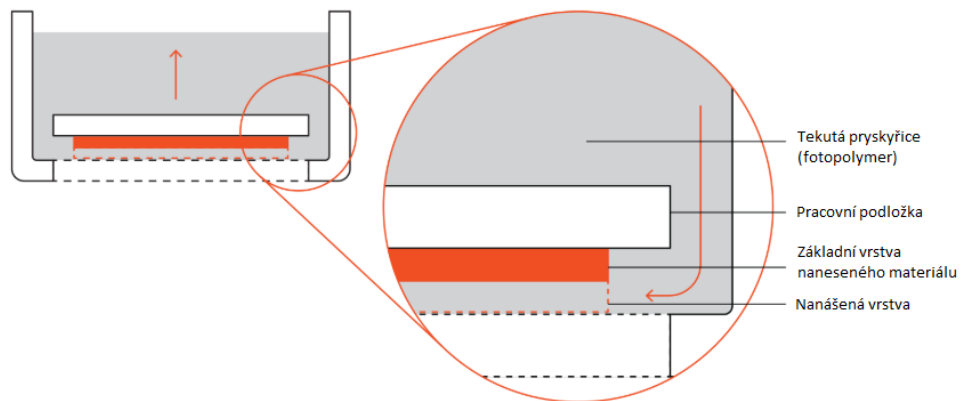
Ve stereolitografii se používají dvě nastavení SLA tiskáren a to: "top-down" orientace, což znamená směr ze shora dolů a "bottom-up" orientace, tedy ze zdola nahoru. Při metodě ze shora dolů je zdroj laserového záření umístěn nad nádrží a tisknutá část je čelem vzhůru.

Pracovní podložka začíná na vrcholu nádrže, a pohybuje se směrem dolů po každé vrstvě, viz **obr. č. 9**. [3]



Obrázek č. 9 - Metoda shora dolů [34]

V metodě "bottom-up" (ze zdola nahoru) je zdroj záření umístěn pod pracovní nádrží a tisknutý objekt je směřován vzhůru nohama, jak je vidět na **obrázku č. 10**. Nádrž má průsvitné dno se silikonovým povrchem, což umožňuje průchodu laserovému paprsku, ale zabraňuje natavené pryskyřici, aby se přilepila. Při každé natisknuté vrstvě se pryskyřice oddělí ode dna nádrže. [3]



Obrázek č. 10 - Metoda zdola nahoru [35]

Metodika shora dolů se používá v průmyslových systémech SLA, zatímco používání tisku zdola nahoru má využití spíše u stolních tiskáren. Porovnání obou metod SLA můžeme vidět v **tabulce č. 2**.

	SLA - ZDOLA NAHORU	SLA - SHORA DOLŮ
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> + Nižší cena + Široce dostupný 	<ul style="list-style-type: none"> + Velikost tisku + Rychlejší stavění
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - Ne příliš velká velikost tisku - Menší rozsah materiálů - Vyžaduje další post-zpracování, kvůli rozsáhlému využití podpory 	<ul style="list-style-type: none"> - Vyšší náklady - Výměna materiálu zahrnuje vyprazdňování celé nádrže
Nejznámější výrobce SLA tiskárny	<u>Formlabs</u>	<u>3D systémy</u>
Typická výška vrstvy	25 až 100 mikrometrů	25 až 150 mikrometrů
Rozměrová přesnost	± 0,5% (dolní mez: ± 0,010 - 0,250 mm)	± 0,15% (dolní mez ± 0,010 - 0,030 mm)

Tabulka č. 2 - Porovnání metod SLA [3]

3.1.1.2 Podpůrná konstrukce

Při použití SLA metody je při tisku potřeba podpor. Podpory jsou vytisknuty ze stejného materiálu, jako je samotný objekt a po tisku musí být ručně odstraněny. Při tisku ze shora dolů jsou podpory potřebné k tisku přesahů a mostů. Součást může být orientována v jakékoliv poloze, ale nejčastěji je tištěna ve vodorovné. Při tisku ze zdola nahoru musejí být přesahy a mosty stále podporovány. Síly, které působí na součást během oddělování pryskyřice ode dna, mohou způsobit oddělení podpor od součásti. Z důvodu zamezení oddělení podpor je součást tisknuta pod úhlem. [3]



Obrázek č. 11 - Podpory při metodě shora dolů (vlevo) a metodě zdola nahoru (vpravo) [36]

3.1.1.3 Vytvrzování

K dosažení nejlepších mechanických vlastností je potřeba vložit součást do UV komory. Výsledkem je, že součást dosáhne větší pevnosti a teplotní odolnosti. Vliv UV záření má ale dopad na fyzikální vlastnosti. Po vytvrzení jsou křehčí, mohou se deformovat, ale i změnit barvu. [3] [11]

3.1.1.4 Polymerní materiály

SLA materiály jsou ve formě kapalné pryskyřice. Na výběr jsou standardní materiály (standardní pryskyřice, jasná pryskyřice, trvanlivá pryskyřice), ale i speciální materiály, jako lisovatelná a dentální pryskyřice. SLA materiály (Reaktoplasty) jsou mnohem křehčí než materiály používané v jiných metodách tisku jako je FDM nebo SLS (termoplasty), a proto se SLA tisk nepoužívá pro výrobu součástí, které se nějak výrazně zatěžují. Všechny jejich vlastnosti budu popisovat v samostatné kapitole. [3]

3.1.1.5 Klady a záporny SLA metody

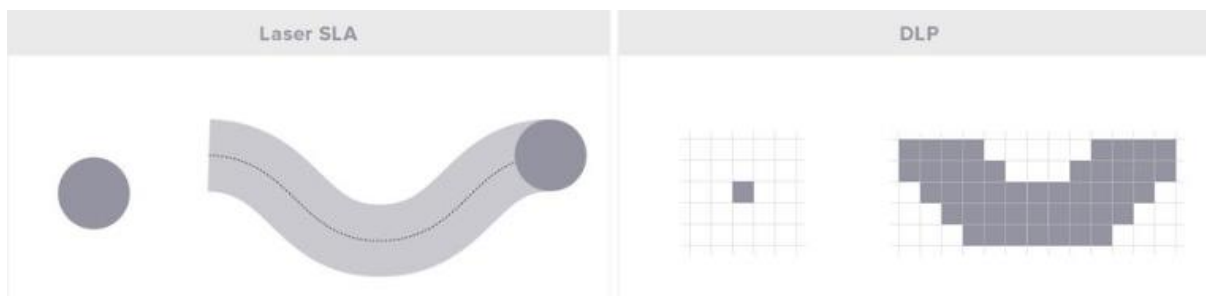
Všechny výhody a omezení metody SLA jsou uvedeny v **tabulce č. 3**

Klady
+ V SLA můžeme tisknout součásti s vysokou přesností
+ SLA výtisky mají velmi dobrou strukturu povrchu, tudíž jsou vhodné pro vizuální prototypy
+ K použití jsou speciální materiály, jako např. čiré nebo lisovatelné pryskyřice
Záporny
- Výtisky jsou křehké a nejsou vhodné pro funkční součásti
- Při vystavení výtisků na slunci se budou časem degradovat mechanické vlastnosti a vzhled
- Je potřeba tisku podpůrných konstrukcí

Tabulka č. 3 - Klady a záporny SLA metody [3]

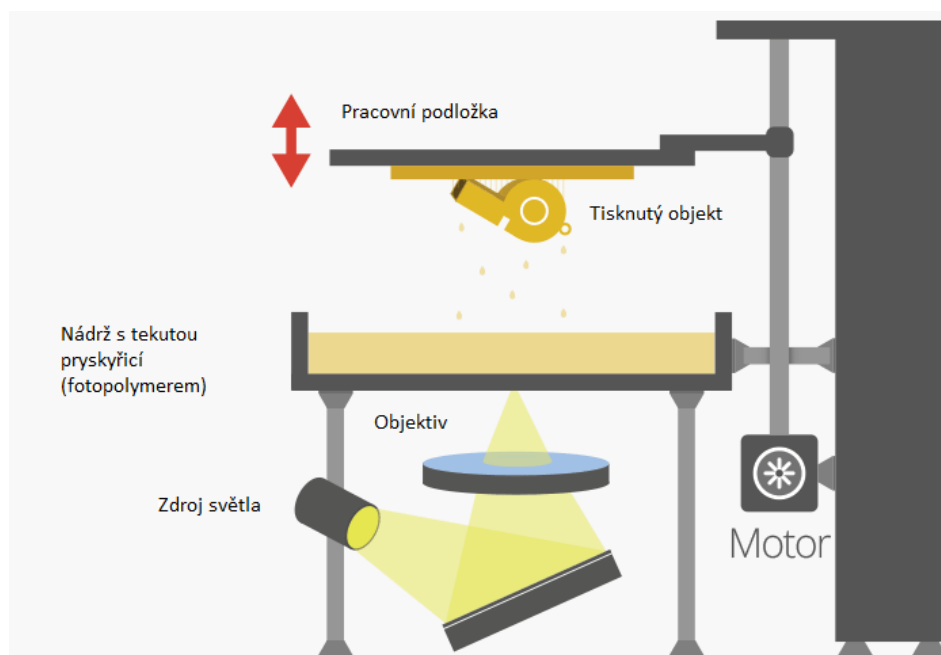
3.1.2 DLP (Direct LightProcessing)

Metoda DLP je téměř shodná se Stereolitografií, tudíž jde o proces, kde vytvrzujeme tekutý ftopolymer. Hlavní rozdíl je v použití světelného zdroje. DLP používá běžnější světelný zdroj jako je oblouková lampa s panelem s tekutými krystaly, který je aplikován na celý povrch nádrže s pryskyřicí (fotopolymerem) pomocí digitálního projektoru. Jelikož je projektor digitální obrazovka, tak se obraz každé vrstvy skládá ze čtvercových pixelů, což vede k vytvoření vrstvy malými obdélníky zvanými voxely, viz **obr. č. 12.** [11]



Obrázek č. 12 - Vykreslení oblouku za použití laseru v SLA metodě (vlevo) a tentýž oblouk vykreslen pomocí voxelů v DLP (vpravo) [37]

DLP dokáže u některých součástí dosáhnout rychlejších časů tisku, jelikož je každá vrstva vytvrzena najednou, a ne postupně, jako je tomu u SLA metody za použití laseru. Urychlení času při tisku platí v případě plných a velkých výtisků, které zaplní většinu platformy. U malých a detailních výtisků je možné vyměnit objektivy projektoru podle objemu konstrukce, a následně použít tenčí paprsek světla k rychlejšímu vytvoření jemnější vrstvy. [11] [12]



Obrázek č. 13 - Schéma DLP metody[38]

Vzhledem k tomu, že DLP vytváří objekt pomocí obdélníkových voxelů, mají voxely vliv na zakřivené hrany a tím nám tvoří nerovný povrch. Pro odstranění těchto nedokonalostí je potřeba dokončovacích operací, například broušení. Porovnání přesnosti struktury technologie SLA a DLP můžeme vidět na **obrázku č. 14**. [11]



Obrázek č. 14 - Tisk objektu metodou SLA (vlevo) a metodou DLP (vpravo) [39]

Rozhodnout se, zdali použít metodu 3D tisku DLP nebo SLA volíme podle našich požadavků na jakost povrchu. Dále se musíme zabývat velikostí a složitostí výrobku. Využití metody DLP a SLA můžeme vidět v **tabulce č. 4**. [11]

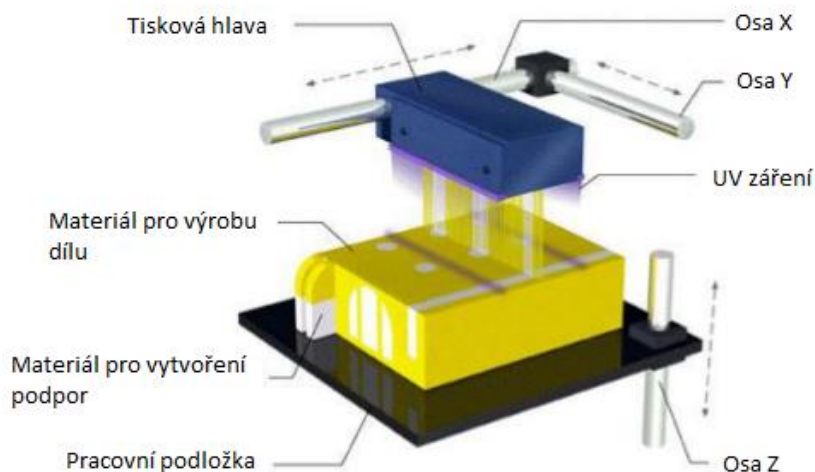
Využití DLP	Využití SLA
Jednorázové malé a velmi složité součásti	Tisk mnoha malých složitých součástí najednou
Rychlý tisk velkých součástí bez velkých detailů	Podrobné velké výtisky

Tabulka č. 4 - Srovnání použití metodiky DLP a SLA [11]

3.1.3 PolyJet

PolyJet technologie tiskne součásti z fotopolymerní pryskyřice. Je to jedna ze dvou technologií, která vtiskne barvu přímo do tištěné součásti a je jedinou technologií, která dokáže tisknout více materiálů současně a nabízí odstupňování od tuhé až po elastickou strukturu povrchu. PolyJet pracuje obdobně jako inkoustový tisk, ale namísto kapiček inkoustu používají 3D tiskárny PolyJet tiskové hlavy, pro ukládání kapiček fotopolymerní

pryskyřice na pracovní podložku ve vrstvách vysokých 16 μm . Ihned po nanesení vrstvy následuje vytvrzení pomocí UV světla. Zároveň je potřeba podpor při tisku přesahů a můstků. Bez těchto podpor může dojít k odchylce dílu od zamýšlené podoby či k deformaci dílu. PolyJet materiál pro vytvoření podpor je tištěn z takového materiálu, aby se po vytisknutí součásti omyl vodou nebo očistil pomocí stlačeného vzduchu. [13]



Obrázek č. 15 - Princip PolyJet technologie [40]

3.1.3.1 Parametry tiskárny

Všechny specifikace ohledně metody PolyJet jsou uvedeny v **tabulce č. 5**

Standardní přesnost:	0,1–0,3 mm (závisí na geometrii, orientaci dílu a velikosti dílu)
Tloušťka vrstvy:	0.016 mm
Minimální tloušťka stěny:	1 mm
Maximální rozměry dílu:	Výrobní plocha největšího stroje je 500 × 400 × 200 mm
Struktura povrchu:	Nepracované díly vyrobené technologií PolyJet mají hladký povrch, který lze podle potřeby dále vyhladit dodatečnou povrchovou úpravou

Tabulka č. 5 - Parametry PolyJet tiskárny [15]

3.1.3.2 Materiály

Hlavní výhodou technologie PolyJet je v široké škále použitelných materiálů. V oblasti polymerních materiálů můžeme tisknout z průhledných a neprůhledných fotopolymérů, polypropylenů, digitálních ABS a gumy. Všechny jejich vlastnosti budou popisovat v samostatné kapitole.

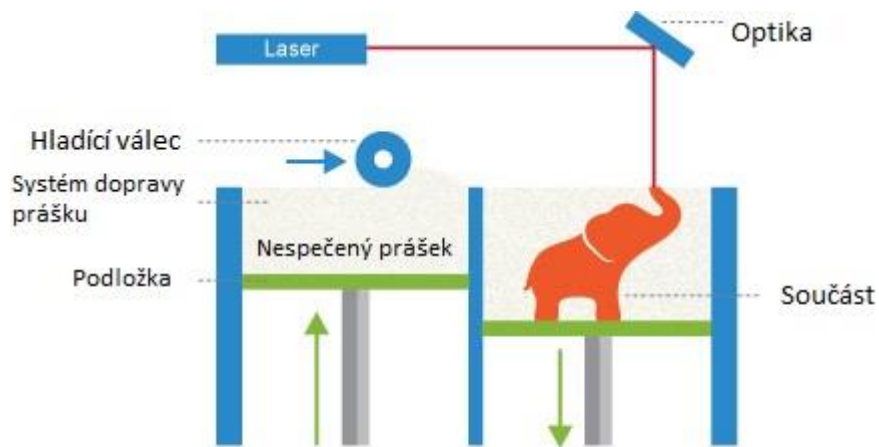
3.2 Technologie spékání práškového materiálu

Metoda je založena na principu vytvrzování materiálu ve formě práškového materiálu. Do tohoto odvětví spadá metoda SLS (Selective Laser Sintering).

3.2.1 SLS (Selective Laser Sintering)

SLS neboli Selektivní Laserové Slinování je aditivní technologie, která k tisku využívá namísto tekutého materiálu, jako je tomu u metody SLA, materiál v práškové formě. Laser nataví částice polymerního prášku, spojí je dohromady, a vytvoří tak součást vrstvu po vrstvě. Materiály používané v SLS jsou termoplasty v granulové podobě. [3] [14]

SLS se využívá pro prototypování funkčních polymerních součástí a využití najde také v malosériové výrobě, jelikož nabízí rozmanitost tvaru součástí, vysokou přesnost a tiskne součásti s dobrými mechanickými vlastnostmi. [14]



Obrázek č. 16 - Princip SLS metody [41]

Nádoba s nespečeným práškem a pracovní plocha jsou zahřívány těsně pod teplotou tavení polymeru a hladící válec rozprostírá tenkou vrstvu prášku na pracovní podložku. CO2 laser skenuje obrys vrstvy ve tvaru požadovaného materiálu a spéká dohromady částice polymerního prášku. Po dokončení vrstvy se pracovní podložka pohybuje směrem dolů a válec znovu pokrývá povrch nespečeným práškem. Celý proces se opakuje, dokud není vytvořen požadovaný objekt. Po tisku musíme nechat zásobník na prášek vychladnout a až poté můžeme vyndat vytištěný model. Součást se poté vyčistí od nespečeného prášku pomocí stlačeného vzduchu a je připravena k dalším dokončovacím operacím. Zbylý nespečený prášek je připraven k dalšímu použití (recyklovatelnost prášku je jen 50%). [3]



Obrázek č. 17 - Vytištěný SLS model [42]

3.2.1.1 Parametry tiskárny

Většinu parametrů tiskárny nastavuje výrobce stroje. Běžně používaná výška vrstvy činí 100 až 120 μm . Výhoda SLS metody je v tom, že nepotřebuje tisk podpor. Podporu totiž představuje nespečený prášek, a proto lze tuto metodu použít pro součásti se složitým geometrickým tvarem. SLS je nejrychlejší aditivní technologie ať již pro prototypy, nebo pro funkční součásti. Lasery spékající prášek mají mnohem větší rychlost skenování a jsou přesnější než metody vrstvení používané v jiných procesech. Při tisku lze na pracovní podložku uspořádat více součástí, aby se dosáhlo maximálního využití prostoru a zvýšila se produktivita výroby. Technické parametry metody SLS jsou uvedeny v **tabulce č. 6**. [11]

Standardní přesnost:	$\pm 0,3 \%$ (se spodním limitem $\pm 0,3 \text{ mm}$)
Tloušťka vrstvy:	0,12 mm
Minimální tloušťka stěny:	1 mm, ale ohebné spoje jsou možné s tloušťkou od 0,3 mm
Maximální rozměry dílu:	Rozměry nejsou omezeny, protože díly lze složit z více komponent.
Struktura povrchu:	Neopracované díly mají obvykle drsný povrch, ale je možné využít všechny druhy jemné povrchové úpravy. Laserově sintrované díly lze pískovat, barvit nebo impregnovat, natířit, překrýt nebo pokrýt povrchovou vrstvou

Tabulka č. 6 - Technické specifikace SLS metody [15]

Součásti vytištěné metodou SLS jsou náchylné ke smršťování a deformaci. Při ochlazování nově vytisknuté vrstvy se zmenšují rozměry a dochází tak k vnitřnímu pnutí. V SLS je běžné smrštění součásti o 3 až 3,5% a proto se musí upravit velikost součásti již při jejím modelování. [3]

3.2.1.2 Odstranění přebytečného prášku

Jelikož není třeba tisku podpor, je pro nás snazší výroba dutých dílů. Duté profily snižují hmotnost a výrobní náklady na součást, jelikož se používá méně materiálu. K odstranění nespečeného, a tedy přebytečného, prášku ve vnitřních částech, používáme únikové otvory. Do tisknutého objektu se doporučuje přidat dva únikové otvory o průměru 5 mm. Při požadavku na vysokou tuhost součásti musí být díl tisknut v plné tloušťce. Alternativa spočívá ve vytvoření dutého objektu bez únikových otvorů. To způsobí udržení

nespečeného prášku v dílu, čímž se zvětší jeho hmotnost a odolnost proti mechanickému zatížení, bez delších výrobních časů, jako je tomu u tisku plného dílu. Do vnitřního prostoru lze přidat mřížkovou strukturu, která také zvyšuje tuhost dílu. [3] [11]

3.2.1.3 Polymerní materiály

Nejpoužívanějším materiálem v SLS je polyamid 12 (PA 12), známý především jako nylon 12. Dalšími používanými materiály jsou termoplasty PA 11 a PEEK, ale jejich využití není tak rozsáhlé. Prášek může být naplněn různými přísadami, jako jsou uhlíková a skleněná vlákna či hliník, pro zlepšení mechanických a tepelných vlastností vyráběné součásti. Materiály s přísadami jsou obvykle křehké a mohou mít anizotropní chování. Bližší specifikaci používaných materiálů popíšu v samostatné kapitole. [15]

3.2.1.4 Klady a zápory SLS metody

Všechny výhody a omezení metody SLS jsou uvedeny v **tabulce č. 7**.

Klady
+ Vyrobené součásti mají dobré izotropní a mechanické vlastnosti
+ Při tisku není potřeba podpor, tudíž jdou tisknout součásti s obtížným geometrickým tvarem
Zápory
- SLS je dostupné jen v průmyslové výrobě
- Výtisky mají zrnitý povrch a vnitřní poréznost, tudíž je třeba dokončovacích operací
- Velké plochy a malé otvory nelze tisknout přesně, jelikož jsou náchylné k deformaci

Tabulka č. 7 - Klady a zápory SLS metody [3]

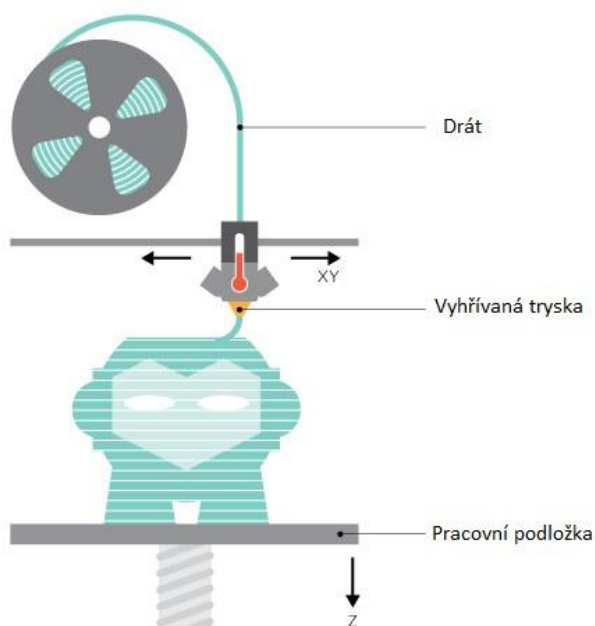
3.3 Technologie extruze

Do této kategorie patří materiály, které jsou ve formě drátu. Metoda využívá principu extruze, což znamená protlačování nataveného materiálu tisknoucí hlavou a tvoření tak požadovaného objektu pokládáním vrstev na sebe. Mezi používané metody tisku patří FDM (Fused Deposition Modeling).

3.3.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

FDM nebo FFF (Fused Filament Fabrication) je aditivní technologie, která je vhodná pro tvorbu prototypů, funkčních součástí, výrobních a lisovacích nástrojů a částí pro konečné použití. Objekt je tvořen selektivně nanesením roztaveného materiálu vrstvu po vrstvě. Používaný materiál je termoplast a je používán ve formě vlákna, neboli drátu. [7]

FDM je nepoužívanější 3D technologie tisku, tzn. představuje největší nainstalovanou základnu 3D tiskáren na světě, a je povětšinou první technologií, se kterou je uživatel seznámen při objevení 3D tisku. [7]



Obrázek č. 18 - Princip FDM metody[43]

Cívka termoplastického vlákna je nejprve vložena do tiskárny. Jakmile tryska dosáhne požadované teploty, přivedeme vlákno do vytlačovací hlavy a poté do trysky, kde se roztaví. Hlava je připojena k tří osému systému, který umožňuje pohyb do směru X, Y, Z. Roztavený materiál je vytlačován jako tenký pramen a je uložen vrstvou po vrstvě na místech předem určených, kde se ochlazuje a tuhne. Chlazení materiálu může být

urychleno použitím chladících ventilátorů, připojených na vytlačovací hlavici. Když je vrstva dokončena, pracovní podložka se posune dolů a probíhá tisk nové vrstvy. Proces se opakuje, dokud není vytvořen požadovaný objekt. [3]



Obrázek č. 19 - Objekt vytisknutý pomocí FDM metody [44]

3.3.1.1 Parametry tiskárny

Metoda FDM umožňuje nastavení mnoho parametrů procesu, jako jsou teplota trysky a pracovní podložky, rychlost podávání drátu, výška vrstvy a rychlost ventilátoru pro chlazení. Běžně používaná výška vrstvy se pohybuje v rozmezí 50 až 400 μm . Menší použitá výška vrstvy nám zajistí hladší povrch součásti a přesněji zachycuje zakřivení geometrie, zatímco větší výška zajistí kratší pracovní časy a tím ušetření výrobních nákladů na úkor kvality výrobku. Technické specifikace jsou shrnuty v **tabulce č. 8**. [3] [15]

Standardní přesnost:	$\pm 0,15\%$ (se spodním limitem $\pm 0,2\text{ mm}$)
Minimální tloušťka stěny:	1 mm
Tloušťka vrstvy:	0,18–0,25 mm (závisí na zvoleném materiálu)
Maximální rozměry dílu:	Rozměry nejsou omezeny, protože díly lze složit z více komponent. Maximální rozměry výrobního prostoru jsou 914 × 610 × 914 mm
Struktura povrchu:	Neopracované díly mají obvykle hrubý povrch, ale je možné využít všechny druhy jemné povrchové úpravy. Díly vyrobené technologií FDM lze pískovat, vyhladit, obarvit nebo impregnovat, natřít nebo pokrýt povrchovou vrstvou

Tabulka č. 8 - Technické specifikace FDM metody [15]

3.3.1.2 Warping (zvlnění materiálu)

Během tuhnutí materiálu se jeho rozměry zmenšují a to způsobuje vnitřní napětí, které táhnou podkladovou vrstvu směrem nahoru a způsobují tak deformaci objektu ve formě zvlnění. Deformaci se dá předcházet bližším sledováním teploty FDM systému (např. pracovní podložky a vytlačovací hlavice) a zvýšením přilnavosti mezi tisknutou součástí a pracovní podložkou. [16]

3.3.1.3 Přilnavost vrstev

Dobrá přilnavost vrstev je při metodice FDM důležitá, jelikož vytlačujeme tryskou natavený termoplast a ten se tlačí na předešlou vytisknutou vrstvu. Vysoká teplota a tlak opět taví předešlou vrstvu a umožňuje přilepení nové vrstvy s předchozí. Z toho vyplývá, že součásti vytištěné metodou FDM jsou anizotropní a tudíž snesou menší zatížení ve směru Z než ve směrech X a Y. [3]

3.3.1.4 Tisk podpor

Při tisku můstků nebo převisů je nutná podpurná konstrukce, jelikož nemůžeme nanést roztavený materiál do vzduchu. Povrchy tištěné na podpory budou mít menší kvalitu povrchu než zbylá část dílu, a proto se doporučuje navrzení a uzpůsobení součásti tak, aby se minimalizovala potřeba podpor. Tisk podpor probíhá obvykle ze stejného materiálu jako je samotná součást. [3]

3.3.1.5 Polymerní materiály

Předností FDM metody je široká škála dostupných materiálů a to od komoditních termoplastů (ABS, PLA) až po technické materiály (PA, TPU, PETG) a vysoce výkonné termoplasty (PEEK, PEI). Volbou materiálu určujeme mechanické vlastnosti a přesnost povrchu vytištěné součásti. Bližší specifikaci materiálů budu popisovat v samostatné kapitole. [3] [15]

3.3.1.6 Klady a zápory FDM metody

Výhody a nevýhody FDM metody jsou popsány v následující **tabulce č. 9**.

Klady
+ Nákladově nejvýhodnější způsob tisku dílů z termoplastu
+ Krátká doba dodání dílu díky vysoké dostupnosti této technologie
+ Široká škála používaných materiálů
Zápory
- Nejnižší rozměrová přesnost a kvalita povrchu při porovnání s ostatními technologiemi (SLA,SLS)
- Je potřeba dodatečného opracování vytisknuté součásti
- Jelikož je třeba přilnavosti vrstev, hotová součást je anizotropní

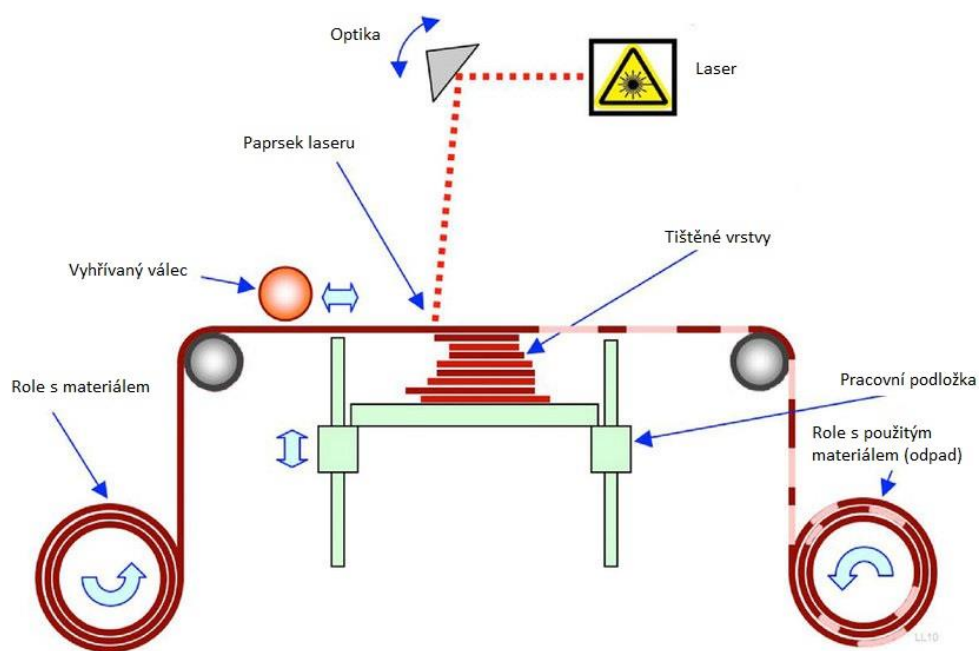
Tabulka č. 9 - Klady a zápory FDM metody [3]

3.4 Technologie nanášení fóliového materiálu

Metoda využívá tuhého fóliového materiálu, který vrstvíme na sebe, a následně vyřezeme pomocí laseru do požadovaného tvaru. Do této kategorie patří metoda LOM (Laminated Object Manufacturing).

3.4.1 LOM (Laminated Object Manufacturing)

LOM metoda je rychlý a levný způsob, jak vytisknout objekt z několika druhů materiálu. LOM metoda používá materiál ve formě fólií a ty jsou vrstveny na sebe a rozřezávány laserem do tvaru, který požadujeme. Fóliový materiál je ve formě role a ten je pomocí podávacích válečků veden přes pracovní podložku. Obvykle se materiál potahuje lepidlem. Pro vytvoření objektu je vyhříván válec veden přes pracovní podložku, taví lepidlo a přitlačuje fólii na podložku. Laser poté rozřeže fólii do požadovaného tvaru. Po vytvoření jedné vrstvy objektu se pracovní podložka sníží a celý proces se opakuje znovu, dokud nevytvoří požadovanou součást. [7] [17]



Obrázek č. 20 - Schéma LOM metody [45]

LOM metoda není vhodná pro tvorbu objektů se složitými geometrickými tvary a také není možný tisk dutých součástí. Jelikož tato metoda nevytváří dostatečně přesné součásti, tak se nedá využít pro tvorbu funkčních součástí. Proto se LOM používá pro tisk měřítkových modelů a prototypových součástí, které mohou být testovány. [17]



Obrázek č. 21 - Objekt vytvořen pomocí LOM metody [46]

3.4.1.1 Materiály

Lepit lze téměř jakýkoliv materiál. Nejběžněji používán je papír, který jako hotový výrobek vykazuje vlastnosti dřeva a podle toho může být broušen a lakován. Dále se používá plastová fólie, která se používá obdobně jako papír. [7]

3.5 Porovnání nejpoužívanějších metod 3D tisku (SLA, SLS, FDM)

Každá technologie má své silné a slabé stránky, a je vhodná pro různé druhy použití. V následující tabulce jsou shrnuty klíčové charakteristiky metod.

	FDM	SLA	SLS
Klady	-Rychlost tisku -Cena tiskárny a materiálu pro tisk	-Vysoká přesnost - Hladký povrch	-Funkční součásti mají vysokou pevnost - Tisk složitých tvarů -Není třeba tisku podpor
Zápory	-Nízká přesnost tisku - Omezená geometrie tisku	- Menší velikost tisku - Citlivost na dlouhou expozici UV záření	-Drsnější povrch -Omezená volba materiálu
Použití	-Nízkonákladové prototypy	-Funkční prototypy -Zubní aplikace	-Funkční prototypy -Malosériová výroba -Tisk na zakázku
Materiály	-Standardní termoplasty, jako jsou ABS, PLA a jejich různé směsi.	-Odrůdy pryskyřice (termosetové plastické hmoty). Standardní, inženýrská (flexibilní, odolná proti teplu)	-Strojírenské termoplasty. Nylon 11, nylon 12 a jejich kompozity.
Školení obsluhy	-Základní	-Základní	-Střední
Doplňkové vybavení	-Systém pro odvádění podpor (V případě rozpustných podpor). -Dokončovací nástroje	-Vytvrzovací stanice -Dokončovací nástroje	- Stanice pro čištění dílů a obnovu materiálu -Dokončovací nástroje

Tabulka č. 10 - Srovnání nejpoužívanějších technologií [11]

4 Přehled polymerních materiálů

4.1 Materiály pro metodu FDM

Materiál pro FDM metodu je dodáván ve formě drátu, který je navinutý na cívku. Nejběžněji používané materiály jsou ABS, PLA a PVA. Jelikož v praktické části budu tisknout právě metodou FDM, budu věnovat materiálům této metody větší pozornost.

4.1.1 ABS (Akrylonil Butadien Styren)

ABS je neprůhledný termoplastický a amorfní polymer. Je odolný, silný, lehce ohebný a odolný vůči teple. Vytisknutý ABS má až 80% pevnosti vstřikovaného ABS, tudíž je vhodný pro funkční aplikace. Tisková teplota se pohybuje okolo 210 - 250°C a pevnost v tahu je okolo 33MPa. ABS je levnější než PLA a PVA, a proto je velmi často používán. Části lze k sobě snadno přilepit ABS lepidlem, a jsou snadno rozpustné v acetonu. Nevýhodou ABS je, že není biologicky rozložitelný, ale může být recyklován. Dalším problémem je tvorba výparů při tisku, což může být dráždivé pro některé osoby. ABS se používá téměř v každém odvětví průmyslu. Například automobilové komponenty, elektronické součásti, ale nejznámější prvek vyráběn z ABS materiálu je stavebnice LEGO. Běžná cena materiálu se pohybuje okolo 20\$/kg, ale při nároku na speciální barevné provedení se cena může vyšplhat až na 170\$/kg. [18] [19]



Obrázek č. 22 - Vytisknutý model z ABS materiálu [47]

4.1.2 PLA (Polylactic Acid)

PLA představuje biologicky rozložitelný termoplast, který je vyráběn z přírodních zdrojů, jako je kukuřičný škrob, cukrová třtina, kořen tapioky či bramborový škrob. Tím se PLA materiál stává nejvíce šetrným k životnímu prostředí v oblasti 3D tisku ve srovnání s ABS nebo PVA materiály. PLA je tvrdý, ale při ochlazení začíná křehnout. Tisková teplota je nižší než u ABS a činí 160 - 220°C, ale pevnost v tahu je vyšší (50Mpa). Materiál nevydává při zahřátí toxické výpary, jako tomu bylo u ABS, ale je těžší lepit jednotlivé části k sobě. Hlavní nevýhoda PLA je, že nesnese vysoké teploty. Při teplotách okolo 50°C ztrácí tvrdost, a deformuje se. Obecně se PLA používá na výrobu obalů potravin, igelitových tašek, jednorázového nádobí apod. Cena se pohybuje obdobně jako u ABS a to od 20\$/kg až po 160\$/kg. [18] [19]

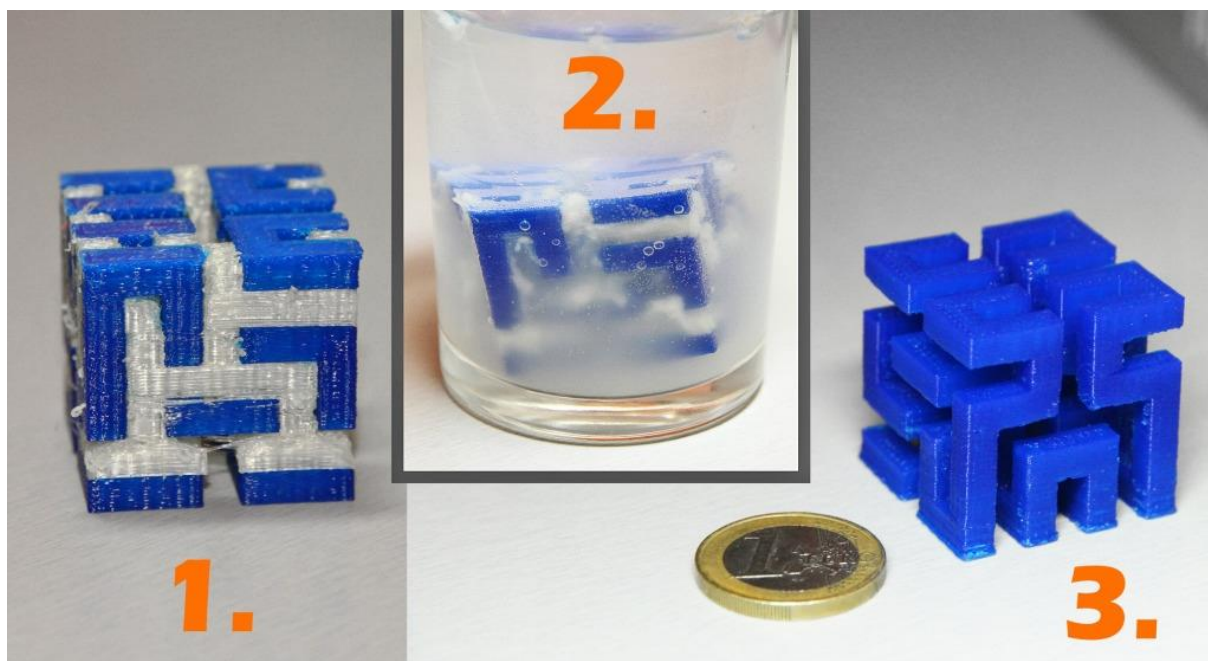


Obrázek č. 23 - Vytisknutý model z PLA materiálu [48]

4.1.3 PVA (Polyvinylalkohol)

PVA je ve vodě rozpustitelný plast. Ve 3D tisku se používá pro tisk podpurných konstrukcí u součástí s přesahy či mosty. Po dokončení tisku se vytisknutý objekt ponoří do vody, a PVA materiál se plně rozpustí. Vytlačovací teplota se pohybuje okolo 190°C.

Nevýhoda materiálu je, že výrazně přitahuje vlhkost, a proto je nutné materiál skladovat v uzavřené nádobě spolu s vysoušedlem. Cena je poměrně vysoká, a nejzákladnější provedení se prodává za 40\$/Kg. [18]



Obrázek č. 24 - Postup použití PVA materiálu v 3D tisku [49]

4.1.4 Srovnání mechanických vlastností dalších používaných materiálů

Pro porovnání se základními materiály obsahuje **tabulka č. 11** přehled dalších materiálů a jejich kompozitů, jako je například polykarbonát-ABS a další. V tabulce jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti jako je pevnost v tahu, pevnost v ohybu, tažnost a teplota tvarové stálosti neboli HDT. HDT je veličina udávající teplotní odolnost plastů a používá se převážně u termoplastických materiálů, pryží a laminátů k rozlišení jejich průhybu při teplotním zatížení. Zkouška probíhá zatěžováním vzorku tříbodovým ohybem v příčném směru. Zatěžovací síla se pohybuje od 0,5 do 1,82 MPa při zvyšující se teplotě 2°C/min dokud se vzorek neodchýlí o 0,25mm. [10]

	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tažnost [%]	HDT(Teplota tvarové stálosti) [°C]
Polykarbonát	40	89	2,2	138
Ultem 1010	64	144	1,5	216
FDM Nylon 12	32	87	2,4	97
Polykarbonát-ABS	41	68	6	110
ASA	29	60	2	98
PPSU	55	110	3	189
ABS-M30	31	60	7	98
ABS-ESD7	36	61	3	96
PC-ISO	57	90	4	133
FDM Nylon 6	49	97	2,3	93

Tabulka č. 11 - Srovnání dalších používaných materiálů [22]

4.2 Materiály pro metodu SLA

Při této metodě je materiál ve formě tekutého polymeru neboli pryskyřice. Nejběžněji používanými pryskyřicemi jsou standardní, jasná a tuhá.

4.2.1 Standardní pryskyřice

Standardní pryskyřice se vyznačuje vysokou tuhostí a tiskem s vysokým rozlišením. Barva pryskyřice ovlivňuje její vlastnost. Např. šedá je vhodná pro díly s detailní geometrií a bílá pro součásti s požadavkem na hladký povrch. Výhoda standardní pryskyřice je její cena, dobrá struktura povrchu a ekonomičnost materiálu. Mezi nevýhody patří křehkost, a tudíž vytisknutý objekt není vhodný pro cyklické rázy. Tento materiál se hodí pro rapid prototyping a umělecké modely. Mez pevnosti v tahu se pohybuje mezi 40 - 60 MPa podle zbarvení pryskyřice. Cena je poměrně dražší než u předchozí metody FDM a aktuálně se pohybuje mezi 150-250\$/l. [11]

4.2.2 Jasná pryskyřice

Jasná pryskyřice má podobné mechanické vlastnosti jako pryskyřice standardní, ale pomocí dokončovacích operací, jako je broušení či leštění, dosáhneme průhlednosti. Jasná pryskyřice se hodí pro výrobu LED diod, oken anebo za pomoci 3D tisku pro výrobu opticky čistého objektivu do fotoaparátu. Výhoda materiálu je hladkost struktury povrchu a průhlednost, která se ale může časem zhoršit při vystavení součásti UV záření. Cena pryskyřice začíná na 160\$/l. [11]

4.2.3 Tvrdá pryskyřice

Tvrdá pryskyřice byla vyvinuta pro aplikace vyžadující materiály, které odolají vysokému namáhání, a proto se pryskyřice používá na výrobu cyklicky namáhaných součástí, jako jsou např. ozubená kola, kryty s kloubovými spoji apod. Části vytisknuté tvrdou pryskyřicí mají mez pevnosti v tahu 55,7 MPa. Materiál není vhodný pro tenkostěnné součásti a je relativně křehký. Cena Tvrdé pryskyřice se pohybuje okolo 170\$/l. [3] [11]

4.3 Materiály pro metodu SLS

Metoda využívá materiálu v podobě prášku nebo granulí. Nejčastěji používaný materiál je Polyamid 12 (PA 12) neboli nylon. Dále můžeme tento materiál plnit například sklem či uhlíkovými vlákny.

4.3.1 Polyamid 12

Nylon je jedním z nejuniverzálnějších termoplastických materiálů v oblasti 3D tisku. Díky mechanické síle, flexibilitě a odolnosti proti teplu je vhodný pro tvorbu prototypů, ale i funkčních součástí. Další silná stránka prášku je tisk bez nutnosti podpor, což umožňuje tvorbu součástí složitého tvaru a až 50% nespečeného prášku se dá znovu použít při dalším tisku. Mez pevnosti v tahu je 50MPa a cena na trhu je mezi 10 - 50\$/Kg. [11]

4.3.2 Skleněný nylon

Skleněný nylon je vyráběn smícháním polyamidového prášku a skleněných kuliček. Materiál je vhodný pro technické účely, při kterých je požadavek na tuhost, teplotní zatížení apod. Proto se v průmyslu využívá pro výrobu dílů, které mohou být uloženy v blízkosti motorů. Nylon snese teploty až do 110°C a jeho mez pevnosti v tahu činí 51 MPa. Cena prášku začíná na 25\$/Kg. [7]

4.3.3 Nylon s uhlíkovými vlákny

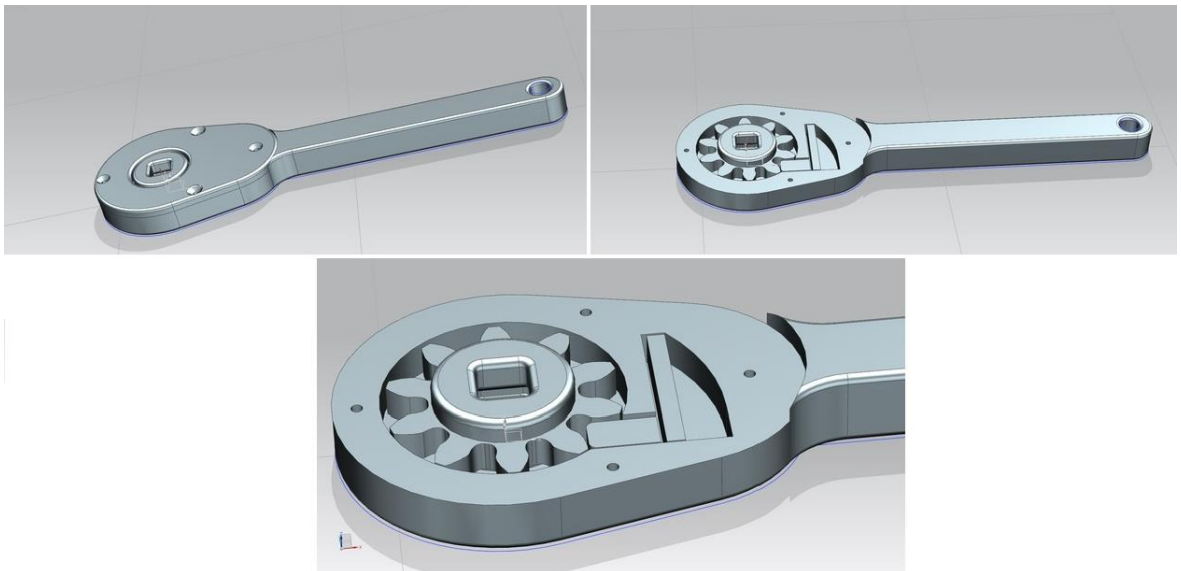
Nylon naplněný uhlíkem obsahuje uhlíkové vlákno nebo grafitové částice, které poskytují součásti vysokou tuhost a zlepšené tepelné vlastnosti, naproti standardnímu nylonu. Výhoda materiálu je jeho váha v poměru s pevností, jelikož mez pevnosti v tahu je 76 MPa, ale také jeho odolnost proti teplotám (až 170°C). Materiál nachází uplatnění při výrobě ventilů, krytů, potrubí apod. Díky jeho vynikajícím vlastnostem je vyšší i cena, která se pohybuje od 50 do 110\$/Kg. [20]

5 Tisk a měření funkční součásti (Ráčny)

Pro tisk ráčny jsem se rozhodl na základě toho, že aditivní technologie dokážou vyrobit tu samou součást, jakou bychom museli vyrábět jinou výrobní technologií. Ráčna nám usnadňuje utahování či povolování šroubů, jelikož má v sobě zuby, které dovolují pohyb páky pouze jedním směrem. Při pohybu do druhého směru se zuby zaseknou o západku, a nám umožňuje utahování či povolování, podle námi požadované činnosti. Tuto součást jsem převzal z internetové stránky <https://www.thingiverse.com/thing:2822161>. Tímto bych chtěl autorovi Stanislavu Matějovi poděkovat za její poskytnutí.

5.1 3D Model součásti

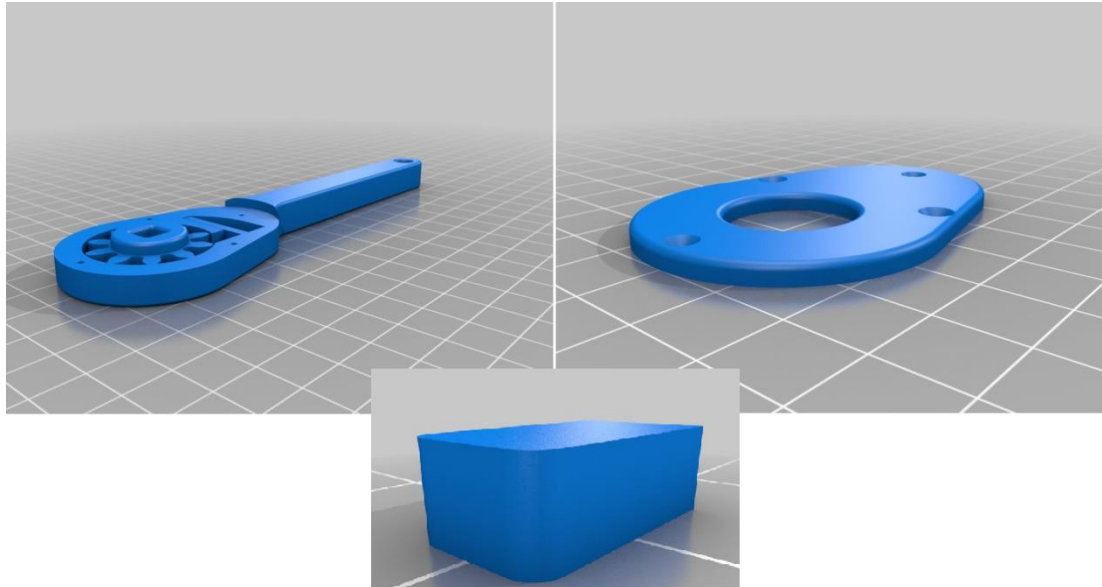
Pro vytvoření jakékoliv součásti pomocí aditivních technologií musíme začít 3D modelem. Při modelaci určíme tvar a parametry dílů. Dále zde pomocí různých simulací můžeme zjistit, zdali hotový objekt snese požadované namáhání.



Obrázek č. 25 - Tělo a detail ráčny v modelovacím softwaru SolidWorks [50]

5.2 Konverze STL

Před odesláním součásti do tiskárny musíme model převést na STL formát. STL soubor vytvoříme přímo pomocí CAD programu, v našem případě pomocí SolidWorks.



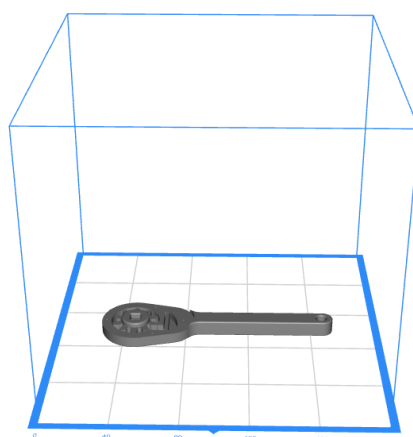
Obrázek č. 26 - Všechny soubory konvertované do formátu STL [51]

5.3 Import STL do 3D tiskárny

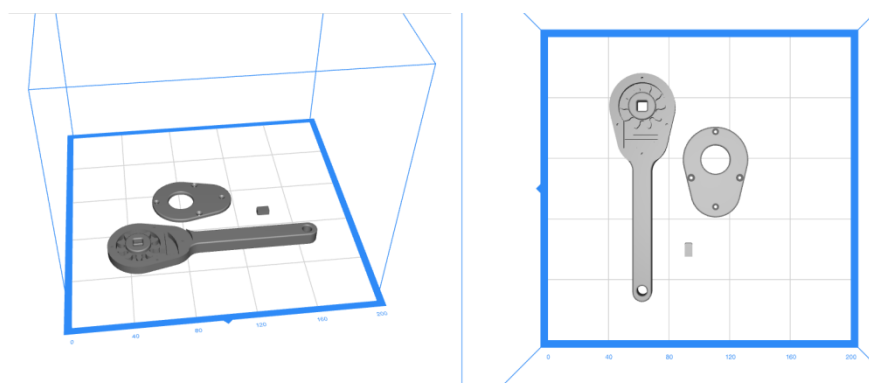
Pro import součásti do tiskárny byl použit program Zortax: Z-SUITE. Pomocí programu lze součásti uspořádat do tiskárny tak, aby výroba bylo časově nejúspornější. Dále lze upravovat hustotu výplně plných materiálů, volbu podpor apod.

5.3.1 Z-SUITE: Model

Pro ušetření času při tisku lze uspořádat do pracovního prostoru 3D tiskárny několik dílů naráz. Jelikož ráčna není velikostně obsáhlá, tak se díly dají uspořádat téměř jakýmkoliv směrem.



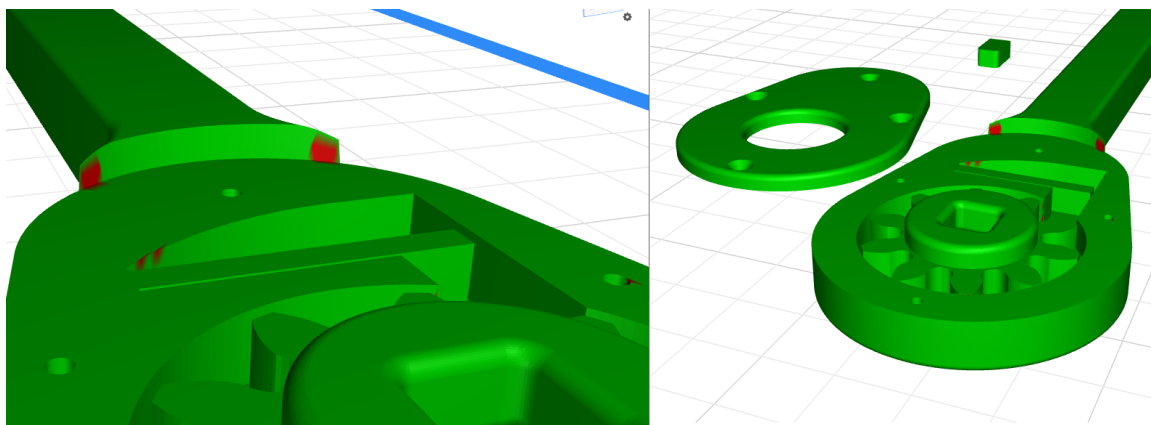
Obrázek č. 27 - Postupné vkládání všech dílů do programu Z-SUITE



Obrázek č. 28 - Uspořádání dílů do 3D tiskárny

5.3.2 Z-SUITE: Analýza

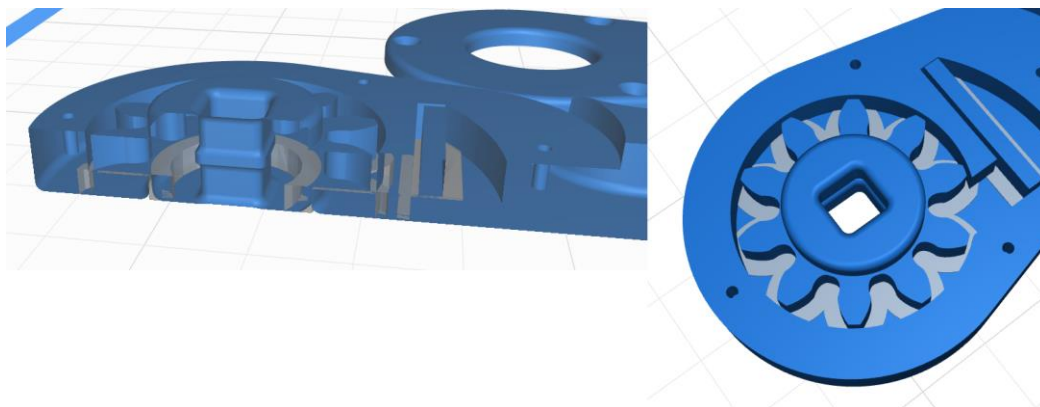
Po uspořádání následuje další krok, analýza. Analýza nám ukáže, zdali jsou součásti schopné tisku. Zelenou barvou jsou označeny plochy, které mají správnou tloušťku, a tudíž jsou vhodné k tisku. Naopak červená barva ukazuje příliš tenkou část dílu. Ráčna splňuje požadavky pro tisk a je z 99,92% schopna tisku.



Obrázek č. 29 - Zobrazení analýzy všech dílů

5.3.3 Z-SUITE: Podpůrná konstrukce

Abychom mohli tisknout části, které v sobě mají dutinu anebo se nemohou opřít o předem vytisknutou vrstvu, je potřeba tisku podpor. Program má možnost automaticky vygenerovat podpory, tudíž stačí jen zadat úhel podpor a zkontrolovat, zda byly vytvořeny právě tam, kde byly třeba. Na **obrázku č. 30** jsou podpůrné konstrukce zobrazeny šedou barvou, materiál ráčny má barvu modrou. Pro náš díl jsme volili úhel tisku podpor 35°.

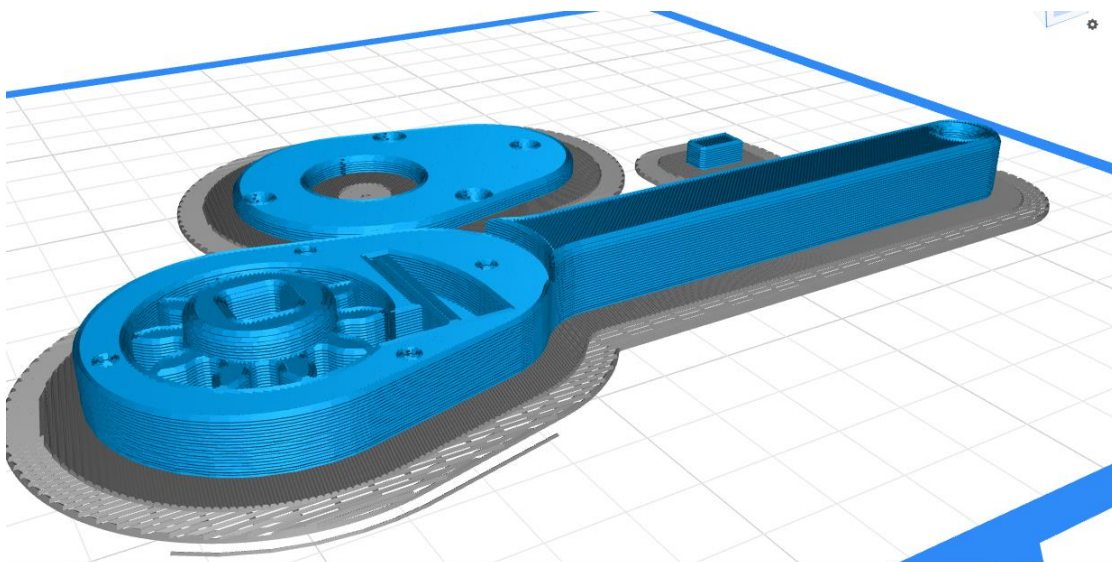


Obrázek č. 30 - Zobrazení podpůrných konstrukcí

5.3.4 Nastavení tisku

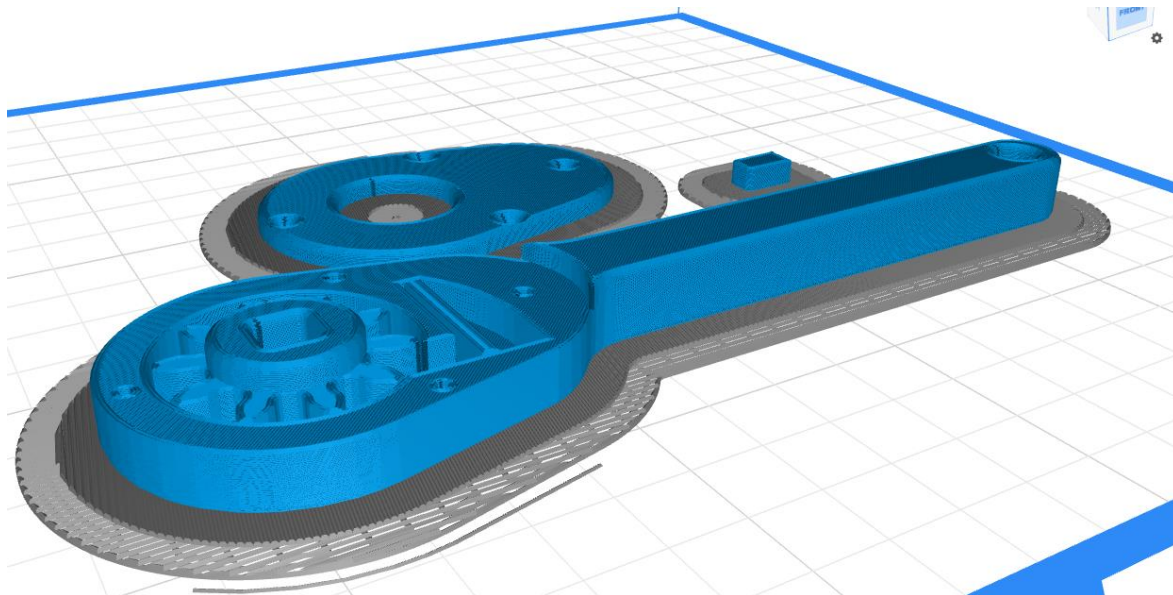
Před spuštěním tisku musíme nastavit jeho parametry. To nám umožní volbu tloušťky tištěné vrstvy, kvalitu tisku, typ výplně vnitřku součásti a mnoho dalších. Pro porovnání výsledné kvality tisku jsme se rozhodli pro tisk součásti ve třech kvalitativních provedeních. Při tisku byl použit materiál ABS.

Při tisku v nejjednodušší kvalitě byla nastavena tloušťka vrstvy na 0,39 mm. Program vypočítal dobu tisku na 1h 45min a váha výtisku činí 28g. Použito bylo 11.88m materiálu



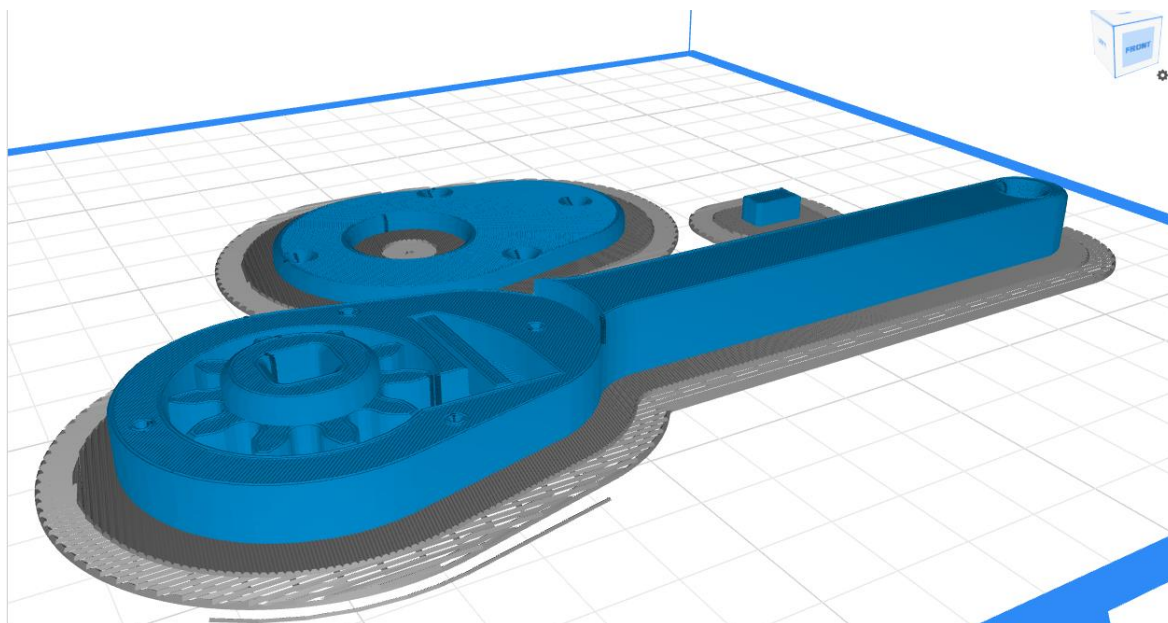
Obrázek č.31 - Tisk součásti v nejjednodušší podobě

Při nastavení tisku na střední kvalitu jsme zvolili tloušťku vrstvy na 0,19 mm a kvalita tisku byla nastavena na normální. Čas tisku se prodloužil na 2h a 36min při spotřebě materiálu 10,95m. Váha výtisku klesla na 26g.



Obrázek č. 32 - Tisk součásti ve střední kvalitě

Pro třetí tisk byla nastavena vrstva o tloušťce 0,09 mm a nejvyšší kvalita povrchu. To se nám projevuje na délce tisku, která činí 4h 31min. Spotřeba materiálu je spočtena na 10.45m a váha součásti na 25g.



Obrázek č. 33 - Tisk v nejvyšší dosažené kvalitě

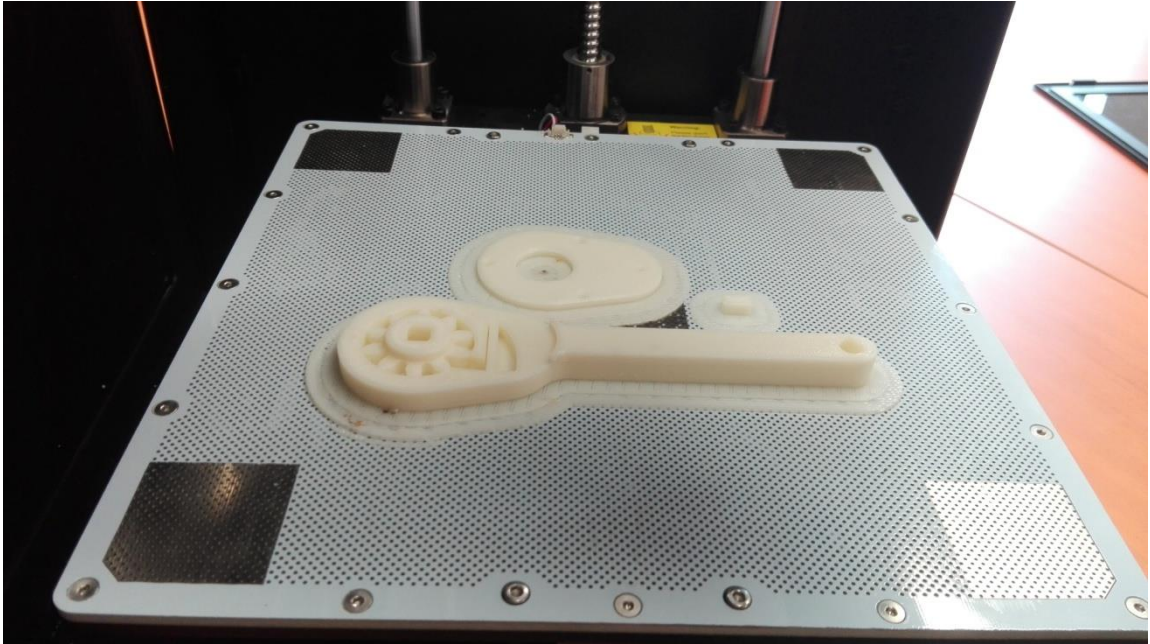
V **tabulce č. 12** jsou shrnuty informace o parametrech tisku, z nichž plyne, že ačkoli se při nastavení vyšší tloušťky tisknuté vrstvy (z toho vyplívá i zhoršená kvalita povrchu) sníží doba tisku, zvýší se nám váha součásti a tudíž i spotřeba materiálu.

Kvalita tisku	Tloušťka vrstvy [mm]	Spotřeba materiálu [m]	Váha součásti [g]	Doba tisku
Nízká	0,39	11.88	28	1h 45min
Střední	0,19	10.95	26	2h 36min
Vysoká	0,09	10.45	25	4h 31min

Tabulka č. 12 - Srovnání parametrů tisku

5.4 Provedení tisku

Tisk byl proveden pomocí 3D tiskárny Zoltrax M200. Metoda tisku je založena na principu FDM. Tisková teplota se pohybuje mezi 220-240°C a byl použit ABS materiál o průměru drátu 1.75mm. Cena tiskárny se pohybuje okolo 50 000 Kč



Obrázek č. 34 - Vytiskněný objekt v tiskárně Zortax M200

5.5 Měření součástí

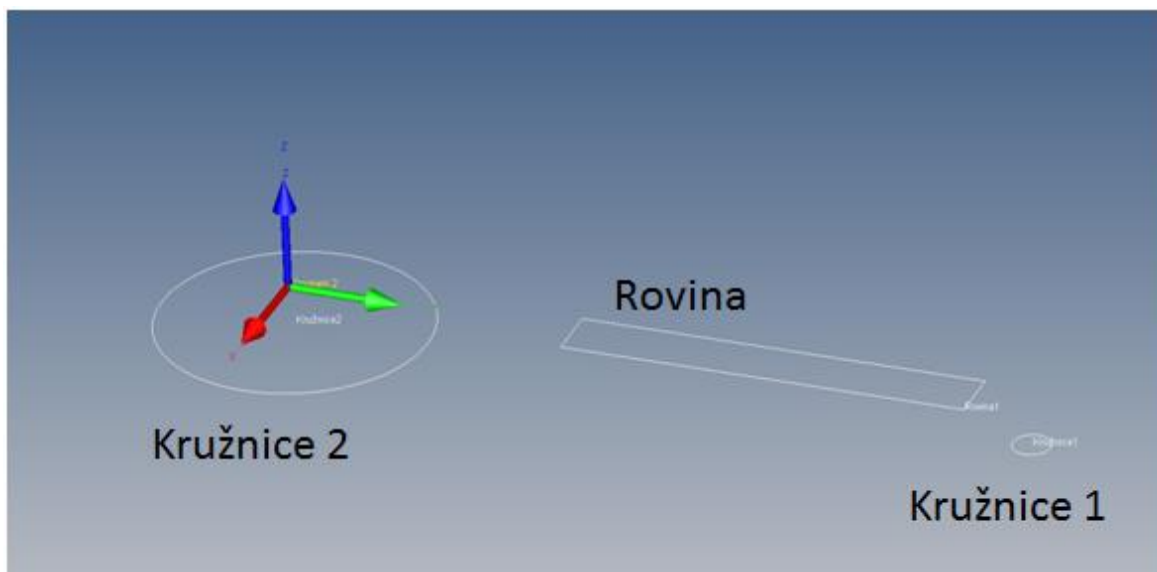
Měření tří výtisků proběhlo na třech měřicích přístrojích. Měřena byla geometrie součástí, drsnost povrchu a nakonec vizuální kontrola všech defektů pomocí mikroskopu.

5.5.1 Měření na souřadnicovém měřicím přístroji ZEISS UMC 1000

Před samotným měřením je nutná kalibrace měřidla. Kalibruje se pomocí kalibrovací koule, jejíž rozměry jsou velmi přesné a jsou vstupem pro měřicí software. Měřicí dotek sejme několik bodů na kalibrovací kouli a poté je připraven k měření.

5.5.1.1 Vyrovnání součásti

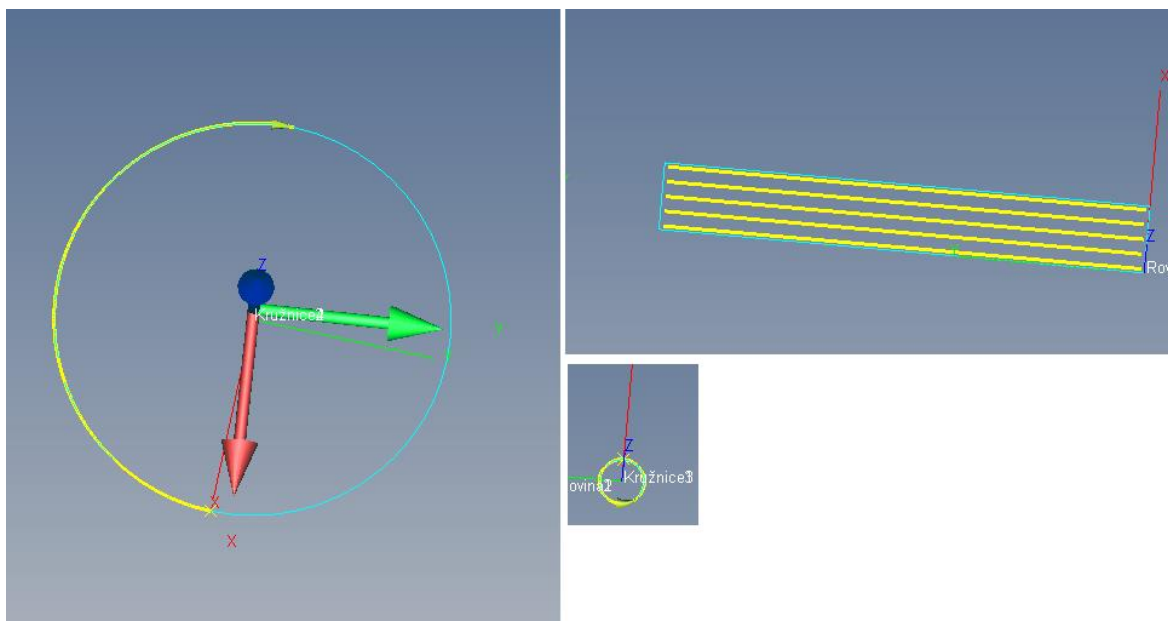
Aby přístroj věděl, kde se měřená součást nachází a jaký má tvar, musíme ji vyrovnat. Pro vyrovnání ráčny jsme vybrali rovinu madla, kde jsme pomocí čtyř bodů určili rovinu. Následovně dotykem čtyř bodů jsme určili kruh v oku, které je ve spodní části ráčny. Nakonec byl určen oblouk ve svrchní části součásti, kde byl definován i referenční bod. Na **obrázku č. 35** je referenční bod zobrazen barevnými šipkami.



Obrázek č. 35 - Vyrovnání součásti a nastavení referenčního bodu.

5.5.1.2 Strategie měření

Před spuštěním automatického měření jak kruhovitosti oblouku na svrchní části ráčny a oka ve spod, tak rovinnosti na madle, musíme určit dráhu pohybu dotyku. Pro nastavení dráhy oblouku byl definován úhlový rozsah na -180° a automatický výpočet nám určil při rychlosti 5mm/s 673 bodů dotyku. To samé následovalo u oka na konci ráčny, kde byl úhlový rozsah nastaven na celých 360° a při rychlosti 2,5mm/s byl počet bodů určen na 398. Při definování roviny jsme určili délku rastru na 10mm a šířku na 5mm. Při rychlosti dotyku 5mm/s bylo vygenerováno 3191 bodů.



Obrázek č. 36 - Zobrazení trajektorie doteku u oblouku (vlevo), roviny (vpravo nahoře) a kružnice (vpravo dole)

5.5.1.3 Měření

Po nadefinování všech měřených ploch nám souřadnicový měřicí přístroj automaticky naměří kruhovitosť a rovinnost. Jmenovitá hodnota průměru malé díry (na obrázku č. 35 znázorněna jako Kružnice 1) je 6 mm a průměr velké kružnice (na obrázku č. 35 zobrazena jako Kružnice 2) je 43 mm, přičemž měříme pouze její polovinu. Na přístroji byly postupně proměřeny všechny tři vytisknuté součásti. Výsledky měření můžeme vidět v následujících tabulkách.

Ráčna s nízkou kvalitou tisku					
Název	Jmenovité hodnoty [mm]	Naměřené hodnoty [mm]	Horní tolerance [mm]	Dolní tolerance [mm]	Odchylka/Přesah [mm]
Rovinnost	0	0,8934	0,2		0,8934/ 0,6934
Průměr Kružnice1	6	5,9921	0,2	-0,2	-0,0079

Kruhovitost Kružnice 1	0	0,2347	0,2		0,2347/ 0,0347
Průměr Kružnice2	43	42,9750	0,2	-0,2	-0,0250
Kruhovitost Kružnice2	0	0,3326	0,5		0,3326

Tabulka č. 13 - Výsledky měření součásti s nízkou kvalitou tisku

Jak můžeme vidět v **tabulce č. 13**, součást nesplňuje dané tolerance rovinnosti na madle, a kruhovitosti na Kružnici 1. To je dáno nastavením nízké kvality tisku. Při tisku se nám části ráčny propadly anebo tisková hlavice nedokázala přejít plynně z rovinného pohybu na kruhový, což mělo za následek tvorbu nerovného povrchu.

Ráčna se střední kvalitou tisku					
Název	Jmenovité hodnoty [mm]	Naměřené hodnoty [mm]	Horní tolerance [mm]	Dolní tolerance [mm]	Odchylka [mm]
Rovinnost	0	0,1184	0,2		0,1184
Průměr Kružnice1	6	6,0448	0,2	-0,2	0,0448
Kruhovitost Kružnice 1	0	0,1925	0,2		0,1925
Průměr Kružnice2	43	42,9369	0,2	-0,2	-0,0631
Kruhovitost Kružnice2	0	0,1081	0,5		0,1081

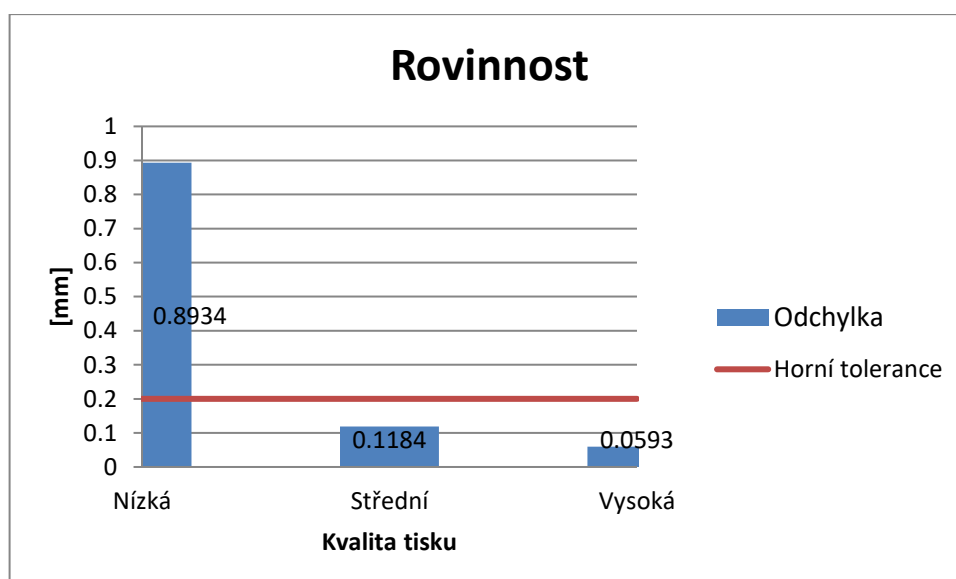
Tabulka č. 14 - Výsledky měření součásti se střední kvalitou tisku

Při střední kvalitě tisku splňuje ráčna předem dané tolerance.

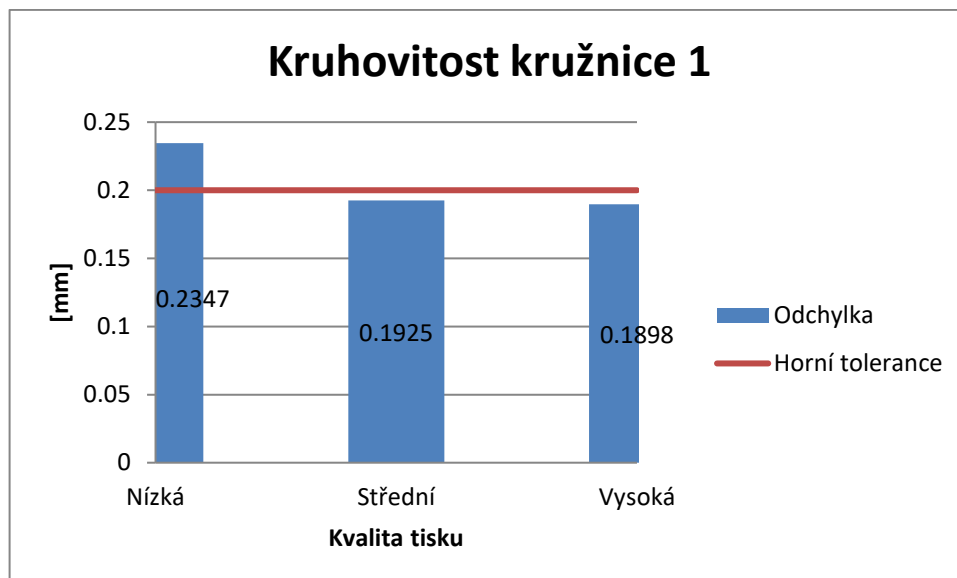
Ráčna s vysokou kvalitou tisku					
Název	Jmenovité hodnoty [mm]	Naměřené hodnoty [mm]	Horní tolerance [mm]	Dolní tolerance [mm]	Odchylka [mm]
Rovinnost	0	0,0593	0,2		0,0593
Průměr Kružnice1	6	6,0832	0,2	-0,2	0,0832
Kruhovitost Kružnice 1	0	0,1898	0,2		0,1898
Průměr Kružnice2	43	42,9059	0,2	-0,2	-0,0941
Kruhovitost Kružnice2	0	0,0673	0,5		0,0673

Tabulka č. 15 - Výsledky měření součásti s vysokou kvalitou tisku

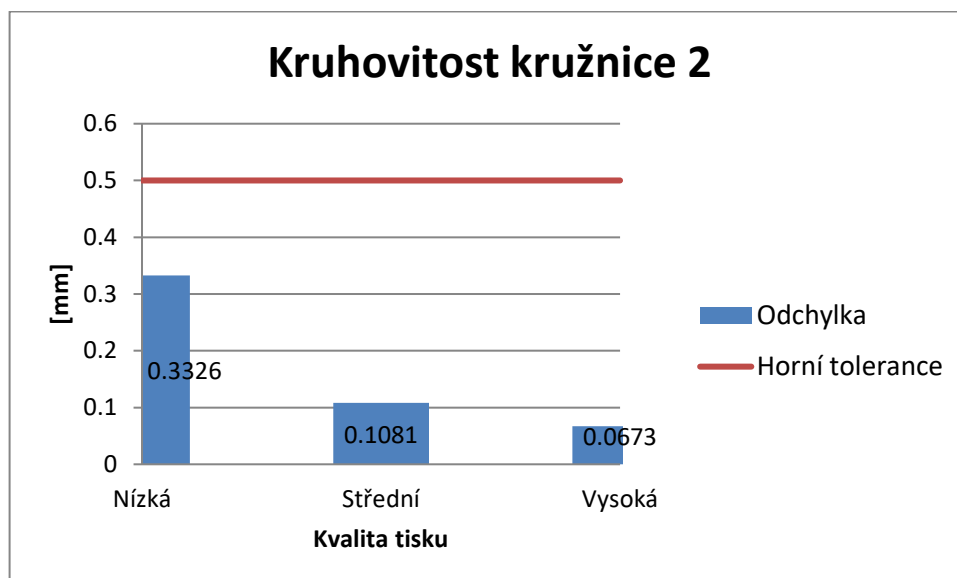
I při vysoké kvalitě tisku splňuje ráčna předem dané tolerance. Pro porovnání jsou geometrické tolerance znázorněny v následujících grafech. Modře jsou vyznačeny naměřené odchylky, přičemž vodorovnou čarou červené barvy je označena horní tolerance.



Graf č. 2 - Porovnání rovinnosti



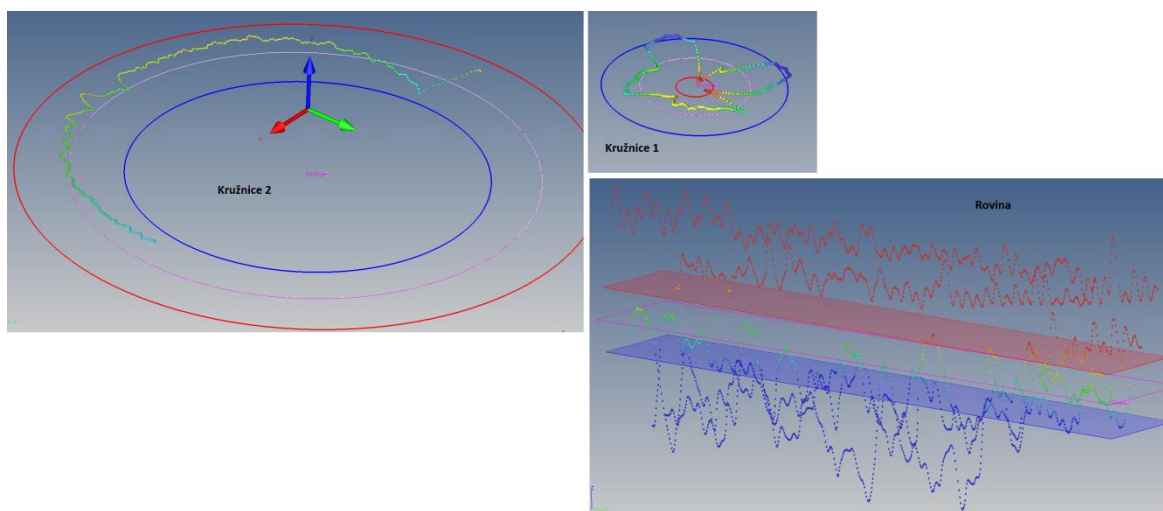
Graf č. 3 - Porovnání kruhovitosti u kružnice 1



Graf č. 4 - Porovnání kruhovitosti u kružnice 2

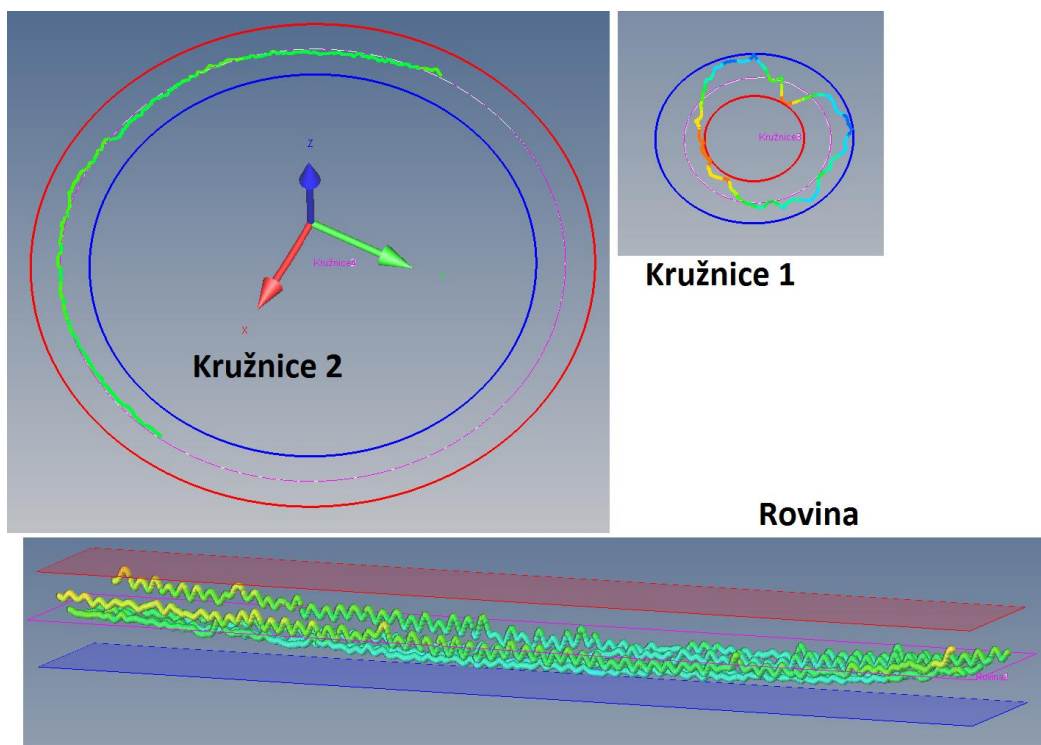
5.5.1.4 Grafické znázornění

Souřadnicový měřicí přístroj nám dokáže nerovnosti povrchu zobrazit pomocí grafického modelu. Na přiložených obrázcích jsou zobrazena toleranční pole červenými a modrými kružnicemi či rovinami.

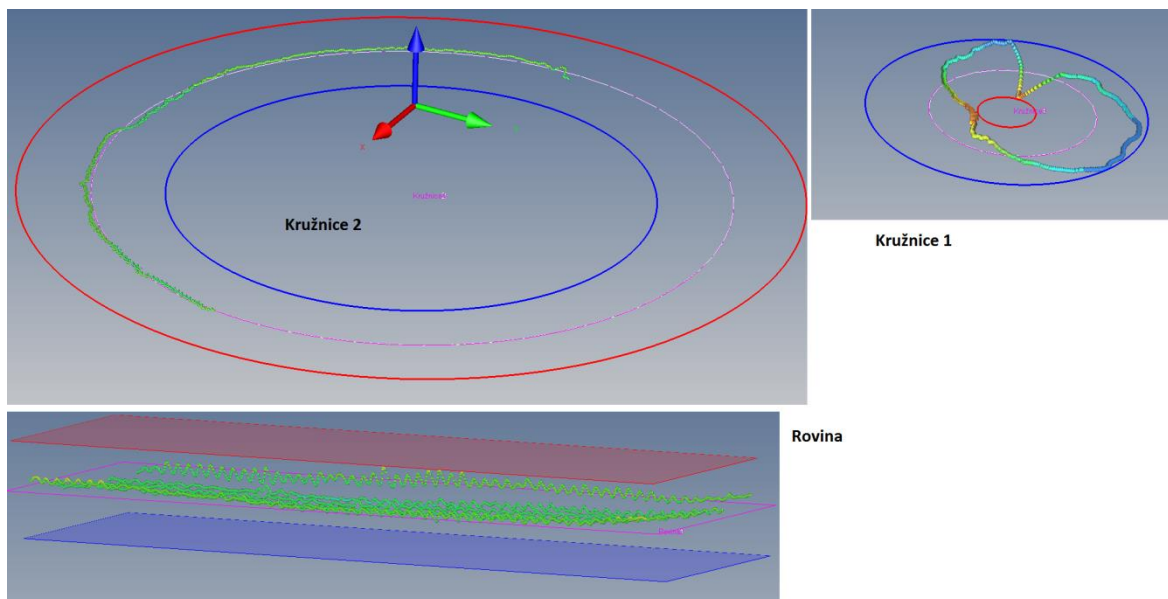


Obrázek č. 37 - Grafické zobrazení povrchu při nízké kvalitě tisku

Z grafického zobrazení je vidět, že kruhovitosť u Kružnice 1 a rovinnost nesplňují požadované tolerance. Při porovnání se střední a vysokou kvalitou tisku je rozdíl v rovinnosti markantní.



Obrázek č. 38 - Grafické zobrazení povrchu při střední kvalitě tisku



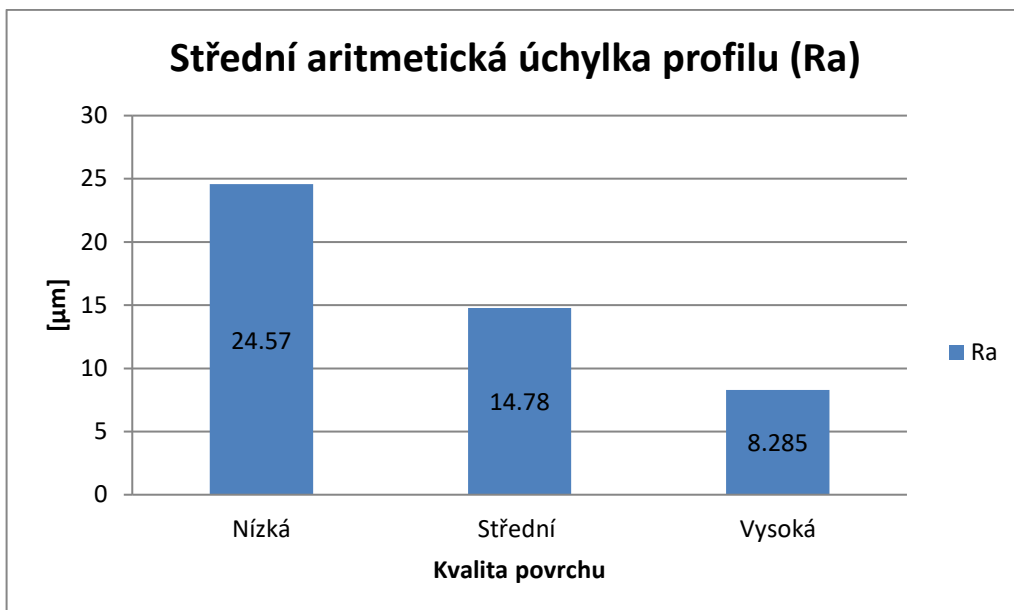
Obrázek č. 39 - Grafické zobrazení povrchu při nejvyšší kvalitě tisku

5.5.2 Měření drsností pomocí měřicího zařízení MarSurf LD 120

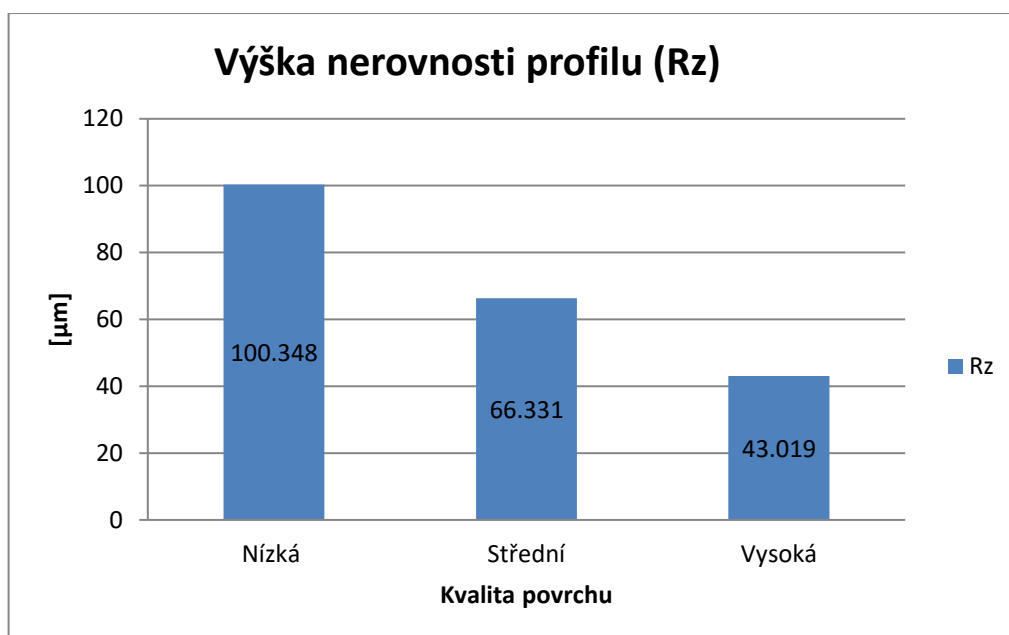
Zařízení od společnosti Mahr je zaměřeno na měření kontur a drsností. Pomocí přístroje jsme měřili střední aritmetickou úchylku profilu (R_a), výšku nerovnosti profilu určené z 10 bodů (R_z) a střední rozteč nerovnosti profilu (R_{Sm}). Drsnost jsme měřili v ose Z, tzn. z boční strany madla ráčny. V příložené **tabulce č. 16** jsou shrnuty hodnoty pro všechna měření.

Kvalita tisku ráčny	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{Sm} [μm]
Nízká	24,57	100,348	389,333
Střední	14,78	66,331	201,289
Vysoká	8,285	43,019	125,871

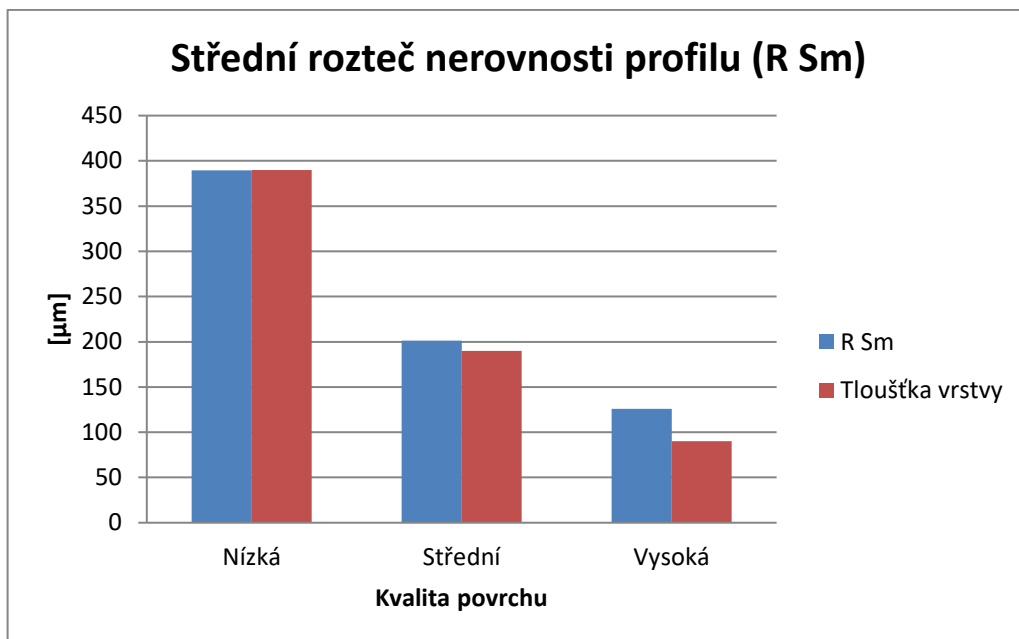
Tabulka č. 16 - Porovnání drsností všech vytištěných součástí



Graf č. 5 - Porovnání Ra

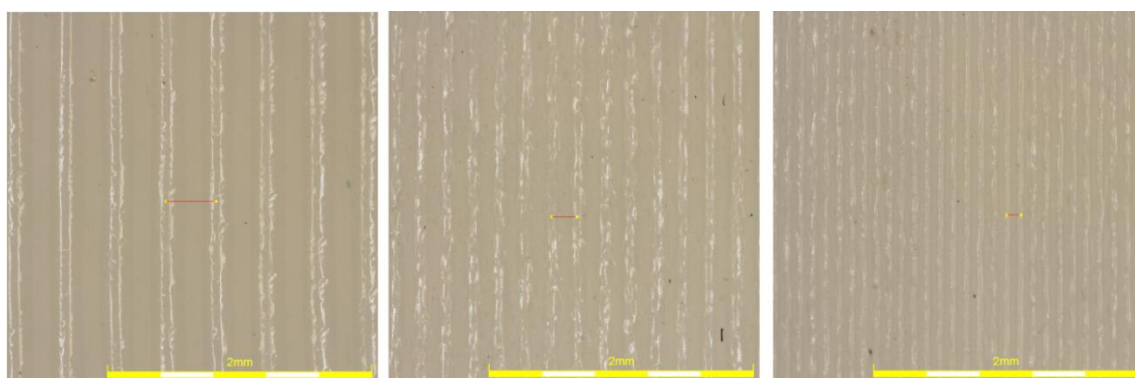


Graf č. 6 - Porovnání Rz



Graf č. 7 - Porovnání R Sm s nastavenou tloušťkou vrstvy

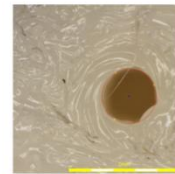
Střední rozteč nerovnosti profilu je téměř shodná s námi nastavenou tloušťkou tisknuté vrstvy. Pro porovnání můžeme vidět, jak se liší struktury povrchu v ose Z, pod digitálním mikroskopem Olympus DSX110. Na **obrázku č. 40** jsou seřazeny snímky vzestupně podle kvality provedení tisku (nízká-vlevo, střední- uprostřed, vysoká- vpravo).



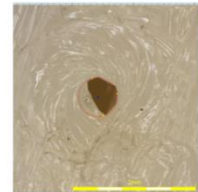
Obrázek č. 40 - Struktura povrchu na boční straně madla

5.5.3 Vizuální kontrola

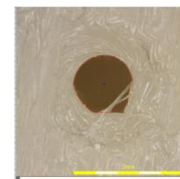
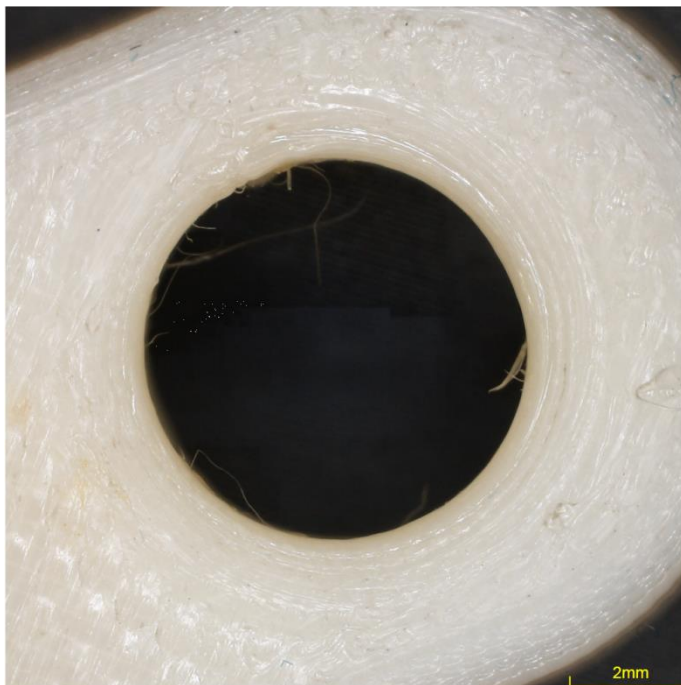
U ráčny jsme se zaměřili na kontrolu díry ve spodní části ráčny a také na otvory pro šrouby. Kontrola byla provedena pomocí digitálního mikroskopu Olympus DSX110. V následujících obrázcích jsou zobrazeny nedostatky v díře (vlevo) a v otvorech pro šrouby (vpravo). Ačkoliv ráčna s nejnižší kvalitou tisku (viz **obrázek č. 41**) má spoustu nedostatků, nejnevhodnější otvory pro montáž šroubů má ráčna se střední kvalitou tisku viz **obrázek č. 42**.



Obrázek č. 41 - Nedostatky u ráčny s nízkou kvalitou tisku



Obrázek č. 42 - Nedostatky u ráčny se střední kvalitou tisku



Obrázek č. 43 - Nedostatky u ráčny s vysokou kvalitou tisku

6 Závěr

Teoretická část slouží k seznámení s technologiemi v oblasti 3D tisku. V první kapitole je definice aditivní technologie a popis výrobního procesu při použití této technologie. Dále je zde uveden historický vývoj a současné použití 3D tisku v oblasti polymerních materiálů. Následující kapitola uvádí rozdělení a popis jednotlivých technologií podle formy použitého materiálu. Zobrazen je zde princip dané technologie, její klady a zápory, a nakonec technické specifikace. V poslední kapitole teoretické části jsou u nejvyužívanějších technologií, jako je FDM, SLA, SLS vybrány tři nejběžnější materiály, u kterých jsou popsány mechanické a fyzikální vlastnosti a také jejich cenové postavení na trhu.

Cílem praktické části bylo ukázat výrobní proces 3D tisku s následným porovnáním tří výtisků ráčny v různých kvalitativních provedeních. Součást v STL formátu jsme vložili do programu Zortrax: Z-Suite. Pomocí tohoto programu jsme zanalyzovali součást a určili, zdali je vhodná pro tisk. V dalším kroku jsme v simulaci přidali podpurné konstrukce, a následně vyhodnotili délku tisku, hmotnost součásti a spotřebu materiálu. Ačkoliv byl při nastavení nízké kvality tisku nejpříznivější čas tisku, jeho spotřeba materiálu vzrostla v řádu jednoho metru v porovnání s nejvyšší kvalitou tisku. Všechny tři ráčny jsme vytiskli na zařízení Zortrax M200 z materiálu ABS. Po tisku následovalo odstranění všech podpor tzv. postprocessing. Následné měření rovinnosti u madla, kruhovitosti u oblouku a díry ve spodní části ráčny proběhlo na souřadnicovém měřicím přístroji Zeiss UMC 1000. Ráčny vyrobené se střední a vysokou kvalitou tisku splňovali námi určené geometrické tolerance, a vykazovaly poměrně kvalitní provedení tisku. Na ráčně s nejnižšími tiskovými parametry jsme při měření rovinnosti získali hodnotu odchylky 0,8934 mm, a u díry ve spodní části ráčny jsme naměřili odchylku kruhovitosti 0,2347 mm. Z těchto hodnot je patrné, že při nízké kvalitě tisku součást obsahuje vysokou míru nepřesností. Při následném měření drsností pomocí zařízení MarSurf LD 120 se střední rozteč nerovnosti profilu (R Sm) téměř shodovala s námi nastavenou tloušťkou tištěné vrstvy, a lišila se v desetinách mikrometrů. Při závěrečné kontrole defektů na digitálním mikrometru Olympus DSX110, vykazuje ráčna se střední kvalitou tisku nejhorší provedení děr pro uchycení šrouby. Funkčnost ráčny se podařilo prokázat pouze u výrobku s vysokou kvalitou tisku, jelikož při použití tlustších vrstev při tisku, nedokázala tiskárna udržet konstrukčně předepsané mezery mezi díly a spojila je dohromady. Výsledky tisků a měření by se daly použít při

rozhodování uživatele, na jakou činnost bude výtisk používat. Při výrobě součástí, které nepotřebují vysokou kvalitu povrchu, a budou sloužit například k přenosu sil, je postačující nastavení s nižšími parametry tisku. To nám ušetří čas a prostor na případnou úpravu modelu. Naopak při tisku, kde je třeba dbát na zvýšenou jakost povrchu, je vhodné nastavit kvalitnější tiskové provedení, za cenu zvýšení časů.

7 Seznam použitých zkratk

STL	Standard Tessellation Language
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
DLP	Digital Light Processing
HDT	Heat Deflection Temperature
ABS	Akrylonil Butadien Styren
PLA	Polylactic Acid
MIT	Massachusetts Institute of Technology
CAD	Computer-aided design
RP	Rapid prototyping
FFF	Fused Filament Fabrication

8 Seznam použité literatury

Seznam použitých zdrojů u článků

- [1]. JosefPrusa. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>.
- [2]. GE. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>.
- [3]. 3Dhubs. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process>.
- [4]. 3dprintingfromscratch. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<http://3dprintingfromscratch.com/common/history-of-3d-printing/>.
- [5]. 3Dtisknazakazku. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>.
- [6]. 3Dtisknazakazku. [Online] [cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>.
- [7]. Sculpteo. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>.
- [8]. Autodesk. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>.
- [9]. prusa3D. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>.
- [10]. 3D-tisk. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>.
- [11]. Formlabs. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>.
- [12]. 3Dprintingindustry. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>.
- [13]. gsc-3D. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.gsc-3d.com/articles/2017/11/what-polyjet-3d-printing-technology>.

- [14]. allabout3Dprinting. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/#Selective_Laser_Sintering_SLS.
- [15]. Materialise. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/laserove-sintrovani>.
- [16]. Rigid. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://rigid.ink/blogs/news/3d-prints-warping-why-it-happens-and-how-to-prevent-it>.
- [17]. Livescience. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>.
- [18]. 3Dprintingforbeginners. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>.
- [19]. 3ders. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.3ders.org/pricecompare/?sc=Czech%20Republic>.
- [20]. 3D-alchemy. [Online][cit. 2018-07-09]. Dostupné z :
<https://www.3d-alchemy.co.uk/3d-printing-in-carbon.html>.
- [21]. Cadcrowd. [Online] [cit. 2018-07-10]. Dostupné z :
<https://www.cadcrowd.com/blog/the-3d-printing-trends-to-watch-in-2017/>
- [22] Stratasys. [Online] [cit. 2018-07-10] Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/fdm-technology>
- [23] USBlogs.pwc. [Online] [cit. 2018-07-12] Dostupné z:
<http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/5-ways-3d-printing-revolutionizes-manufacturing/>
- [24] Knowledge. [Online] [cit. 2018-07-12] Dostupné z:
<https://knowledge.ulprospector.com/5765/pe-polymer-based-additive-manufacturing/>
- [25] Autodesk. [Online] [cit. 2018-07-12] Dostupné z:
<https://www.autodesk.com/redshift/industrial-additive-manufacturing-trends/>

Seznam použitých zdrojů u obrázků

- [26] Obrázek č. 1 - Výrobní proces 3D tisku
https://www.researchgate.net/figure/General-3D-printing-process_fig2_283664754
- [27] Obrázek č.2 - Tiskárna SLA- 1
<http://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- [28] Obrázek č. 3 - RepRap Darwin tiskárna
<http://marty-mcguire.com/iafl-2014fall/weeks/01/>
- [29] Obrázek č. 4 - Naslouchadlo vytištěné pomocí 3D tisku
<http://www.javelin-tech.com/3d-printer/materials/polyjet-photopolymer/hearing-aid/>
- [30] Obrázek č. 44 - Hydraulické vedení používané pro vozy F1
<https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/mclaren-3d-printing-parts-2017-formula-1-race-car/>
- [31] Obrázek č. 45 - Schéma principu rychle tisknoucí tiskárny
<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16136/MITs-Laser-Powered-3D-Printer-Is-This-The-Speed-Weve-Been-Waiting-For.aspx>
- [32] Obrázek č. 7 - Princip stereolitografie
<https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/>
- [33] Obrázek č. 8 - SLA vytisknutý model
<https://www.3d-tisk.cz/dlouho-ocekavana-3d-tiskarna-form-1-od-formlabs-se-konecne-dostava-do-prodeje/>
- [34] Obrázek č. 9 - Metoda shora dolů
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [35] Obrázek č. 10 - Metoda zdola nahoru
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [36] Obrázek č. 11 - Podpory při metodě shora dolů (vlevo) a metodě zdola nahoru (vpravo)
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [37] Obrázek č. 12 - Vykreslení oblouku za použití laseru v SLA metodě (vlevo) a tentýž oblouk vykreslen pomocí voxelů v DLP (vpravo)
<https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- [38] Obrázek č. 13 - Schéma DLP metody
<https://3dprint.com/138489/indian-low-cost-dlp-3d-printer/>
- [39] Obrázek č. 14 - Tisk objektu metodou SLA (vlevo) a metodou DLP (vpravo)
<https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- [40] Obrázek č. 15 - Princip PolyJet technologie
<http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/>

- [41] Obrázek č. 16 - Princip SLS metody
<https://best3dprinter.org/wp-content/uploads/2017/10/SLS-3D-Printer-Working.jpg>
- [42] Obrázek č. 17 - Vytisknutý SLS model
<https://www.3dhubs.com/material-group/sls-nylon/feed>
- [43] Obrázek č. 18 - Princip FDM metody
<http://rookieelectronics.com/wp-content/uploads/2017/07/fdm-technology.jpg>
- [44] Obrázek č. 19 - Objekt vytisknutý pomocí FDM metody
<http://www.javelin-tech.com/3d-printer/uprint-abs-plastic-material/rhino/>
- [45] Obrázek č. 20 - Schéma LOM metody
<https://www.slideshare.net/arjunrtvm/3d-printing-additive-manufacturing-with-awesome-animations-and-special-effects>
- [46] Obrázek č. 21 - Objekt vytvořen pomocí LOM metody
<https://mashable.com/2012/11/29/3d-printing-staples/?europe=true#9I.G5jhFVPq4>
- [47] Obrázek č. 22 - Vytisknutý model z ABS materiálu
<https://www.allthat3d.com/pla-vs-abs/>
- [48] Obrázek č. 23 - Vytisknutý model z PLA materiálu
<https://www.allthat3d.com/pla-vs-abs/>
- [49] Obrázek č. 24 - Postup použití PVA materiálu v 3D tisku
<https://www.gambody.com/blog/3d-printing-filaments-nylon-vs-pet-vs-pva-hips-2/#.WzN9wtUzaM8>
- [50] Obrázek č. 46 - Tělo a detail ráčny v modelovacím softwaru SolidWorks
<https://www.thingiverse.com/thing:2822161>
- [51] Obrázek č. 47 - Všechny soubory konvertované do formátu STL
<https://www.thingiverse.com/thing:2822161>

Seznam použitých zdrojů u grafů

- [52] Graf č. 1 - Využití aditivních technologií v průmyslu [online] [cit. 2018-07-10].
Dostupné z: <https://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>

Seznam použitých zdrojů u tabulek

Tabulka č. 1 - Přehled technologií používaných při 3D tisku	15
Tabulka č. 2 - Porovnání metod SLA [3].....	19
Tabulka č. 3 - Klady a zápory SLA metody [3].....	21
Tabulka č. 4 - Srovnání použití metodiky DLP s SLA [11]	23
Tabulka č. 5 - Parametry PolyJet tiskárny [15]	24
Tabulka č. 6 - Technické specifikace SLS metody [15].....	27
Tabulka č. 7 - Klady a zápory SLS metody [3]	28
Tabulka č. 8 - Technické specifikace FDM metody [15]	30
Tabulka č. 9 - Klady a zápory FDM metody [3]	32
Tabulka č. 10 - Srovnání nejpoužívanějších technologií [11]	34
Tabulka č. 11 - Srovnání dalších používaných materiálů[22]	38
Tabulka č. 12 - Srovnání parametrů tisku.....	46
Tabulka č. 13 - Výsledky měření součásti s nízkou kvalitou tisku.....	50
Tabulka č. 14 - Výsledky měření součásti se střední kvalitou tisku.....	50
Tabulka č. 15 - Výsledky měření součásti s vysokou kvalitou tisku.....	51
Tabulka č. 16 - Porovnání drsností všech vytištěných součástí.....	54