



Pedagogická  
fakulta  
Faculty  
of Education

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**

**Pedagogická fakulta**

**Katedra aplikované fyziky a techniky**

**Diplomová práce**

**Technické aspekty použití 3D tisku ve výuce na ZŠ**

Vypracoval: Bc. Tomáš Cvrček

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

České Budějovice 2016

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Technické aspekty použití 3D tisku ve výuce na ZŠ jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě archivovaných Pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, 30. 4. 2016

.....

Bc. Tomáš Cvrček

## **Poděkování:**

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalovi Šerému, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení diplomové práce. Děkuji také Mgr. Vladimíru Vochozkovi za pomoc s výběrem modelů pro výuku fyziky. Dále rodině a přítelkyni za podporu během studia.

## **Anotace:**

Diplomová práce se v úvodu zabývá historií 3D tisku a jeho vývojem. Pro lepší pochopení podstaty 3D tisku jsou uvedeny významné technologie, které zahrnuje. Odborná část zahrnuje činnost s tiskárnou MakerBot Replicator 2X. Dále jsou analyzovány jednotlivé mechanické části zařízení společně s ovládacím softwarem MakerBot Desktop. Následuje kapitola pojednávající o limitech a omezeních při tisku na zmíněné 3D tiskárny, kromě toho popisuje důležité aspekty při práci na tiskárně.

Pro tvorbu elektronických modelů jsou vytipovány programy vhodné pro použití na základní škole. Významný milník tvoří problematika 3D tisku, která může sloužit jako návod při eliminaci potíží s kvalitou tisku, nefunkčností 3D tiskárny a jiné. Jsou navrženy zajímavé modely pro výuku fyziky a pracovních činností, které žákům usnadní chápání vysvětlované látky a fungují jako aktivizující prvek do hodiny. Byl vytvořen seznam významných webů, kde lze nalézt modely vhodné nejenom pro výuku na ZŠ, ale i pro jiné účely. Poslední kapitola se věnuje ekonomickému hledisku 3D tisku.

**Klíčová slova:** 3D tisk, MakerBot Replicator 2X, FDM technologie, extrudér, ABS, PLA, SolidWorks, základní škola, struna

## **Anotation:**

This thesis in the beginning deals with the history of 3D printing and its development. For better understanding the nature of 3D printing are the significant technologies that includes. Professional part includes work with the printer MakerBot Replicator 2X. Mechanical parts of the device are analyzed together with the operating software MakerBot DesktopThe following chapter is dealing with the limits and restrictions when it is printed on said 3D printer, except that describes important aspects when working on the printer.

For the creation of electronic models are suggested appropriate programs for use in elementary school. A significant milestone is forming the problems of 3D printing, which can serve as a guide for the elimination of print quality problems, malfunctioning of 3D printers and others. Interesting models are designed for teaching physics and working activities that the students facilitate understanding of the substance of the response and act as activating element within lesson. It was created a list of important sites where you can find models suitable not only for teaching in elementary schools, but also for other purposes. The last chapter deals with the economic aspect of 3D printing.

**Key words:** 3D print, MakerBot Replicator 2X, FDM technology, extrudér, ABS, PLA, SolidWorks, elementary school, filament

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Historie 3D tisku .....	10
3	Dělení principů technologie Rapid Prototyping.....	12
4	Technologie 3D tisku .....	13
4.1	Stereolitografie (SLA) .....	14
4.2	Digital light processing (DLP).....	16
4.3	Selective Laser sintering .....	17
4.4	Fused Deposition Modelling (FDM) .....	19
4.5	Inkjet: Binder Jetting .....	21
4.6	Inkjet: Material Jetting.....	22
4.7	Laminated Object Manufacture .....	23
4.8	The Electron Beam Melting (EBM) .....	25
5	O společnosti MakerBot Industries .....	26
6	Technologie 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X .....	27
6.1	Materiály pro 3D tisk.....	27
6.1.1	ABS (Akrylonitril Butadien Styrene).....	28
6.1.2	HIPS (High Impact Polystyrene) .....	29
6.1.3	PLA (Polylactic Acid).....	29
6.2	Konstrukce 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X .....	30
6.2.1	Portálová konstrukce.....	32
6.2.2	Duální extrudér (duální vytlačovací hlava).....	33
6.2.3	Vyhřívaná stavěcí platforma .....	35
6.2.4	Nosný rám .....	38
6.2.5	Cívka s ABS, PLA vláknem a držák cívky vlákna .....	39
6.2.6	Krokové motory a řemenové převody.....	40
6.2.7	LCD panel .....	42

6.3	Využitelné formáty, software pro 3D tiskárnu MakerBot Replicator 2X.....	45
6.3.1	Charakteristika STL formátu.....	45
6.3.2	Charakteristika OBJ formátu.....	46
6.3.3	Charakteristika THING formátu .....	46
6.3.4	Charakteristika G – CODE (X3G) formát .....	46
7	Software MakerBot Desktop verze 3.9 .....	47
7.1	Nastavení parametrů tisku .....	48
8	Software pro 3D modelování pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X .....	62
8.1	OpenSCAD .....	63
8.2	Google SketchUp.....	64
8.3	DesingSpark Mechanical .....	65
8.4	SolidWorks .....	66
8.5	Autodesk 123 Design.....	70
8.6	Autodesk 123 Catch.....	71
9	Problematika a zásady 3D tisku s tiskárnou MakerBot Replicator 2X.....	73
9.1	Limity a omezení 3D tiskárny .....	73
9.2	Zásady tvorby a použití elektronického modelu.....	78
9.3	Umístění modelu do tiskárny.....	79
9.4	Malá přilnavost modelu na podložce .....	81
9.5	Souhrn.....	86
9.6	Dodatečné úpravy modelu .....	87
10	Problematika 3D tisku a jejich korekce .....	89
10.1	Potíže s extrudérem.....	89
10.2	Model nedrží na vyhřívané podložce.....	90
10.3	Není vytlačován dostatek filamentu (underextrusion).....	92
10.4	Díry a mezery ve vrchních vrstvách .....	93
10.5	Mezery v tenkých stěnách.....	94
10.6	Řetězce (oozing, stringing).....	94
10.7	Přehřátí filamentu (overheating).....	96

10.8	Vychýlení jednotlivých vrstev .....	97
10.9	Oddělování vrstev .....	99
10.10	Ubrošený filament (grinding filament) .....	100
10.11	Ucpaný extrudér.....	101
10.12	Zastavení extruze během tisku.....	102
10.13	Nedostatečná výplň součásti.....	103
10.14	Hrudky (blobs and zits).....	104
10.15	Mezery mezi výplní a obvodem objektu.....	105
10.16	Šrámy na povrchu součásti .....	106
10.17	Díry a mezery ve spodní části objektu, vibrace .....	106
10.18	Malé detaily nebyly vytištěny.....	107
10.19	Nekonzistentní vytlačování.....	108
11	Modely vhodné k použití v hodinách fyziky, nebo pracovních činností .....	110
11.1	Výuka fyziky.....	110
11.2	Výuka pracovních činností .....	114
12	Webové stránky vhodné pro získání různých 3D modelů .....	116
13	Náklady na tisk 3D tiskárnou .....	116
13.1	Výpočet materiálových nákladů .....	116
13.2	Výpočet energetických výdajů.....	117
13.3	Bilance nákladů modelů vytvořených pro diplomovou práci.....	117
14	Závěr .....	118
15	Seznam použité literatury.....	120
16	Seznam obrázků .....	123
17	Seznam tabulek .....	125
18	Seznam rovnic.....	125



# 1 Úvod

V dnešní době proniká 3D tisk do všech odvětví a má velmi široké možnosti využití. Příkladem může být neustále rozvíjející oblast kosmonautiky, zdravotnictví, strojírenství a mnoho dalších. Jedním z neméně důležitých odvětví je vzdělávací oblast školství, která připravuje a formuje žáky pro budoucí život a činnost v pracovních odvětvích. Z tohoto důvodu je potřeba, aby i školství bylo schopné reagovat na moderní technologie. Věřím, že i na základních školách dojde k rozvoji a růstu zájmů o tuto technologii a bude žáky a studenty motivovat k technickým a vědeckým disciplínám, které jsou pro vývoj lidstva důležité.

V dalším rozvoji 3D tisku se očekává rozmanitější využití materiálů okolo nás včetně zvýšení kvality tištěných součástí, zvýšení přesnosti tiskáren a snížení času potřebného pro tvorbu objektů. V blízké budoucnosti se 3D tisk bude

Diplomová práce bude koncipována do několika oblastí. V jedné z nich bude popsána historie 3D tisku od 80. let 20. století až do současnosti. Dále jednotlivé metody 3D tisku – možnosti, způsoby tisku a jejich výhody a nevýhody. V odborné části bude analyzováno zařízení MakerBot Replicator 2X – konstrukce a součásti tiskárny; její parametry, limity a využitelný software pro tiskárnu pro tvorbu elektronických modelů.

Procesu tisku a jeho problematika bude zmíněna ve všeobecné formě, ale i pro tiskárnu MakerBot. V neposlední řadě budou popsány materiály vhodné k tisku a modelování na zmíněné 3D tiskárně. K tiskárně MakerBot Replicator 2X se pojí i její údržba, která bude popsána v příslušných kapitolách. Specifickým oddílem diplomové práce bude využití 3D tiskárny ve výuce fyziky a pracovních činností na základní škole. Dále budou zmíněny náklady pro konkrétní tištěné modely a možnost jejich výpočtu. Bude sestavena databáze webů pro získání elektronických modelů.

K výběru této diplomové práce mě motivovala myšlenka seznámit se a prozkoumat technologii 3D tisku, která má do budoucnosti velký potenciál, pro jednotlivce tak i pro celou lidskou společnost. Uživatel dostává v rámci technologie téměř neomezenou možnost tvorby a alternativu pro získávání výrobku, než pouze od komerčních firem.

## 2 Historie 3D tisku

Počátky 3D tisku se začaly psát koncem 80. let 20. století. 3D tisk byl a je v současnosti nazýván dvojicí anglických slov – „Rapid Prototyping“. Tento název se ujal, jelikož procesy tisku byly koncipovány za rychlé a cenově přijatelné pro tvorbu modelů produktů ve vývoji různých odvětví průmyslu. Zajímavé je, že úplně první patentová přihláška pro RP technologie byla podána dr. Kodamou z Japonska v květnu 1980. Bohužel pro Dr. Kodamu, žádost o patent nebyla následně vyplněna před jednoroční závěrečným termínem po podání žádosti, což je katastrofální proto, že dr. Kodama byl patentový právník. [1]

Charles Hull v roce 1984 začal zkoumat vlastnosti fotopolymerů inkoustových tiskáren, objevuje jejich specifické fyzikální vlastnosti zajišťující tuhnutí materiálu při působení UV záření. [2] Většina zdrojů považuje Charlese Hulla za prvního opravdového „kmotra“ 3D tisku, který si nechal patentovat 11. března 1986 aditivní technologii (přidávání materiálu), která je také pojmenovaná Stereolitografie (SLA). [3] Založil společnost 3D Systems, kde byla vyvíjena 3D tiskárna SLA-1. SLA-1 byl prvním modelem určeným pro veřejnost a byl poprvé prodán v roce 1988. Zároveň se na trhu objevují další technologie náležící pod Rapid Prototyping. V roce 1987 Charles Deckard si nechal patentovat na novou metodu Selective Laser Sintering (SLS). [1]

William Masters si patentoval technologii Ballistic Particle Manufacturing (BPM) téhož roku. [4] Další metoda se objevila v roce 1989 pod názvem Fused Deposition Modelling (FDM), kterou si nechal patentovat Scott Crump – spoluzakladatel společnosti Stratasys. Společnost EOS GmbH byla založená v Německu roku 1989 Hansem Langrem, po testování SLA technologie se firma zaměřila na metodu Selective Laser Sintering (SLS). Metoda LS se neustále vyvíjela a zlepšovala. V roce 1990 firma EOS prodala jejich první tiskárnu ‘Stereos’ system. Společnost EOS dále pracovala na projektu pro firmu Electrolux a výsledkem byla vylepšená metoda výroby Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Další technologie 3D tisku se objevily na přelomu 90. let. Itzhak Pomerantz a kolektiv autorů vytvořili metodu 3D tisku Solid Ground Curing (SGC) v roce 1990. [1]

Společnost Helisys v roce 1991 prodala 3D tiskárnu na principu Laminated Object Manufacturing (LOM) od Michaela Feigina, který si ji patentoval již roku 1988. [5, 6] V roce 1992 se začalo testovat použití 3D tisku pro výrobu součástek v automobilovém a leteckém průmyslu. [2] V neposlední řadě zmíním technologii 3D tisku Three Dimensional Printing (3DP) vyvinutou na Massachusetts Institute of Technology (MIT) v roce 1993. [5] Společnost Sanders Prototype v roce 1994 představila technologii 3D tisku Solidscape. [7]

Během dalších let 3D tisk začal pronikat do mnoha odvětví. V roce 1999 znamenal pro vědu velký úspěch vytvoření části orgánu pokryté pacientovými vlastními buňkami, který umožňuje nové možnosti při transplantaci orgánů v lékařství. První funkční miniaturní ledvina byla úspěšně použita a transplantována v roce 2002 při operaci nemocného zvíře. V roce 2005 dr. Adrian Bowyer zavádí projekt RepRap, jehož úkolem je vytvořit tiskárnu, která by dokázala tisknout své součástky a tím snížit náklady na výrobu tiskárny a zvýšit dostupnost pro běžného uživatele. 3D tiskárna Darwin je samoreplikační tiskárna vycházející z projektu RepRap roku zhotovená roku 2008. Dále byla v roce 2008 vytvořena celistvá protéza nohy složená z několika částí v jedné výrobní etapě bez následné montáže. Objevila se i 3D tiskárna firmy Objet Connex 500, která je schopná tisknout modely z různých druhů materiálů současně. [2]

V roce 2009 se povedlo na „biotiskárně“ vytisknout organické cévy použitelné pro případnou transplantaci k potřebě člověka. Téhož roku se začínají objevovat tiskárny „do it yourself“, které si může domácí uživatel poskládat za příznivou cenu. Firma Stratasys v roce 2010 spustila novou službu RedEye on Demand umožňující tisk nadrozměrných objektů. Firma se prezentovala vytvořeným automobilem Urbee, jehož celá karoserie byla vytištěna 3D tiskárnou. V roce 2011 vědci z univerzit Cornell a Brunel začali vyvíjet 3D tiskárny na výrobu jídla a čokolády. Téhož roku firma Materialise nabízí první 3D tisk ze 14 karátového zlata a stříbra.

Následujícího roku lékaři v Nizozemsku si nechali od společnosti LayerWise vytvořit implantát nahrazující spodní čelist pro 83 letou pacientku, kterou ji úspěšně implantovali. V roce 2015 se nezávisle na sobě podařilo v Nizozemsku a Číně na 3D tiskárně vytisknout části budov. Budovy jsou vytvořeny pouze z komponent vzniklých na 3D tiskárně. [8]

### 3 Dělení principů technologie Rapid Prototyping

V dnešním světě je k dispozici početné zastoupení technologie rychlé tvorby prototypů, každý výrobní postup má svá specifika při vytváření objektu, avšak některé vlastnosti mají společné a je možné je třídit dle určitých hledisek. Dělit tyto technologie můžeme z hlediska výrobního postupu a materiálu, který je pro objekt vytvořen.

Dělení z hlediska použitého materiálu:

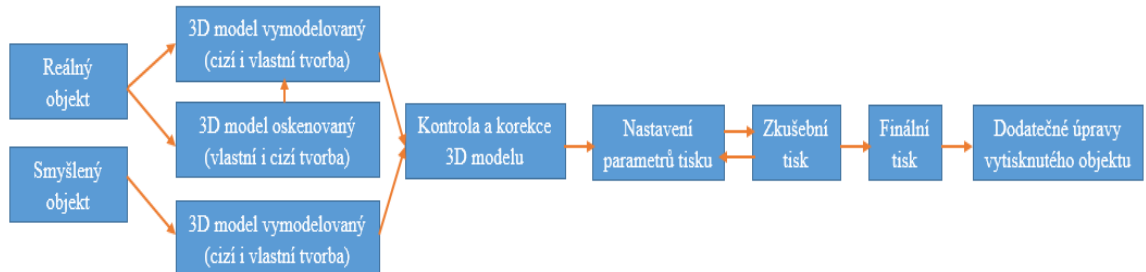
- tekuté materiály,
- práškové materiály,
- tryskové spojování,
- tryskové tištění,
- polymerní materiály,
- papírové materiály.

Dělení z hlediska výrobního postupu:

- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním bod po bodu;
- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním po vrstvách;
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním bod po bodu;
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním po vrstvách. [9]

## 4 Technologie 3D tisku

Počátek každého 3D tisku začíná tvorbou 3D modelu pomocí modelovacího programu. Poté je model „rozložen“ do vrstev, čímž se návrh převede do souboru čitelného pro 3D tiskárnu. Materiál zpracováváný 3D tiskárnou je pak vrstven podle vytvořeného modelu a postupu. [1]



Pro lepší představu o 3D tisku bych teď rád uvedl některé technologie, kterými jsou ve světě vyráběny objekty (modely) a mají tak své nezastupitelné místo. K jednotlivým technologiím pro lepší porozumění principu uvedu zjednodušený náčrtek společně s přednostmi a nedostatky:

- Stereolitografie
- Digital light processing
- Selective Laser sintering (melting)
- Fused Deposition Modelling
- Inkjet: Binder Jetting
- Inkjet: Material Jetting
- Laminated Object Manufacture
- The Electron Beam Melting

## 4.1 Stereolitografie (SLA)

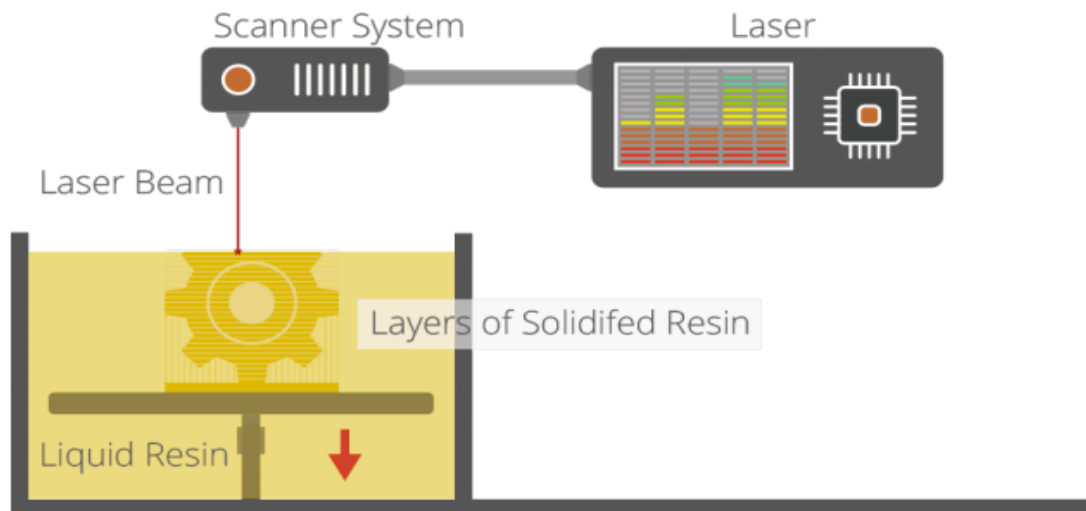
SLA technologie je první 3D metoda tisku, která byla vytvořena a komercializována. Je založena na principu interakce fotopolymerové pryskyřice a laseru. Touto metodou vznikne velmi přesný model. Lze ji využít k výrobě velmi přesných částí. Jedná se o komplexní proces, kdy tekutá polymerová pryskyřice je držena v kádi s pohyblivou plošinou uvnitř.

Laserový paprsek je zaměřen v souřadících X – Y na povrch pryskyřice podle dat dodávaných do tiskárny, přičemž pryskyřice ztvdne přesně tam, kde laserový paprsek působí na povrch pryskyřice. Jakmile je vrstva dokončená, plošina sjede dolů o požadovaný rozměr v ose Z. Další vrstvy jsou tvořené stejným postupem, dokud není model hotový. Tloušťka vrstvy je 0,05 až 0,15 mm.

Tvorba modelu v některých případech vyžaduje podpěry, zvláště u převislých a podříznutých dílů. Následně se podpěry manuálně odstraní. Z hlediska dalších kroků mnoho vytisknutých modelů musí být očištěno a projít procesem vytvrzení. Proces vytvrzení vyžaduje vystavit díl intenzivnímu světlu jako v troubě a tím dojde k dokonalému vytvrzení pryskyřice. SLA technologie je považovaná za jednu z nejpřesnějších 3D metod tisku s vynikající povrchovou kvalitou. [1, 14]

Metoda SLA se používá převážně v oblasti automobilového průmyslu při výrobě modelů aut, na kterých se zkouší různé technologické přípravky, nástroje atd. Výhodou je také možnost výroby forem pro lití a vstřikování, výroba modelů s malými otvory a přesnými detaily atd.

Po ukončení tisku se prototypová součást vyjme z podpor. Následuje úprava povrchu včetně opracování v UV komoře, kde se součásti dodá požadovaná integrita povrchu, barva atd. [14]



Obrázek 2: Princip SLA technologie. Převzato a upraveno z [1]

**Volba atributů tisku** – příprava modelu pro tisk, měřítko tisku a orientace modelu v pracovním prostoru.

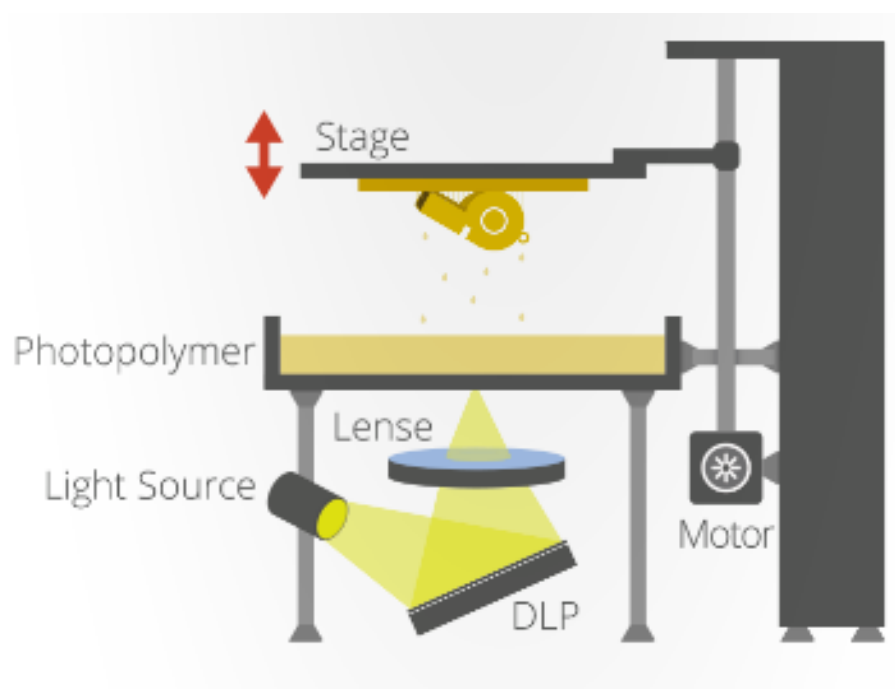
**Výhody:** Zhotovení objemnějších modelů, dostatečná přesnost, jakost povrchu, široký výběr materiálů, plynulý průběh procesu, není třeba obsluhy během procesu.

**Nevýhody:** Metoda požadující úpravu povrchu modelu a následné sušení

## 4.2 Digital light processing (DLP)

Tato metoda tisku je založená na podobném principu Stereolitografie, avšak zásadní rozdíl je ve zdroji světla. Technologie DLP využívá obloukovou lampu. Zdroj světla je stavitelným zrcadlem směřovaný na celou nádrž s fotopolymerní pryskyřicí v jediném kroku. Dochází tak k rychlejší tvorbě modelu, než při použití technologie SLA.

DLP technologie vytváří precizní modely ve vysoké kvalitě. Při výrobním procesu je třeba vytvářet stavební podpory pro model a následně musí fotopolymerní pryskyřice, ze které je model vytvořen projít procesem vytvrzování. [1] Proces vytvrzování je založený na principu využití zvýšené teploty po určitou dobu, kdy dojde ke zrychlenému a maximálnímu vytvrzování modelu. Tohoto postupu se využívá přibližně po 12 hodinách, kdy byl model vytisknut a ponechán v klidu při pokojové teplotě. [11]



Obrázek 3: DLP technologie. Převzato a upraveno z [1]



### 4.3 Selective Laser sintering

Do češtiny lze přeložit jako selektivní spékání laserem, avšak v praxi se využívá termín „sintrování“. Výrobek zde vzniká tavením práškového materiálu (tím může být např. plast, kov, keramika nebo sklo), který je po tenkých vrstvách nanesen a spékán v ploše řezů dle digitálního modelu vysoce výkonným laserem. Nejprve je nanesena vrstva prášku v celé ploše stavěcí platformy a stroj tento materiál přehřejí na teplotu blízkou jeho bodu tání, aby laseru umožnil využít veškeré jeho energie ke spčení materiálu v ploše právě vytvářeného řezu modelem. [9, 12]

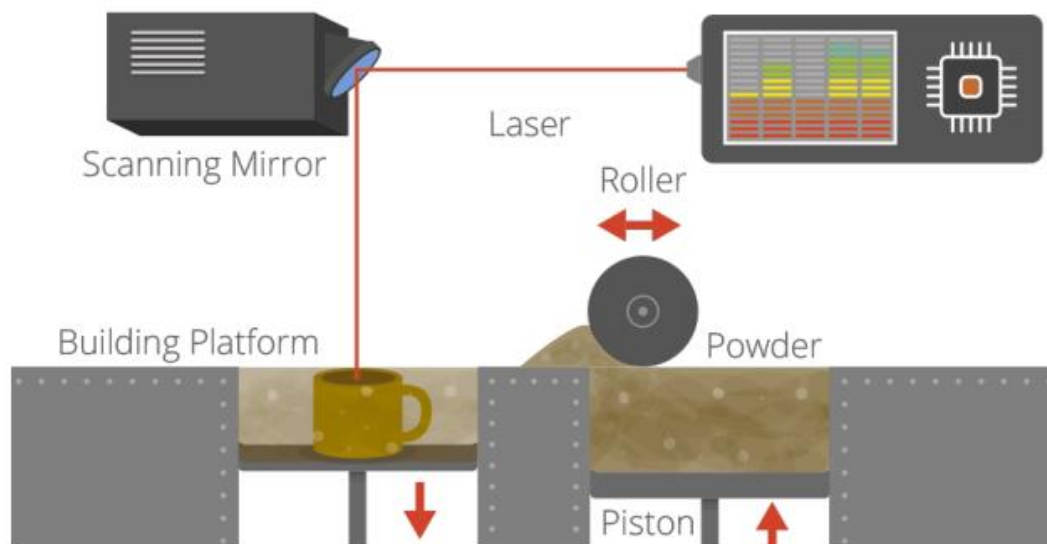
Jakmile laser osvítl příslušnou plochu, klesne stavěcí platforma o tloušťku jedné stavební vrstvy níže, nanese se další vrstva materiálu a takto se celý proces opakuje až do dokončení výrobku. Je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru. Výhodou tohoto postupu, kdy je vytvářený model neustále obklopen zbytkovým práškovým materiálem, je eliminace potřeby dočasných podpor. SLS technologie dokáže poskytnout výrobky srovnatelných kvalit, jako konvenční výrobní metody – na rozdíl od nich však může z kovu, keramiky nebo dalších materiálů vytvářet i velmi složité struktury. [9, 12]

Stavební komora je vyhřívána a je důležité udržet nastavenou teplotu během procesu na bodu tání práškového materiálu. Nevýhodou je požadavek na vysokou teplotu pro práškové spékání a následný čas nutný pro zchlazení součástí. Dalším nedílným problémem bývala pórovitost během procesu výroby objektu, avšak v dnešní době došlo ke značnému vylepšení - dokonale hutný povrch součástí. [1, 15]

Některé aplikace stále vyžadují využití dalších materiálů pro zlepšení mechanických vlastností. Díly vyrobené touto metodou jsou mnohem pevnější než při výrobě metodou SLA nebo DLP. Pokud dojde při procesu k úplnému natavení prášku, snižuje se pórovitost výsledného materiálu až na 0,5 %. [1, 15]

Podle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat metody:

- Laser Sintering – Plastic.
- Laser Sintering – Metal.
- Laser Sintering – Foundry Sand.
- Laser Sintering – Ceramic (Direct Shelt Production Casting). [14]



Obrázek 4: SLS technologie. Převzato a upraveno z [1]

**Volba atributů tisku** – příprava modelu pro tisk, měřítko tisku a orientace modelu v pracovním prostoru.

**Výhody:** Součásti vyrobené metodou SLS vynikají svojí pevností – velké množství použitelných materiálů. Součásti nepotřebují podpory. Obslužný software nabízí široké možnosti nastavení (změny parametrů během tisku).

**Nevýhody:** Prostorově a energeticky náročné zařízení. Kvalita povrchu je v porovnání s ostatními metodami nízká – zrnitost práškového materiálu. [14]

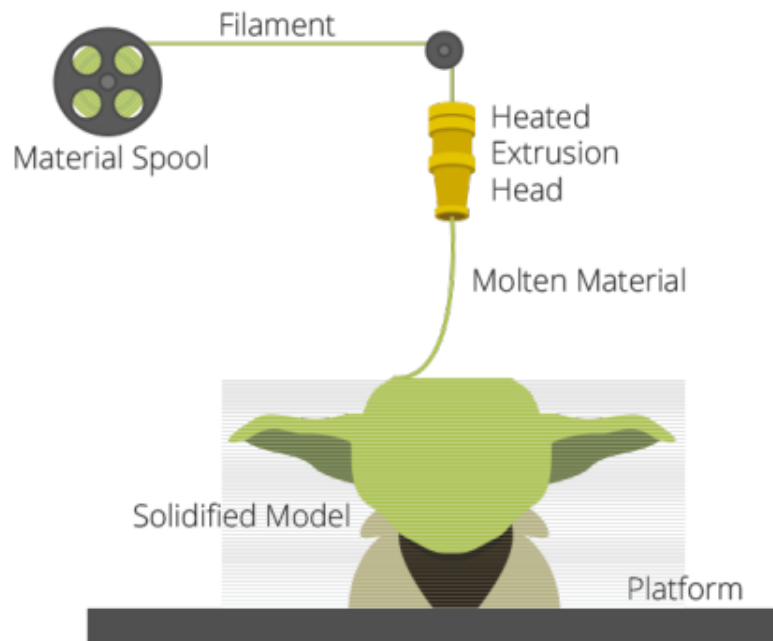
#### 4.4 Fused Deposition Modelling (FDM)

Netoxický materiál ve formě vlákna je navinut na vyměnitelné cívce a dopravován do speciální pohyblivé hlavy. Zde je natavován a přes trysku nanášen v podobě slabého vlákna na vyjímatelnou základovou desku. Vlákna se vzájemně spojují a vytváří tenké vrstvy a staví tak model vrstvu po vrstvě. Současně s modelovacím materiálem je v jednotlivých vrstvách nanášen materiál pro stavbu systému podpor, pokud to tvar modelu vyžaduje. [13]

Podpurná struktura se zpravidla nanáší stejným způsobem, jen jinou tryskou s jiným materiálem. Ten je většinou o něco křehčí proto, aby se dal snadno odstranit. Po vyrobení součásti se mechanicky nebo chemicky odstraní. Podporu zpravidla není třeba vyrábět, pokud není úhel převisu větší než 45°. [14, 15]

Výsledné mechanické vlastnosti nejsou závislé na způsobu kladení těchto vláken. Rozhodující je použitý rastr a vzdálenost mezi jednotlivými vlákny. Mezera se standardně ponechává nastavena jako „= 0“. Při jakékoli kladné hodnotě nedochází ke vzniku spojení mezi vlákny – klesají parametry materiálu (pevnost, přesnost a kvalita povrchu) a ten se rozpadá na několik částí. Naopak výhodné může být nastavení záporné mezery, kdy se vlákna jakoby mírně překrývají. Nemělo by se překročit 0,05 mm, protože vzrůstá pevnost, ale naopak může to negativně ovlivnit přesnost nebo kvalitu povrchu. Šířka nanášeného vlákna neovlivňuje pevnost součásti, má ale vliv na časovou náročnost stavby a kvalitu povrchu. Pokud je na vyráběné součásti tenká stěna, šířka vlákna by měla být pokud možno celým dělencem tloušťky stěny. [15]

Touto technologií je možné vytvářet součásti například z polyamidu, polyetylenu nebo vosku. Vytvořená součást již nevyžaduje žádné obrábění. Na principu technologie FDM pracuje většina tzv. 3D tiskáren. [10] Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti a designu nových případně inovovaných výrobků. Vzhledem k pevnosti používaných materiálů lze tyto modely vystavit zatížení, které odpovídá realitě. [14]



Obrázek 5: FDM technologie. Převzato a upraveno z [1]

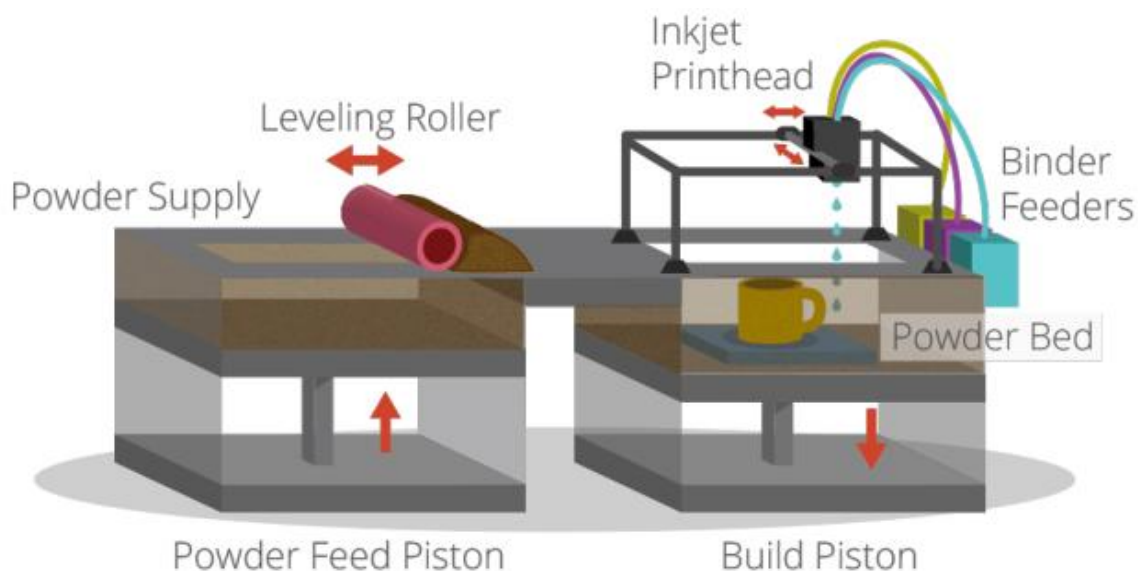
**Volba atributů tisku** – typ zařízení, tloušťka vrstev materiálu, typ podpor, způsob vyplnění objemu modelu, měřítko tisku a orientace modelu v pracovním prostoru.

**Výhody:** Výroba funkčních prototypů, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. Při výrobě vzniká minimální odpad, pouze materiál podpor.

**Nevýhody:** Omezená přesnost daná tvarem materiálu a průměrem výstupní trysky. Proces výroby nelze urychlit z důvodu principu metody a vlastností materiálu. Stavba podpůrné konstrukce při tisknutí modelu. [14]

## 4.5 Inkjet: Binder Jetting

Inkoustové tiskové hlavy tryskají tekuté pojivo na tenkou vrstvu prášku. Lepením jednotlivých částic dohromady, je vytvořen finální výrobek. [16] Stejně jako je tomu u jiných systémů s práškovou platformou. Jakmile je vrstva dokončena, stavěcí platforma (powder bed) postupně klesá a váleček urovnává prášek nad plochou stavěcí platformy před dalším průchodem inkoustové tiskové hlavy s tekutým pojivem pro další vrstvy, které mají být vytvořeny a smíseny s předchozími vrstvami.[1]



Obrázek 6: Binder Jetting technologie. Převzato a upraveno z [1]

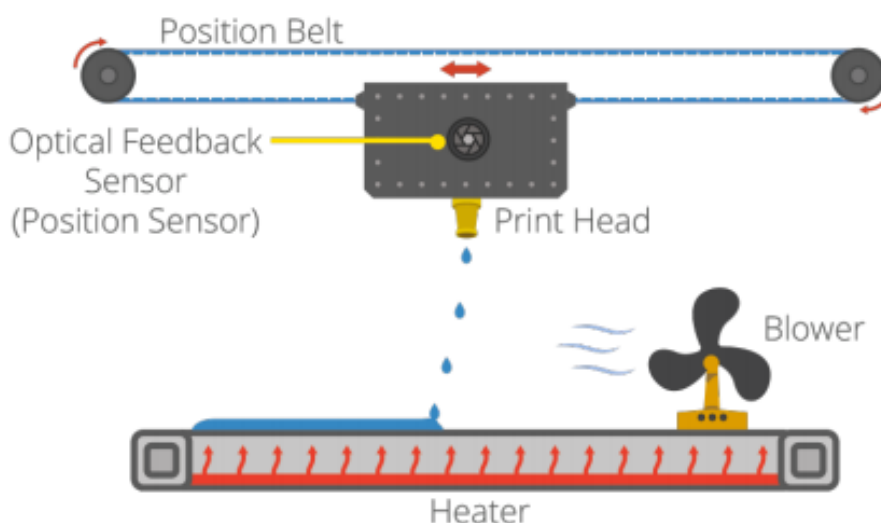
**Výhodou** tohoto procesu je stejně jako u SLS technologie, že není třeba podporných struktur, jelikož sám o sobě prášek plní tuto funkci. Nespornou výhodou je rozmanitost materiálů, které mohou být použity pro tuto technologii, včetně keramiky a potravin. Další výraznou výhodou tohoto způsobu je možnost snadno přidat velké množství barev, které mohou být přidány do zásobníku. 3D tiskárny neprodukují žádný zápach nebo další rušivé vlivy a zároveň mají malé rozměry, tudíž se dají použít přímo v projekční kanceláři.

**Nevýhoda:** Díly vytvořené touto technologií, nejsou však tak pevné jako u slinovacího procesu a vyžadují následné zpracování pro zvýšení životnosti. [1, 15]

## 4.6 Inkjet: Material Jetting

Během tohoto 3D procesu je materiál tisku (v tekutém nebo roztaveném stavu) tryskán ze speciální násobné tiskové hlavy (zároveň s dalšími materiály, které jsou tryskány jako podpůrné materiály). Především se využívají kapalné fotopolymery, které jsou následně vytvrzeny pomocí působení UV světla po vytvoření každé vrstvy. Povaha tohoto produktu umožňuje současné nanášení z různých druhů materiálů, což znamená, že jedna část může být vyrobena z více materiálů s různými vlastnostmi. Inkjet Material Jetting je velmi přesný způsob 3D tisku výroby přesných dílů s velmi hladkým povrchem. [1]

Množství nanášeného materiálu je pro každou trysku samostatně řízeno programem. Součást se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy. Je-li součást širší než pracovní hlava, posouvá se ve směru osy tak, aby se vytvořila celá součást. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě. [10]



Obrázek 7: Inkjet Material Jetting technologie. Převzato a upraveno z [1]

**Volba atributů tisku** – tloušťka vrstvy materiálu, podpory, měřítko a orientace součástí v pracovním prostoru.

**Výhody:** Jednoduché řešení, ekonomická výroba modelů, výhodná metoda z časového hlediska.

**Nevýhody:** Výroba menších součástí, omezená volba materiálu, malá přesnost. [14]

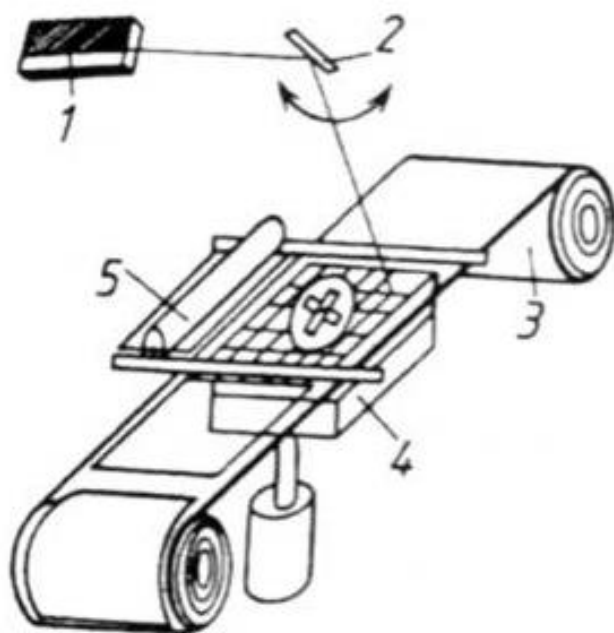
## 4.7 Laminated Object Manufacture

Polotovarem je nejčastěji papír z jedné strany potažený polyetylenem (polyetylen slouží jako pojivo při zažehlení), ale existují i varianty zpracovávající plastové nebo kovové folie. Tato folie je v každém kroku navinuta přes celý pracovní prostor, zažehlena válcem k už hotové části a poté je z ní laserem nebo nožem vyříznut obrys vrstvy. Zařízení je také vybaveno čidlem přítlačné síly a teplotou válce pro kontrolu podmínek výroby. [15]

Metoda vyžaduje stavbu podpor, které se po vyrobení součásti mechanicky odstraní. Součásti lze dokončit běžnými obráběcími metodami jako je vrtání, frézování a soustružení. Povrch součásti je nutné pokrýt silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, aby součást neztvrdla svoje rozměry vlivem vsakující se vlhkosti. [14]

Výrobní postup sestává z těchto kroků:

- nová část folie je odvinuta do pracovního prostoru,
- stůl se vysune nahoru, kde je připravený k postavení další vrstvy,
- folie je připojena k podkladu vyhřívaným válcem,
- laserový paprsek vyřízne obvod součásti,
- paprsek nařeže i okolní část polotovaru pro usnadnění odebrání odpadu,
- stůl s hotovou vrstvou se zasune dolů, zopakování celého postupu. [15]



- 1 – laser
- 2 – zrcadlo
- 3 – role, fólie
- 4 – nosná deska
- 5 – vyhřívané přítlačné válce

Obrázek 8: Laminated Object Manufacture technologie.  
Převzato a upraveno z [10]

**Volba atributů tisku** – měřítko tisku a orientace modelu v pracovním prostoru.

**Výhody:** Mezi největší výhody této technologie patří schopnost vyrábět i velké součásti a možnost zpracovat různé druhy materiálu jako je například papír, různé polymery nebo kovy. Další předností je rychlost výroby daná tím, že laser pouze vyřezává obrys a celá vrstva je zažhlena najednou zažehlovacím válcem. Metoda je vhodná na výrobu velkých součástí. Ekologický proces.

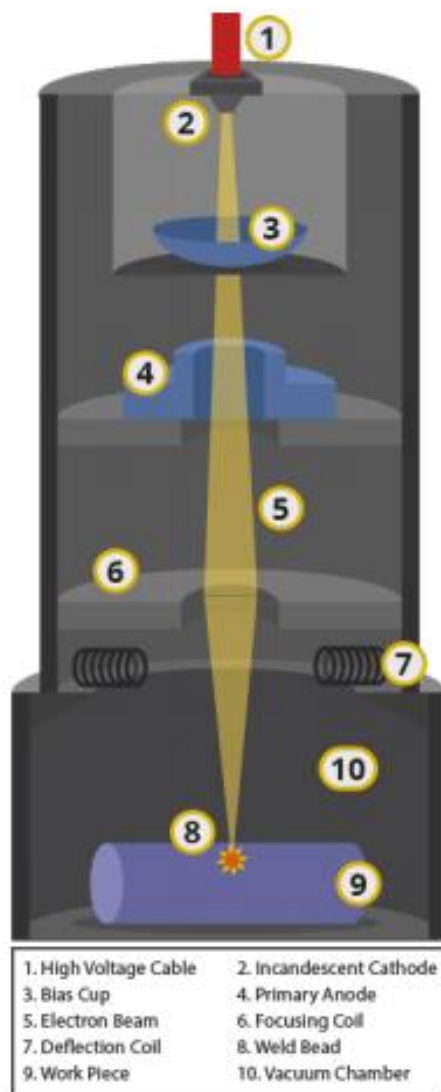
**Nevýhody:** Problémem se můžou stát podpůrné konstrukce, které u této metody vznikají z oříznutých částí folie. Konstrukci je třeba upravit tak, aby bylo možné z dutin tyto nařezané části vyjmout. K dosažení hladkého povrchu je nutné součást opracovat ručně. Její nevýhodou je velké množství odpadu. [10, 14, 15]



## 4.8 The Electron Beam Melting (EBM)

Metoda tisku EBM je v zásadě podobná technologii Direct Metal Laser Sintering (DMLS), avšak zásadní rozdíl je ve zdroji spékání materiálu. Zde, jak již název napovídá, se užívá elektronový paprsek, který vyžaduje provádět proces tisku bez přístupu vzduchu. EBM proces má schopnost vytvářet pevné díly z různých kovových slitin, a to i pro lékařství, a v důsledku toho EBM technika byla zvláště úspěšná pro řadu výrobních aplikací v lékařském průmyslu, zvláště pro implantáty. Nicméně, jiná hi-tech odvětví, jako například letecký a automobilový průmysl mají také pro tuto technologii využití.

EBM metoda je bezpečná a ekologicky šetrná, ale není schopná konkurovat ostatním metodám 3D tisku z hlediska složitosti geometrických tvarů a je omezena velikost vytisknutého modelu v závislosti na velikosti výchozí suroviny. [1]



Obrázek 9: EBM technologie. Převzato a upraveno z [1]

## 5 O společnosti MakerBot Industries

Společnost MakerBot Industries sídlí v Brooklynu v New Yorku. Byla založena v lednu 2009 Bre Pettisem, Adamem Mayerem a Zachem Smithem. Společnost vyrábí a prodává 3D tiskárny. Společnost byla založena na základě úspěšného projektu RepRap. Produkty společnosti MakerBot jsou navrženy tak, aby si je mohl složit a obsluhovat každý, aniž by měl technické znalosti. Společnost nabízí několik typů tiskáren Replicator a také scanner Digitizer. [17]

V hledáčku předních dodavatelů CAD softwaru i dalších technologických lídrů je na prvním místě MkerBot. Například firma Autodesk má s MakerBot Industries uzavřené partnerství a nabízí velké množství variant kombinující tuto 3D tiskárnu s jejími aplikacemi pro 3D modelování. Konkurenční SolidWorks aktuálně pod vlivem „nové průmyslové revoluce“ připravuje přímou podporu 3D tisku ze svého CAD softwaru a značka MakerBot byla několikrát prezentována na letošní konferenci SolidWorks World 2014 v Kalifornii. Za všechny další stojí zmínit Microsoft, který zvolil MakerBot jako jediné 3D tiskárny, které nabízí ve svých obchodech, a také ve svém e-shopu, jako nejlepší volbu pro uživatele Windows.

Odbyt těchto 3D tiskáren roste velmi strmým tempem. Zatímco od uvedení prvního modelu na trh v roce 2009 do června loňského roku bylo prodáno dvaadvacet tisíc zařízení s logem MakerBot, během dalšího pololetí se počet prodaných 3D tiskáren MakerBot zdvojnásobil a zanedlouho dosáhne mety padesáti tisíc. To činí z MakerBotu jednoznačně nejprodávanější značku komerčních 3D tiskáren ve světě, pomine-li se nezávislá opensource platforma RepRap, její úsilí však míří trochu jiným směrem.

3D tisk je totiž především výrobní technologie a jako taková vyžaduje odpovídající technickou podporu. 3D tiskárny jsou výrobní zařízení, jež vyžadují pravidelný servis a kvalifikovanou údržbu. Proto je možné si připlatit za rozšířenou podporu, jež nabídne servisní zásahy a technickou podporu nad rámec zákonné záruky.

Tato služba se určitě vyplatí každému, kdo chce 3D tiskárnu využívat opravdu produktivně a využívat naplno jejího potenciálu. Vedle toho firma MCAE Systems připravuje semináře a školení, na kterých zájemce o 3D tisk seznámí s tím, jak z těchto technologií vytěžit maximum. [18]

## 6 Technologie 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X

### 6.1 Materiály pro 3D tisk

Na marketingovém trhu je mnoho výrobců a distributorů materiálů pro 3D tiskárny, avšak každý producent uplatňuje svoji výrobní metodu (složení struny, kvalita surovin atd.). Tedy kvalita tisku se může diametrálně lišit při totožném nastavení parametrů tisku (např. hledání vhodné teploty pro tisk, trhání struny, špatná návaznost mezi jednotlivými vrstvami). Pro nejjednodušší a bezproblémový tisk je nejvhodnější pořídit originální filament pro danou tiskárnu.

Pokud se uživatel chce vyhnout zbytečným komplikacím při 3D tisku, ale i přesto chce zvolit alternativního výrobce filamentu z důvodu např. výhodnější ceny, specifických vlastností, doporučuji přečíst recenze na jednotlivé výrobce, kterou jsou k dispozici na webových fórech o 3D tisku. Při pořízení struny od alternativního výrobce je třeba při nastavování 3D tiskárny vycházet z informací od výrobce filamentu a ne 3D tiskárny právě z rozdílné technologie výroby struny.

MakerBot Replicator 2X je projektovaná na technologii tisku FDM. Ve FDM technologii se využívají různé typy materiálu, tato tiskárna pracuje s plasty. Především se jedná o ABS, HIPS. Po určitých úpravách, které 3D tiskárna vyžaduje, je možné vytvářet modely z PLA.

Nemohou být opomenuti významní distributoři filamentu, od kterých je možné zakoupit filament na českém trhu a použít jej na 3D tiskárně MakerBot Replicator 2X:

- MakerBot [USA],
- 3D Systems [USA],
- Prusa [CZE],
- Fillamentum [CZ],
- Flexfill [CZE],
- Technaxx [DEU],
- be3D [CZE],
- Stratasys [USA],
- Plasty Mládeč [CZE],
- Verbatim [JPN],
- Pro3D [DEU],
- XYZprinting [USA],
- CreoPop [SNG],
- 3D Factories [DEU].

### 6.1.1 ABS (Akrylonitril Butadien Styrene)

ABS materiál je vyrobený z ropy a má mnoho využití, například stavebnice Lego ho využívá již dlouho dobu. Výpary při tisknutí na 3D tiskárně z ABS jsou považovány za nebezpečné pro zdraví, proto je důležité, aby prostor byl při dlouhodobější tisku větratelný, avšak nesmí dojít k ovlivnění teploty během tisku (deformace materiálu vlivem chlazení). Teplota tavení je v rozmezí 210 – 260 °C. Výhoda ABS materiálu oproti PLA je, že modely z ABS jsou mnohem pevnější (odolnější), méně křehké a odolávají vyšším teplotám. [19]

Má dobrou tepelnou odolnost a je relativně levný. Jedná se o velmi stálý plast s vysokou pevností. ABS je schopný odolávat teplotám až do 100 °C bez velkých ztrát na pevnosti. Velká nevýhoda je však jeho tepelná roztažnost. To při tisku způsobuje deformaci objektů, a vyžaduje proto vyhřívanou podložku. I tak se však nedají vždy spolehlivě tisknout objekty větší než 15 cm. [21]

**Tabulka 1: Materiál ABS**

<b>Řada</b>	<b>Vlastnosti</b>
True	Řada obsahuje běžné barvy.
Translucent	Transluscentní varianta zahrnuje zvláštní barvu - natural.
Limited	V limitované edici ABS filamentu se nachází pouze jediná barva – růžová struna.

Výsledný povrch ABS modelu se nechá upravit pomocí běžných dokončovacích dílenských operací (broušení, pilování atd.), avšak aplikace acetonu je mnohem jednodušší a rychlejší. Aceton rozpouští (naleptává) povrch a výsledné vrstvy se spojí v jednu. Vizually dojde k vyhlazení povrchu a povrch dostane zajímavější vzhled (využití pro estetické modely). Některé úpravy povrchu výsledného objektu budou uvedeny a popsány dále v diplomové práci.

### 6.1.2 HIPS (High Impact Polystyrene)

Zvláštností tiskárny MakerBot Replicator 2X je schopnost použití speciálního filamentu, který je určený pro stavbu podpor a výplně modelu, který se nechá následně rozpustit pomocí roztoku limolenu (lemonesolu) po dobu několika hodin.

Využitelnost pro stavbu podpor z materiálu HIPS je pouze u tiskáren, které mají duální extrudér. Jedna vytlačovací hlava tiskne z materiálu např. ABS samostatný model, druhý extrudér tiskne podpory právě z materiálu HIPS. Jelikož se jedná o materiál s podobnými vlastnostmi jako materiál ABS, není potřeba zvláštního nastavení pro 3D tisk, i když se jedná o jiný materiál.

Filament HIPS je o něco dražší, než materiál ABS, avšak při odstraňování podpor vytvořených z ABS materiálu zůstávají bílé stopy a otřepy, které mohou být nežádoucí vzhledem na povrchu modelu (odstranění nedostatků dalšími povrchovými úpravami). Nehledě na to, že u slabších dílců může dojít k poškození modelu a u složitějších tvarů se ani k podporám následně dostat nelze.

### 6.1.3 PLA (Polylactic Acid)

PLA je vyrobený ze škrobu a z tohoto důvodu je ekologicky šetrný a biologicky rozložitelný. Pro kvalitní 3D tisk je potřeba nastavit rozmezí teplot na 180 – 230 °C. Oproti výparům z materiálu ABS je PLA zdraví neškodný a není tak potřeba nucené větrání místnosti při delším tisknutí.

Pro PLA materiál není třeba vyhřívaná podložka, PLA k podložce přilne při pokojové teplotě, na podložce musí být pouze očištěná „blue tape“. Je dokonce nežádoucí, aby podložka byla vyhřívaná na vysoké teploty jako ABS, jelikož model si udrží tuhou konzistenci, jestliže se teplota nalézá pod 60 °C. Modely vytvořené z PLA jsou mnohem křehčí než materiál ABS a nemůže být používán tam, kde je třeba vyšší odolnosti vůči teplotám. Prakticky jako jediný se dá použít k tisku velkých objektů přes 20 cm. [19, 21] Nutností pro tisk z PLA na tiskárně MakerBot Replicator nainstalovat ventilátor směřovaný na tištěný výrobek – z důvodu zachování tvaru objektu.

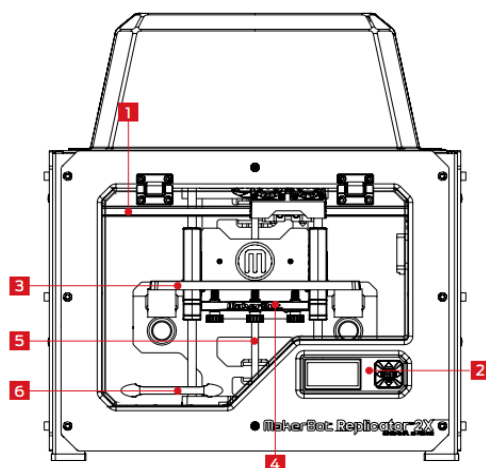
Tabulka 2: Materiál PLA

Řada	Vlastnosti
True	Řada obsahuje běžné barvy a bez zvláštních vlastností.
Translucent	Při využití řady těchto barev model získává vizuální podobu „průhledného povrchu“.
Limited	Limitovaná série obsahuje speciální odstíny barev (např. khaki), PLA měnící svojí barvu pod UV světlem, nebo luminiscenční varianty

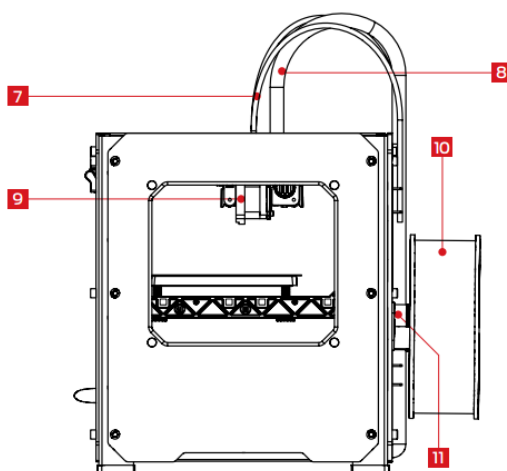
## 6.2 Konstrukce 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X

Firma MakerBot Industries vyrábí tiskárny mnoha rozličných druhů a případného využití, avšak jedno mají společné. Jedná se o tiskárny, kterou jsou založeny na principu Fused Deposition Modelling (FDM). Tato metoda tisku byla již v této diplomové práci analyzovaná, a tak se nemá cenu vracet k principu technologie FDM. V této kapitole budou podrobněji popsány jednotlivé HW části tiskárny MakerBot Replicator 2X, z nichž je složená:

1. nosná (portálová) konstrukce,
2. LCD panel,
3. vyhřívaná stavěcí podložka,
4. stavěcí platforma,
5. závitová tyč osy Z,
6. držadlo plastových dveří,
7. vodící trubička pro ABS, PLA vlákno,
8. přívodní elektrický vodič pro duální vytlačovací hlavu,
9. dvojice vytlačovacích hlav (extrudéry),
10. cívka s ABS nebo PLA vláknem,
11. držák cívky vlákna.

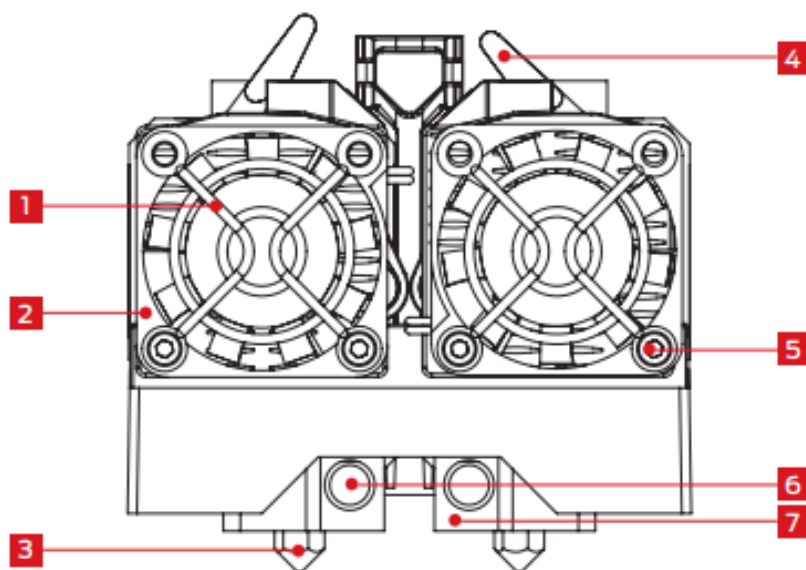


Obrázek 10: Čelní pohled MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20]

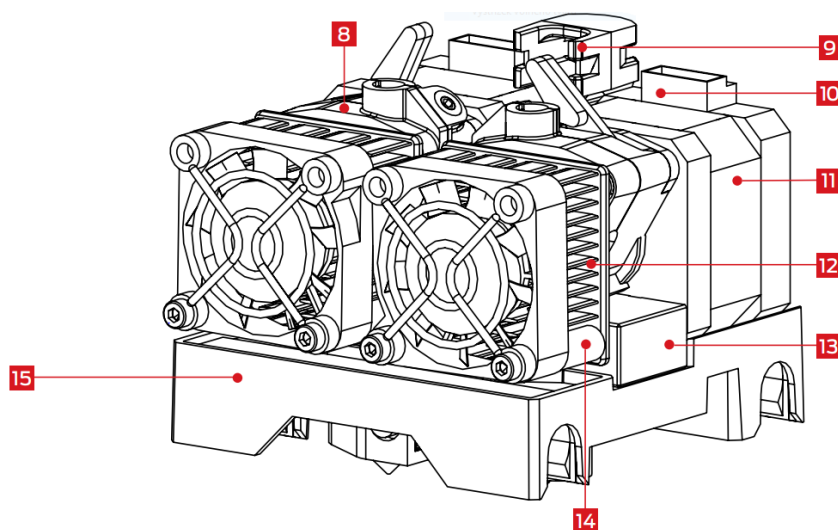


Obrázek 11: Boční pohled MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20]

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1. mřížka chladicího ventilátoru | 9. osazení pro elektrický vodič<br>duálního extrudéru |
| 2. chladicí ventilátor extrudéru | 10. konektor pro připojení motorů                     |
| 3. tryska duálního extrudéru     | 11. motor extrudéru                                   |
| 4. ovládací páka                 | 12. chladicí žebra                                    |
| 5. šroub chladicího ventilátoru  | 13. podstavec   |
| 6. topné jádro                   | 14. mezerník  |
| 7. vyhřívaná hliníková kazeta    | 15. vozík extrudéru                                   |



Obrázek 12: Čelní pohled na extruder. Převzato a upraveno z [20]



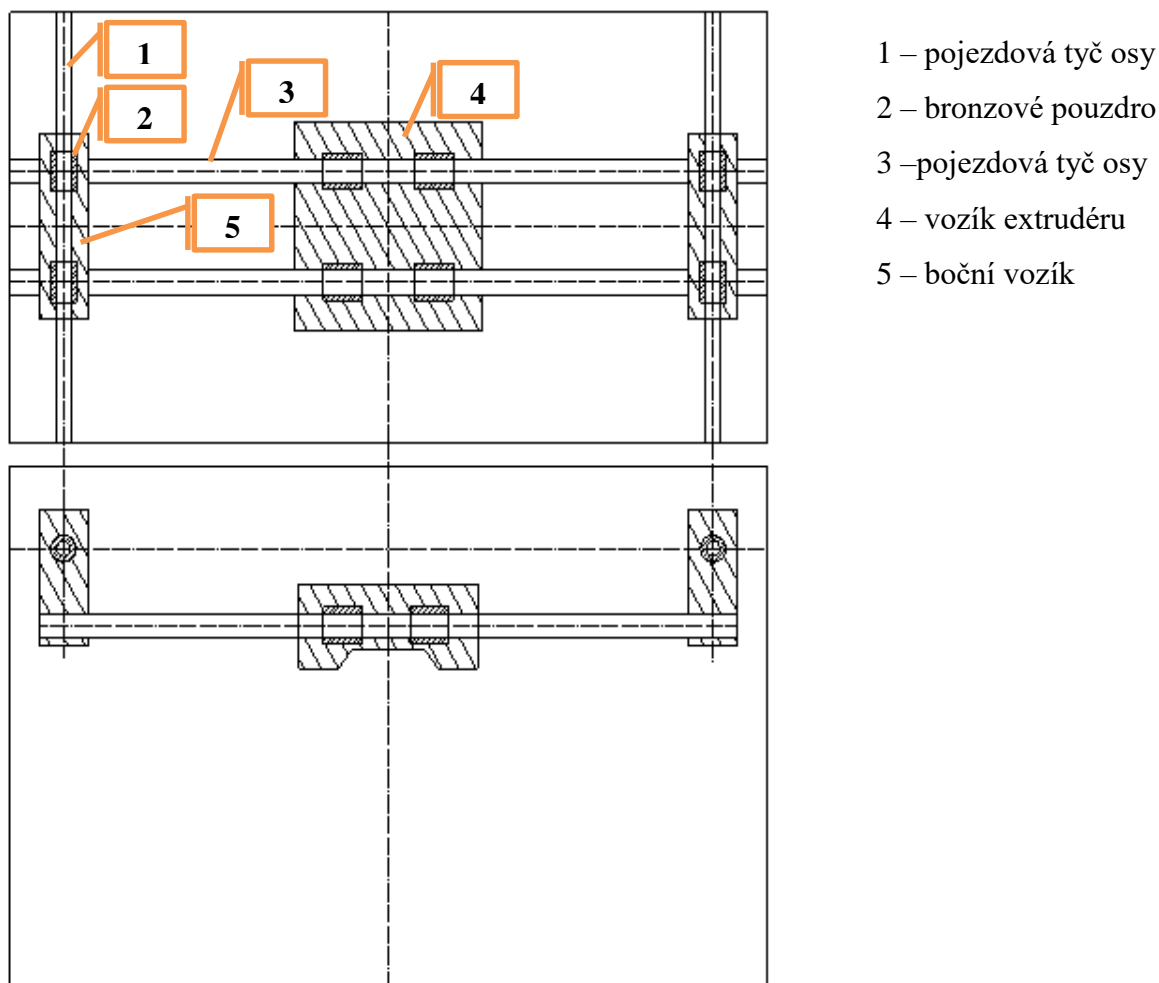
Obrázek 13: Pravoúhlý pohled na extruder. Převzato a upraveno z [20]

### 6.2.1 Portálová konstrukce

Nosná konstrukce je tvořena dvojicí příčných hliníkových kulatých profilů, které jsou upevněny v přední a zadní stěně 3D tiskárny. Po příčných profilech se posouvá extrudér ve směru osy Y pomocí krokového motoru, který je umístěný na pravé zadní straně Replicatoru 2X a přes dvojici řemenových převodů je pohyb přenášen dle potřeby tisku. Na levé straně se nachází pomocný řemenový převod pro usnadnění pohybu (osa Y).

Na příčných profilech jsou v bronzových pouzdrech zavěšeny plastové rámy, které nesou podélné hliníkové profily. Na podélných vodících kolejnicích je uložený vozík extrudéru (v bronzových pouzdrech) a na něm je umístěna dvojice extrudéru s příslušenstvím. Na pravé straně rámu je umístěný motor, který pomocí řemenového převodu přemísťuje extrudér ve směru osy X.

Význam této konstrukce spočívá v uložení duálního extrudéru a extrudér se pomocí konstrukce pohybuje v prostoru souřadnic os X – Y nad stavěcí plošinou. Dle předpisu výrobce se musí hliníkové profily mazat vhodným mazacím tukem a udržovat v čistotě právě z důvodu pohybu extrudéru po těchto nosnících.



Obrázek 14: Nákres portálové konstrukce 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X



## 6.2.2 Duální extrudér (duální vytlačovací hlava)

3D tiskárna Replicator 2X od firmy MakerBot se právě odlišuje od většiny jejich modelů tím, že umožňuje tisknutí z duální vytlačovací hlavy, tzv. duálního extrudéru. Duální extrudér oproti jednoduché vytlačovací hlavě dovoluje dvoubarevný tisk bez nutnosti výměny materiálu (filamentu) během tisku a tím dochází ke zjednodušení procesu a k urychlení tvorby výtisku oproti 3D tiskárnám s jednoduchou vytlačovací hlavou.

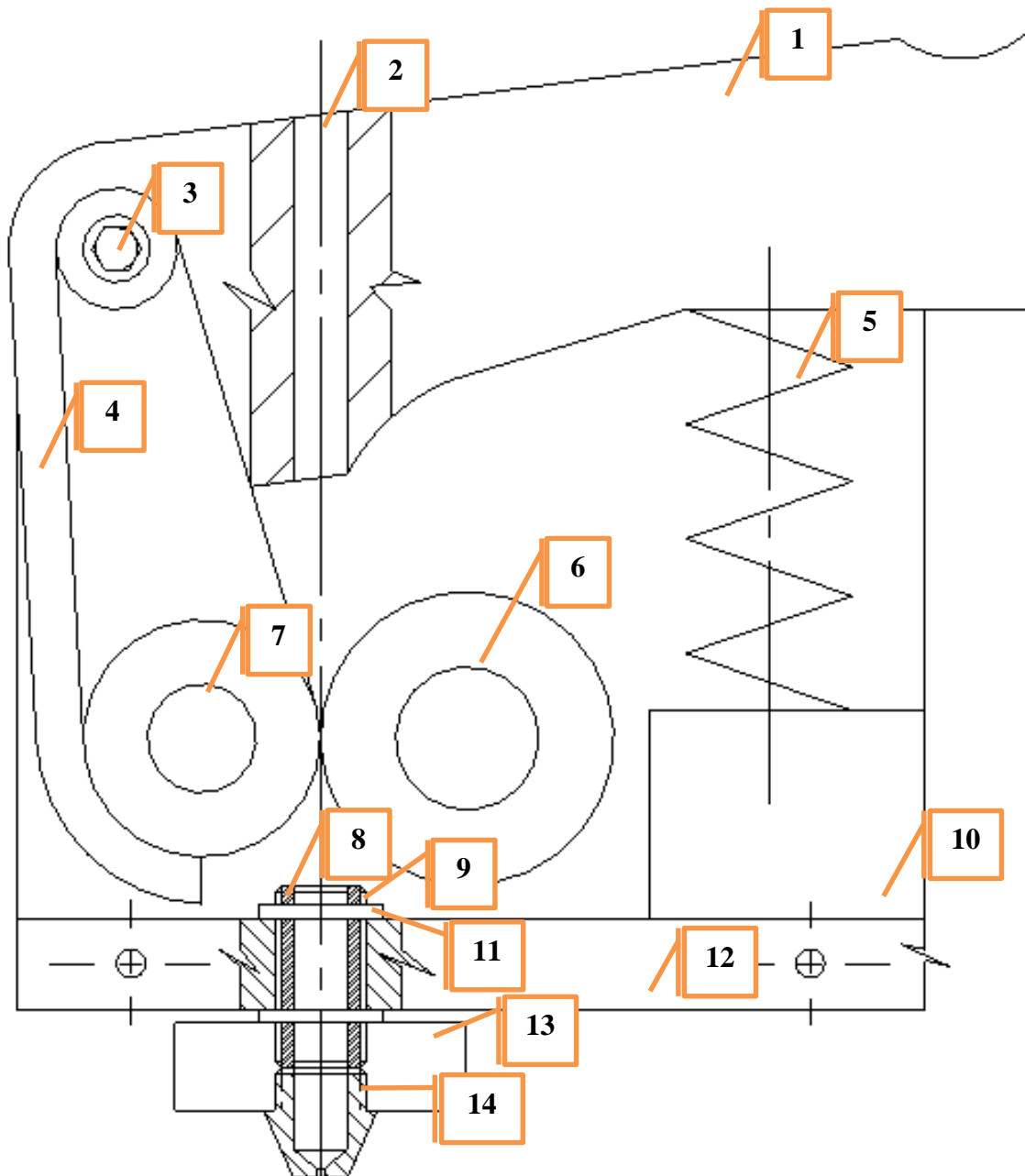
Extrudér lze charakterizovat jako uskupení jednotlivých součástí tvořící prvek (extrudér), umožňující tisk modelu. Vytlačovací hlavu lze zjednodušeně rozdělit na podávací a tavící vytlačovací část. Extrudér se sestává z krokového motoru, který je pohonnou jednotkou pro podávací mechanismus filamentu. Tento mechanismus je tvořen dvojicí kol, z nichž jedno rýhované kolo a je poháněno právě krokovým motorem. Druhé kolo (přítlačné) zvyšuje adhezi filamentu k rýhovanému kolu. Mezi dvojicí kol je přiváděno vlákno ABS nebo PLA plastu, které je dále natavováno (vysokou) zvolenou teplotou a měkký materiál je protlačován přes trysku o průměru 0,4 mm. Vytlačovací hlava je doplněná o chladicí žebrování a chladicí ventilátor.

Při ideálních podmínkách by se neměly zahřívat ostatní součásti extrudéru, které to nevyžadují, ale dochází k přestupu tepla i na jiné součásti. Pro tento případ bývá filament izolován „tepelně izolační páskou“ v místech, kde je potřeba omezit toho nahřívání materiálu (firma MakerBot nepoužívá tepelně izolační pásku). V některých případech by mohlo dojít k trhání materiálu způsobeného právě nevhodným nahříváním materiálu. Právě i z těchto důvodů je extrudér vybavený již zmíněným ventilátorem i chladícími žebry.

Části tisknoucí hlavy jsou vyrobeny převážně z plastu a kovů. Plast je využíván tam, kde nedochází k nahřívání filamentu, anebo nehrozí riziko mechanického opotřebení materiálu, tj. ventilátor, podávací jednotka struny (mimo podávacího mechanismu kol) a ovládací páka k uvolnění případně vložení filamentu do extrudéru. Z kovů je především využíván hliník a mosaz, jelikož se jedná o lehké a snadno dostupné kovy s vynikající tepelnou vodivostí a mnoha dalšími dobrými a stálými vlastnostmi.

Materiál je natavován a ohříván pomocí rezistoru. Je to jednoduchou součástka, která umožňuje vytvářet dostatečné teplo s minimálním odporem. Teplota extrudéru je sledována pomocí termistoru, odpor je vyhodnocený elektronikou 3D tiskárny a teplota extrudéru je regulovaná dle potřeby.

Technické zpracování (kvalita) extrudéru a nastavení jeho jednotlivých parametrů nejvíce ovlivňuje kvalitu 3D tisku.



Obrázek 15: Nákres zjednodušeného extruderu MakerBot Desktop 2X

- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1 – ovládací páka                        | 8 – tepelně izolační páska      |
| 2 – vstup struny do extrudéru            | 9 – trubička se závitem         |
| 3 – šroub vymezující přítlak na filament | 10 – základna extrudéru         |
| 4 – rameno páky                          | 11 – matice                     |
| 5 – pružina                              | 12 – podstavec                  |
| 6 – hnané podávací kolo                  | 13 – vyhřívaná hliníková kazeta |
| 7 – přítlačné podávací kolo              | 14 – tryska                     |

### 6.2.3 Vyhřívání stavěcí platforma

V dnešní době jsou vyhřívání podložky již standardem, ale donedávna tomu tak nebylo, proto docházelo k určitým obtížím při tisku. V Replicatoru 2X je zasazena hliníková vyhřívání podložka umožňující nastavit teplotu až do 130 °C. Teplotní rozsah je plně dostačující pro tisk z materiálu ABS, PLA.

Softwarově lze měnit teplotu podložky po 1 °C, což umožňuje uspokojivou regulaci dle potřeby uživatele a aktuálních podmínek tisku. Vyhřívání podložka je vyráběna z kovu – hliníku. Hliník je vynikající materiál dobrou s tepelnou vodivostí, odolností vůči rozměrovým a objemovým deformacím vlivem různého střídání teplot. Avšak výhodná je i cena materiálu.

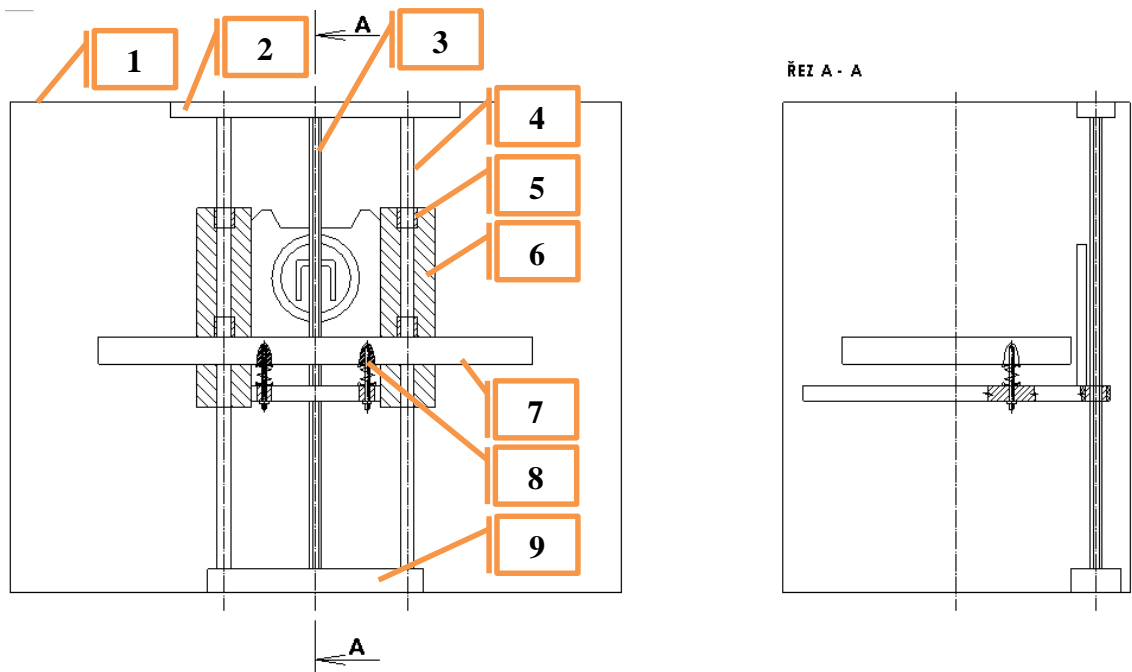
Vyhřívání stavěcí podložka plní celkem tři funkce:

- výchozí prostor a místo, kde se model vytváří,
- vyhřívání stavěcí podložky zvyšuje přilnavost tisknutého modelu a tím zlepšuje kvalitu tisku,
- dále vyhřívání podložky snižuje tepelné deformace materiálu, který tuhne jako finální model na 3D tiskárně.

Teplu je podložce dodáváno pomocí rezistoru, který ohřívá celou podložku na požadovanou teplotu. Termistorem je teplota sledovaná a regulovaná dle elektroniky tiskárny a uživatele. Principiálně se jedná o stejné řešení jako vyhřívání a řízení teploty extrudéru.

Pro kvalitní a bezproblémový tisk musí být seřizena mezera mezi extrudérem a vyhřívání podložkou. Vyhřívání podložka musí být čistá, zbavená zbytků z předešlého tisknutí a především řádně odmaštěná.

Vyhřívání podložka se následně upravuje pomocí různých metod, aby se docílilo co nejvyšší možné přilnavosti tisknutého materiálu k podložce (kaptonová páska, lepidlo, aceton atd.) MakerBot doplnil hliníkovou platformu speciální vrstvou plastu BuildTak, která umožňuje lepší adhezi objektu na vyhřívání podložku i bez předchozím vyjmenovaných možností. Plast BuildTak není součástí běžně dodávaných 3D tiskáren, ale je možné si ho v e-shopech objednat a uživatel může svoji platformu sám o tuto možnost doplnit.

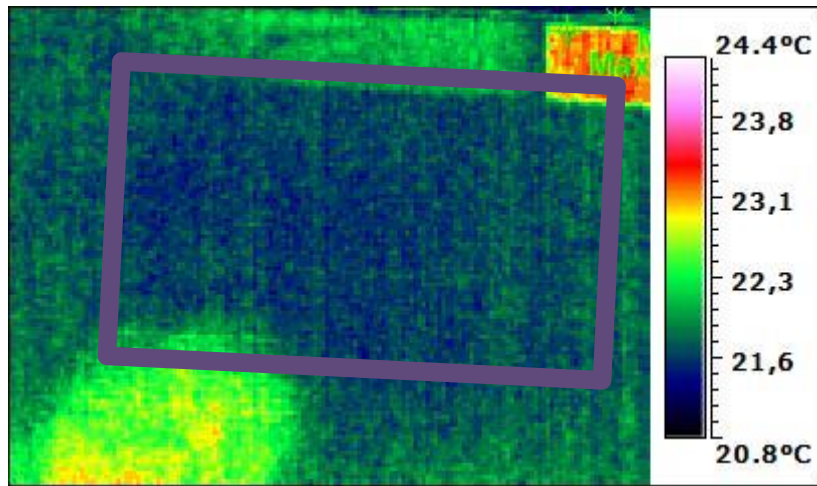


Obrázek 16: Nákres nosného rámu 3D tiskárny s vyhřívanou stavěcí platformou

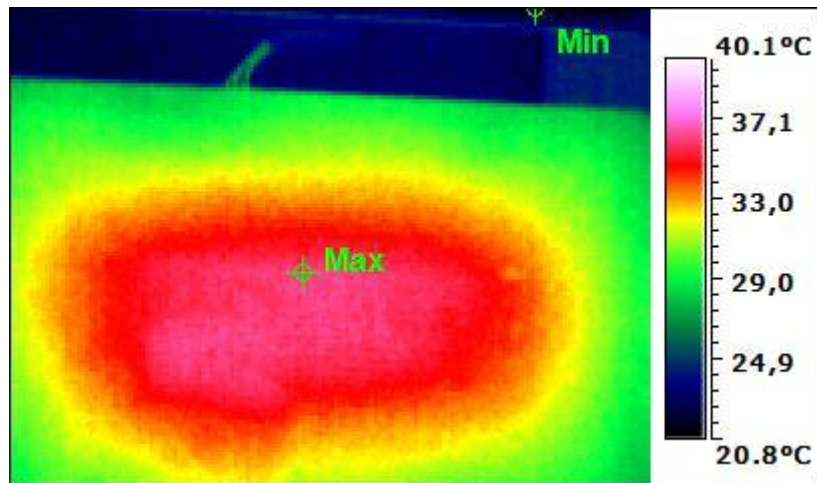
Pro jednoduchost jsou zobrazeny pouze důležité části tiskárny týkající se kapitol Vyhřívaná stavěcí podložka a Stavěcí platforma s nosným rámem:

- 1 – hrana zadní strany 3D tiskárny,
- 2 – uchycení svislé konstrukce na vrchní straně tiskárny,
- 3 – závitová tyč Z,
- 4 – pojezdová tyč,
- 5 – bronzové pouzdro,
- 6 – nosný rám 3D tiskárny,
- 7 – vyhřívaná stavěcí podložka,
- 8 – šroub na seřízení podložky,
- 9 – uchycení svislé konstrukce na spodní straně tiskárny.

Pro zajímavost jsou uvedeny snímky z termokamery – GUIDE M8. Teplota okolního prostředí byla 22 °C. Ze snímků lze vyčíst, že teplota se nejdříve zvyšuje ze středu do krajů. Tudíž lze předpokládat, že termistor je umístěn v centrální pozici platformy. Po dosažení na požadovanou teplotu (v tomto případě 120 °C) je rozložení teploty je rovnoměrné – teplota ve středu je totožná jako na okrajích, a tak není potřeba přemýšlet, kam model umístit před tiskem. Výrazné objekty v pravém horním rohu a levém dolním rohu jsou krokové motory. Fialový obdélník vyznačuje na snímku vyhřívanou stavěcí platformu.



Obrázek 17: Snímek chladně vyhřívané stavěcí platformy



Obrázek 18: Snímek s měnící se teplotou vyhřívané stavěcí platformy



Obrázek 19: Snímek ohřáté plošiny na 120° C

#### 6.2.4 Nosný rám

Společně s vyhřívanou stavěcí podložkou tvoří základ pro tvorbu modelu. Na nosném rámu je umístěna vyhřívaná podložka. Nosný rám s vyhřívanou podložkou se v prostoru pohybuje ve směru osy Z pomocí závitu a krokového motoru, který reguluje pohyb dle požadavků 3D tiskárny. Pro lepší stabilitu je stavěcí platforma s nosným rámem zasazena do dvojice plastových pojezdových tyčí, po kterých se sune pomocí bronzových pouzder.

Důležitou konstrukční podmínkou stavěcí platformy a rámu je, aby byla zabezpečena dostatečná tuhost během tisku. Je logické, pokud by tuhost konstrukce nebyla zajištěna, kvalita tisku by byla silně ovlivněna vibracemi a otřesy.

Před prvním tiskem je nutné seřídit vzdálenost mezi extrudérem a vyhřívanou podložkou umístěnou na stavěcí platformě pomocí dle návodu firmy MakerBot. Seřízení se provádí pomocí trojice šroubů umístěných na spodní straně stavěcí platformy.

#### *Závitová tyč osy Z*

V 3D tiskárně MakerBot Replicator 2X se užívá trapézový závit, který je uložený ve spodním a vrchním krytu 3D tiskárny. Účelem závitu je usnadnit a umožnit pohyb stavěcí platformy s vyhřívanou podložkou ve směru osy Z. Ve stavěcí platformě je uložena kovová matice, která se sune po závitové tyči. Trapézový závit je pootáčený krokovým motorem. Elektromotor je umístěný ze spodní strany spodního krytu.

### 6.2.5 Cívka s ABS, PLA vláknem a držák cívky vlákna

Na začátek musím říci, že tiskárna MakerBot Replicator 2X je schopná pracovat s materiálem ABS nebo PLA. Každý z těchto materiálů má jiné charakteristické vlastnosti a hodí se účelně pro jiné použití. Materiál od firmy MakerBot vstupující do tiskárny je navinutý na cívce o hmotnosti 1 kg a průměru 1,75 mm.

Důležité je, aby materiál měl stejný jmenovitý průměr a odchylka materiálu od průměru byla minimální. Jelikož stálost průměru je důležitá pro výpočet parametrů při 3D tisku (čas tisku, množství použitého materiálu a především kvalita tisku). I složení materiálu má velký vliv na průběh tisku (nastavení teploty extrudéru a vyhřívání podložky) Pro neoriginální filament při nastavení nevhodných teplot může docházet k přetavování materiálů a např. ucpání extrudéru, zhoršení kvality modelu. Osobně vidím originální vlákno jako nejhodnější volbu. Firma MakerBot pro bezproblémový tisk doporučuje teplotní rozsah přímo pro 3D tiskárnu MakerBot Replicator 2X. Tisk probíhá bez zdlouhavého a obtížného nastavování jako s neoriginálním filamentem.

Filament se postupně odvíjí a vodící trubičkou je směřovaný do extrudéru. Důležité je, aby se vlákno odvíjelo spodem a ne vrchem – problémy s odvíjením vlákna.

Cívka s materiálem je nasazená v držáku cívky. Držák je upnutý v zadní straně tiskárny MakerBot, kde je zavěšený na vyztužené části stěny. Pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X je k dispozici dvojice držáků (levý a pravý).



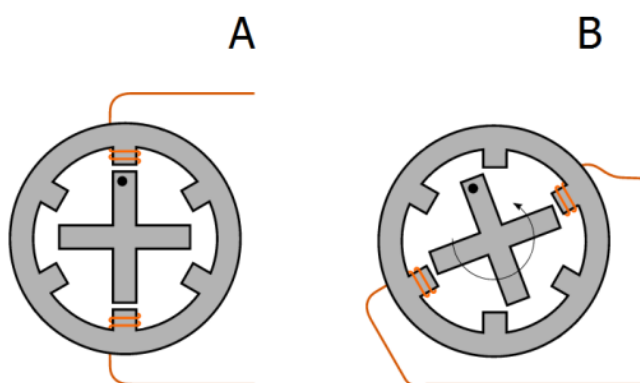
Obrázek 20: Zadní pohled na tiskárnu MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20]

## Krokové motory a řemenové převody

Krokové motory jsou v 3D tiskárně řízeny elektronikou, která je dle požadavků spíná nebo vypíná. Tiskárna MakerBot Replicator 2X obsahuje pětici motorů, které ovlivňují procesy v tiskárně. Tiskárna pracuje ve třech osách, které jsou na sebe vzájemně orientovány (osa X, Y, Z). V každé ose X, Y, Z je jeden krokový motor, který pomocí řemenového převodu uskutečňuje posuv v dané ose. Dvojice krokových motorů je uložena na vozíku extrudéru. Tyto krokové motory ovládají podávací části extrudérů. Dvojice motorů je uložena na vozíku extrudéru a každý z nich ovládá jedno podávací ústrojí extrudéru. Poslední krokový motor je umístěný pod spodním krytem dna a přes elektroniku ovládá závitovou tyč, která sune vyhřívanou podložku v ose Z.

### Zjednodušený princip krokového motoru

Krokové motory se řadí mezi synchronní točivé motory, jejich konstrukce je tedy podobná běžným synchronním motorům. Skládá se ze statoru, který je tvořený protilehlými cívkami, které jsou postupně zapínány a dochází k vytvoření magnetického pole, které interaguje s paramagnetickým rotorem a dochází k otáčení rotoru. [26] Tiskárna MakerBot Replicator 2X využívá motory, které mají úhel natočení  $1,8^\circ$ . [20]



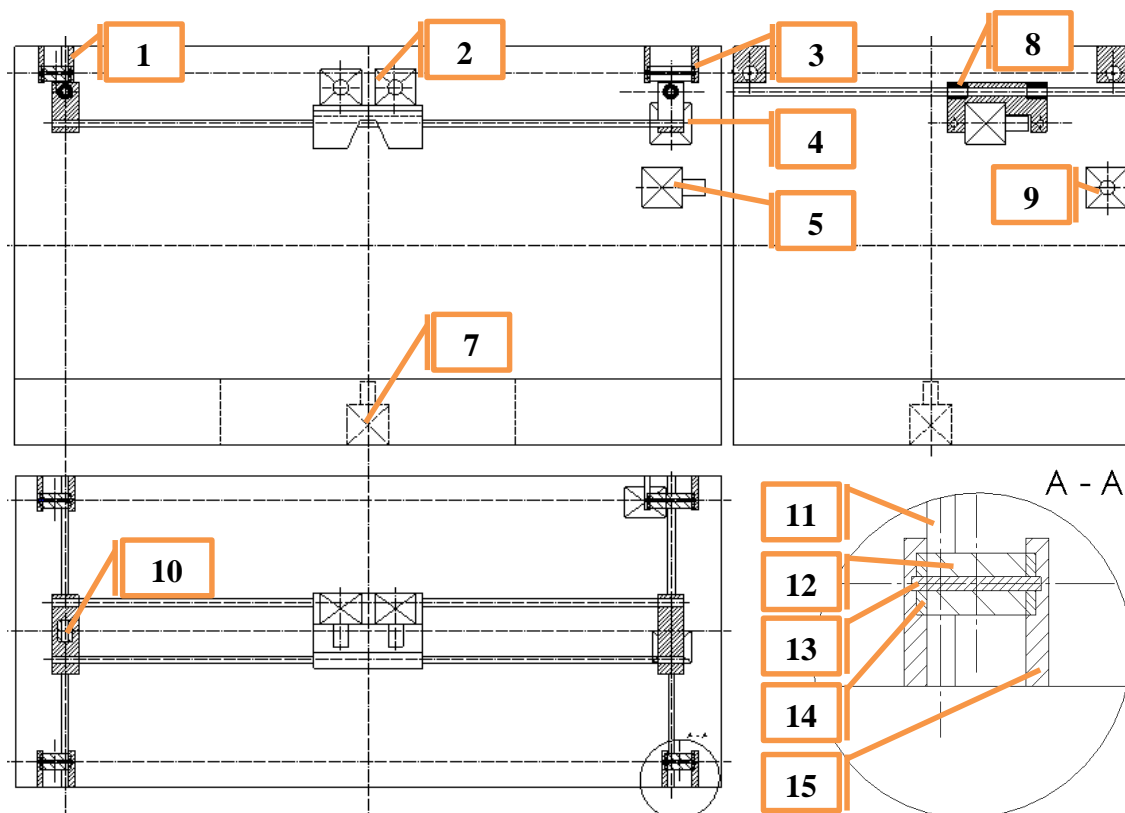
Obrázek 21: Zjednodušený princip krokového motoru. Převzato a upraveno z [26]

### Řemenové převody a krokové motory

V osách X, Y jsou řemenové převody, které napomáhají k přenosu otáčivého pohybu z krokového motoru na posuvný pohyb v rovině osy. Řemenový převod je tvořený dvojicí ozubených řemenic společně s ozubeným řemenem, vždy jedna z řemenic je hnaná přímo hřídelí krokového motoru nebo je poháněná dalším řemenovým převodem od elektromotoru. Výjimku tvoří řemenový převod v ose Y na levé horní straně 3D tiskárny, který je plně pouze pomocnou funkcí.



Pro lepší představu jsem nakreslil náčrt 3D tiskárny Replicator 2X, kde se uvedené krokové motory a řemenicemi.

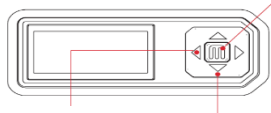


Obrázek 22: Náčrt 3D tiskárny se zaměřením na krokové motory a řemenice pohonu

- 1 – pomocná řemenice osy
- 2 – krokové motory podávací části extrudéru (v pohledech není extrudér zobrazen)
- 3 – hnaná řemenice osy
- 4 – motor osy
- 5 – elektromotor
- 6 – bronzové pouzdro
- 7 – krokový motor osy Z
- 8 – bronzové pouzdro
- 9 – krokový motor
- 10 – řemenice osy
- 11 – pojezdová tyč
- 12 – řemenice
- 13 – hřídelka
- 14 – ložisko
- 15 – uložení celé soustavy řemenice

## 6.2.7 LCD panel

Tiskárnu MakerBot Replicator 2X lze ovládat nejenom na PC, ale i na ní samotné, avšak kombinací obou možností uživatel dosáhne úspory času a kvalitních modelů.

 Svítí-li M červeně, znamená to, že 3D tiskárna pracuje, bliká-li M červeně, čeká na příkaz.  
Čtveřice tlačítek (šipek) obklopuje centrální tlačítko M. Pomocí šipek se prochází LCD menu a tlačítko M provádí výběr.  
Šipka doleva často umožňuje vrátit, nebo zrušit akci.

Obrázek 23: Zobrazení LCD panelu a ovládacích tlačítek. Převzato a upraveno z [20]

**Stavět z SD karty:** Chcete-li vytisknout soubor ve formátu .x3g z SD karty, stačí vybrat možnost *stavět z SD karty* a soubor, který má být vytištěný.

**Nástroje:** Menu *Nástroje* obsahuje ovládací prvky pro MakerBot Replicator 2X a skripty pro základní nastavení tiskárny.

- Režim *Monitor Mode* zobrazuje aktuální teplotu extrudérů a vyhřívané platformy.
- Nabídka *Change Filament* spustí skripty, které provedou navinutí a odvinutí vlákna do/z extrudérů.
- *Level Build Plate* slouží vytvoření patřičné mezery mezi extrudérem a vyhřívanou stavěcí podložkou.
- Vybráním *Home Axes* se přesune platforma a duální extrudér do výchozích polohy.
- *Jog Home* přesune dvojici extrudérů nebo platformu do poloh zvolenou uživatelem.
- *Run Startup Script* se spustí při prvním spuštění tiskárny, nebo při rozhodnutí uživatele. Proveďte se základní nastavení parametrů 3D tiskárny – vytvoření patřičné mezery mezi extrudérem a vyhřívanou stavěcí podložkou, navinutí vlákna do extrudéru a zkušební tisk.
- *Disable Steppers/Enable Steppers* ovládá zapínání, vypínání krokových motorů. Pokud uživatel potřebuje ručně posunout platformu, extrudéry, musí nejdříve vypnout krokové motory.
- *Blink LEDs/Stop Blinking* umožňuje zapnutí, přepnutí a vypnutí LED osvětlení.
- *Calibrate Nozzles* spustí skript, který 3D tiskárně umožní správně seřadit trysky extrudérů. Skript bude tisknout sérii linek s každou tryskou a bude požadovat, aby uživatel vybral, která z dvojice linek je lepší kvality.
- *Exit Menu* vrací uživatele zpět do hlavního menu. [20]

**Předehev:** Vyberte si, které části chcete předehevat (levý a pravý extrudér, vyhřívaná platforma), u součástí 3D tiskárny, které budou mít v řádku napsáno *ON*, budou předehevány. Možnost *OFF* znamená nepředehevat určité části tiskárny.

**Informace a nastavení:** Zobrazení informací o tiskárně a změna jejich nastavení.

- *Bot Statistics* zobrazuje celkový čas tiskání v hodinách a minutách po celou dobu životnosti MakerBot Replicator 2X. Také se zobrazuje doba trvání posledního dokončeného tisku.
  - Nabídka *General Settings* vede k menu na nižší úrovni pro změnu nastavení tiskárny.
    - Režim *Sound* zapíná, nebo vypíná zvuky, které vydává 3D tiskárna během tvorby modelu. Avšak nelze vypnout zvuk krokových motorů.
    - *LED Color* umožňuje změnit barvu LED osvětlení.
    - Položka *Accelerate* je ve výchozím nastavení zapnutá. Zrychlení umožňuje, aby Vaše MakerBot Replicator 2X aby fungovala plynuleji. Pokud uživatel nastaví *Accelerate* do polohy *OFF*, neměl by používat rychlost tisku vyšší než 45mm/s.
    - *Heat Hold* udržuje teplotu duálního extrudéru a vyhřívané podložky po navolenou dobu od 1 ÷ 30 minut po dokončení modelu.
    - Nabídka *Help Text* na display zobrazuje podrobnější informace (nápovědu), např. při navinutí a odvinutí vlákna do/z extrudérů.
    - Při aktivní položce *Heat LEDS* se LED barva změní z výchozí barvy na modrou, když se zahájí proces nahřívání stavební platformy. Poté se nahřívají extrudéry, barva se změní z modré na červenou. Dosáhne-li MakerBot Replicator 2X nastavených teplot, LED barva vrací na výchozí.
    - *Count Tool* pouze zobrazuje počet extrudérů, které tvoří tiskárnu.
    - Režim *Heated Plate* jenom vyobrazuje informaci, že tiskárna MakerBot obsahuje vyhřívanou podložku.
    - *Preheat Settings* dovoluje měnit teploty extrudérů a vyhřívané platformy.
    - *Restore Defaults* obnoví tovární nastavení (pouze pro LCD menu).
    - *Exit menu* slouží k opuštění nižší úrovně menu a návrat do hlavního menu.
    - *Version Number* pouze poskytuje informaci o verzi firmwaru na tiskárně.
- [20]

**ACTIVE BUILD MENU** je přístupné pouze při probíhajícím tisku modelu a stisknutí tlačítka – levá šipka.

- *Pause/Unpause* umožňuje krátkodobě zastavit probíhající tisk, extrudéry se nepohnou z jejich pozice. Po stlačení *Unpause* tisk bude pokračovat až do dokončení objektu.
- Po stlačení *Cancel Build* dojde k přerušení tisku aktuálního modelu. Pokračování není již možné a pracovní operace se musí pustit znovu.
- Režim *Change Filament* dovoluje výměnu vlákna během aktuálního procesu tisku (jiná barva, nová cívka s materiálem) a následně pokračovat v tisku modelu po stlačení *Resume Build*.
- Položky *Sleep (Cold Pause)/Resume Build* umožní pozastavit tisk na delší dobu. Zvolí-li uživatel tuto možnost, tiskárna MakerBot Replicator 2X dokončí rozdělaný příkaz (část tisku) před přemístěním extrudéru pryč od svého tisku a poté dovolí extrudérům a stavěcí desce vychladnout. Během *Cold Pause*, se nabídka změní na *Resume Built*. Po stisknutí tlačítka M se pokračuje v tisku.
- *Z Pause Height* možnost umožňuje nastavit výšku, ve které přestane tisknout. Vybere-li uživatel tento režim, je potřeba provést další potřebné nastavení *Z Position* a *Pause Active*. Chce-li uživatel nastavit výšku pauzy, přejde do *Z Position* stisknutím tlačítka M a pomocí šipek určí výšku pauzy v milimetrech. Následně stiskne znovu tlačítko M pro potvrzení výšky. Přejde-li uživatel na *Pause Active* a pomocí tlačítka M může přepínat nastavení *ON* a *OFF*. Je-li *Pause Active* nastavená na *ON*, bude výška Z pauza být spuštěn, a to i v případě, že *Z Height* nastavena na 0.
- *Filament Fan* zapne, nebo vypne ventilátor pro cívku. [20]

## 6.3 Využitelné formáty, software pro 3D tiskárnu MakerBot Replicator 2X

Dle údajů výrobce je tiskárna schopná pracovat ve třech typech formátů, které jsou běžné pro 3D tisk:

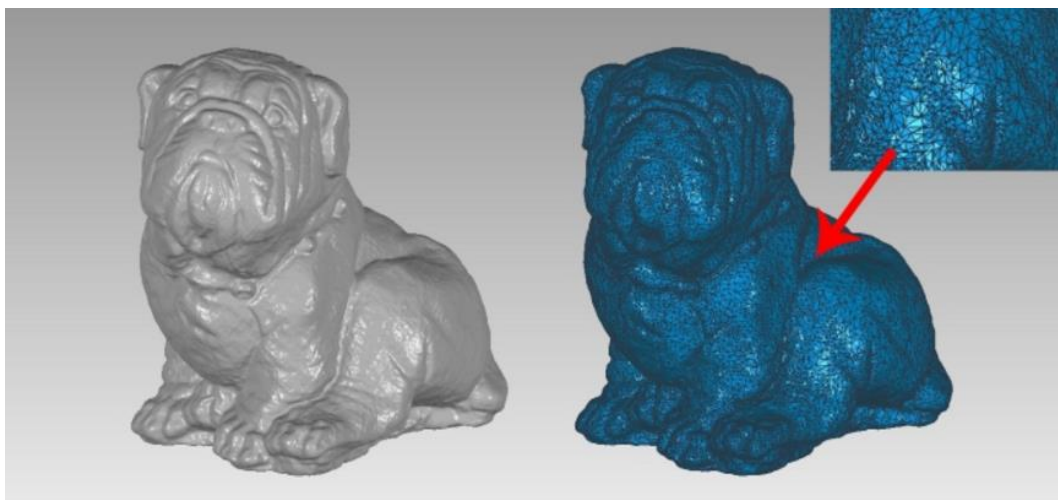
- STL formát,
- OBJ formát,
- THING formát,
- X3G formát.

### 6.3.1 Charakteristika STL formátu

S nápadem vytvořit formát STL přišla společnost 3D Systems. Tento formát se stal brzy základním formátem užívaným pro výměnu dat u procesů rychlého vytváření prototypů. STL za tento úspěch vděčí své jednoduchosti, originalitě a dostatečně preciznímu vyjádření (mapování) navrženého modelu.

STL je tvořen rejstříky trojúhelníkových ploch, kterým se také říká trojúhelníková mřížka. Můžeme ji definovat jako soubor vrcholů, hran a trojúhelníků, navzájem spojených tak, že každá hrana a každý vrchol jsou sdíleny minimálně dvěma přiléhajícími trojúhelníky (pravidlo “vrchol k vrcholu”). Toto vyjádření ovšem vynechává prvky, jako jsou body, přímky, křivky, vrstvy a barvy.

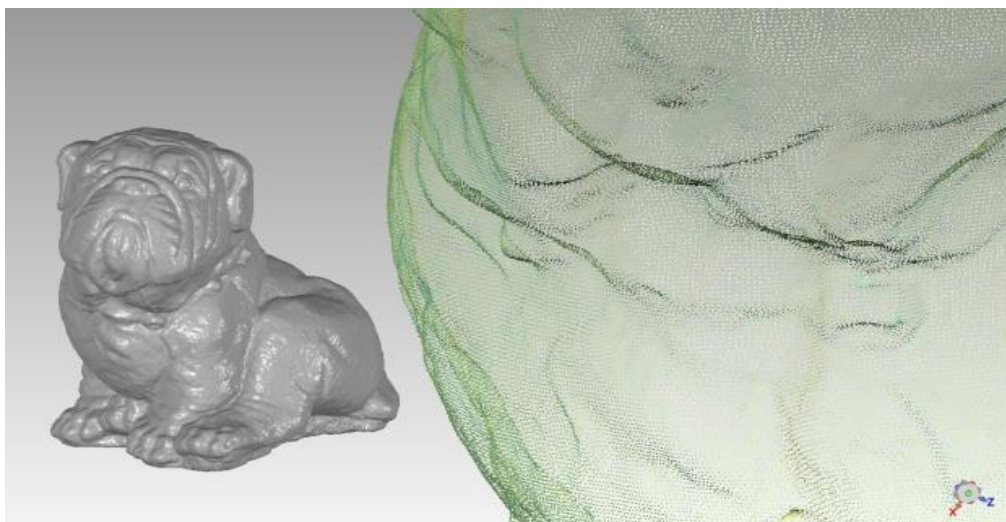
Soubory STL se ukládají s příponou \*.stl, část programů však umožňuje použít i jiné přípony. Velikost souboru závisí na počtu trojúhelníků, na jejichž plochy byl model rozdělen, a v důsledku toho na přesnosti, s jakou trojúhelníky odráží geometrii modelu. [22]



Obrázek 24: Zobrazení 3D objektu pomocí STL formátu. Převzato a upraveno z [23]

### 6.3.2 Charakteristika OBJ formátu

Jedná se o formát souborů používaný pro trojrozměrný objekt, který obsahuje 3D souřadnice (polygonů, čar a bodů), textur a další informace o objektu. Obsahuje standardní 3D formát obrazu, který lze exportovat a otevřít v 3D programech pro úpravu obrazů. Objektové soubory mohou být ve formátu ASCII (.obj), nebo binárním formátu (.mod), který neobsahuje barevné definice pro tváře. Vzhledem k jejich formátu, jsou člověkem čitelné. [24]



Obrázek 25: Zobrazení 3D objektu pomocí OBJ formátu. Převzato a upraveno z [23]

### 6.3.3 Charakteristika THING formátu

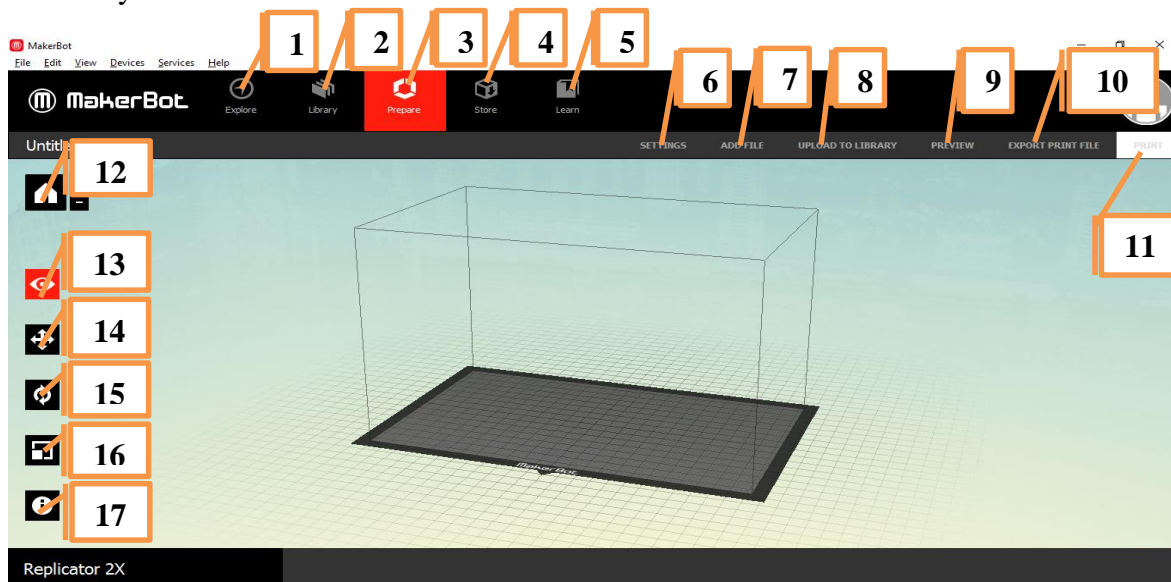
Formát je primárně využíván firmou MakerBot, jestliže uložíme model v programu MakerBot Desktop, tak formát zvolený k uložení bude THING. Výhodou je, že obsahuje informace o orientaci modelu a poloze modelu na vyhřívané podložce. Pokud se bude na podložce nalézat více modelů a modely budou uloženy v STL formátu, tak nebude možné pracovat s jednotlivými modely jednotlivě, ale pouze jako celek. V THING formátu je možné po uložení manipulovat s jednotlivými modely nezávisle na sobě. [25]

### 6.3.4 Charakteristika G - CODE (X3G) formát

Údaje zaslané z PC do většiny počítačů číslicově řízených (CNC strojů) včetně většiny 3D tiskáren je v G-kódu. I když v principu by člověk mohl zadat přímo příkazy G-kódu příkazy pro 3D tiskárnu, většina lidí raději používá jednu z mnoha CAM formátů, který čte soubor STL a odešle řádky G-kódu přes vedení do zařízení. Někteří výzkumníci vyvíjejí alternativy k G-kódu.

## 7 Software MakerBot Desktop verze 3.9

Oficiální software určený pro ovládání tiskáren MakerBot. MakerBot Desktop se nepovedlo zprovoznit na systému Windows 10, ve Windows 8.1 pracoval bez potíží. I po upozornění vývojářů softwaru přesto nedošlo k eliminaci problémů s používáním diakritiky v názvech souborů.



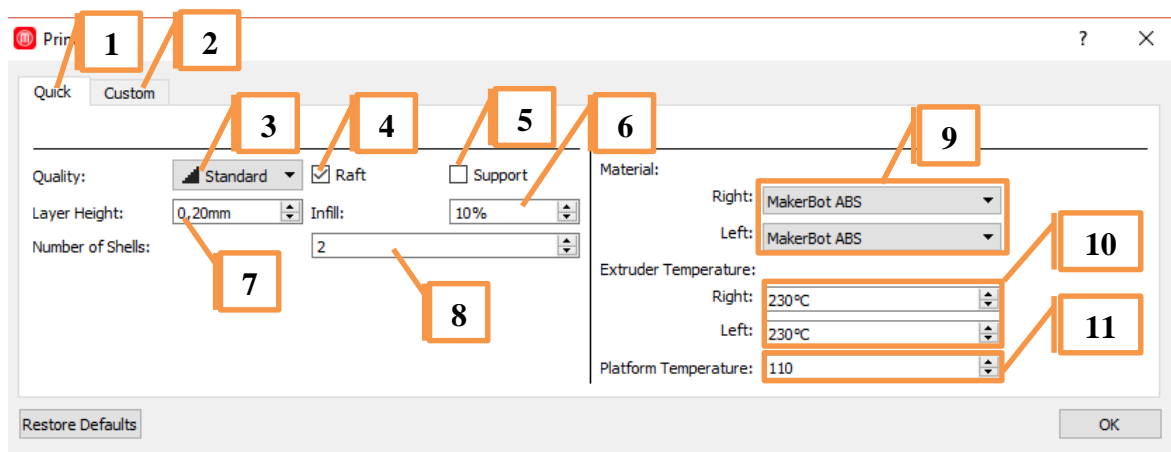
Obrázek 26: Základní pracovní MENU programu MakerBot Desktop

Popis jednotlivých položek základního pracovního prostředí programu MakerBot Desktop:

- 1 – vyhledávání modelů na databázi Thingiverse,
- 2 – přístup k modelům vytvořených uživatelem a uložených v knihovně,
- 3 – prostředí programu pro tisknutí aktuálního nahraného modelu,
- 4 – společnost MakerBot nabízí za poplatek získání jimi vytvořené modely,
- 5 – instruktážní videa od společnosti MakerBot,
- 6 – nastavení parametrů tisku,
- 7 – vložení 3D modelu do programu – název modelu nesmí obsahovat diakritiku,
- 8 – uložení modelu do uživatelské knihovny modelů,
- 9 – zobrazení průběhu tisknutí modelu (bez tisknutí),
- 10 – uložení modelu ve formátech x3g, s3g, gcode s nastavenou orientací modelu v tiskárně,
- 11 – začátek tisku modelu,
- 12 – zobrazení modelu v prvním pohledu,
- 13 – otáčení pohledu v prostoru,
- 14 – změna pozice modelu v 3D tiskárně,
- 15 – změna rotace modelu v 3D tiskárně,
- 16 – změna velikosti modelu,
- 17 – volba extrudéru (barva, kterou bude model tištěný).

## 7.1 Nastavení parametrů tisku

V programu MakerBot Desktop je možné v roli uživatele nastavovat parametry tisku dvojím způsobem – ve zjednodušené a pokročilé formě. Každá verze se v jednotlivých nastaveních liší, mnou popsaná nastavení platí pro software MakerBot verze 3.9. Nejdříve se budu zabývat zjednodušeným způsobem nastavení dat 3D tiskárny:



Obrázek 27: Zjednodušené nastavení parametrů tisku

1 – zjednodušené nastavení parametrů tisku,

2 – pokročilé nastavení parametrů tisku,

3 – nastavení kvality tisku,

- lze volit ze třech možností: *HIGH* – nejvyšší kvalita zpracování (delší čas tisku),

*STANDART* – optimální kvalita zpracování,

*LOW* – nejnižší kvalita zpracování (krátký čas tisku).

4 – Při zatržení volby raftu 3D tiskárna vytvoří pod modelem „základnu“, na které následně je model situován, raft je vytvořený za účelem lepší přilnavosti a lepší stability modelu v prostoru tiskárny v průběhu tisku.

5 – Při zatržení volby support dojde automaticky ke generování podpůrných struktur u modelů, které to potřebují (šikmé stěny, dutý válec tisknutý horizontálně atd.).

6 – Volba umožňuje nastavit procentuálně výplň modelu, pokud vyžadujeme tužší (hutnější) model, tak nastavíme vyšší hodnotu (vyšší hodnota odpovídá vyšší spotřebě filamentu).



7 – Zde program umožňuje nastavit výšku vrstvy po 0,05 mm od 0,05 ÷ 0,4 mm (průměr trysky v tiskárně je 0,4 mm). S ohledem na kvalitu (3) je potřeba nastavit vhodnou velikost vrstvy tisknutého modelu. Dle vlastních zkušeností doporučuji nenastavovat hodnotu vyšší než 0,35 mm. [27]

8 – Volba, která ovlivňuje počet venkovních linií, které tvoří výslednou vnější stěnu. Rozpětí volby je 1 ÷ 100 vrstev. Pokud není možné, aby tiskárna vytvořila námi stanovený počet vrstev, tak vytvoří maximální možný počet. Změna přednastavené volby ovlivní nejenom stabilitu objektu, ale i průhlednost modelu.

9 – Tato dvojice výběrů umožňuje navolit, jaký materiál je do 3D tiskárny zakomponován (pro levý a pravý extrudér), nabídka: ABS filament,

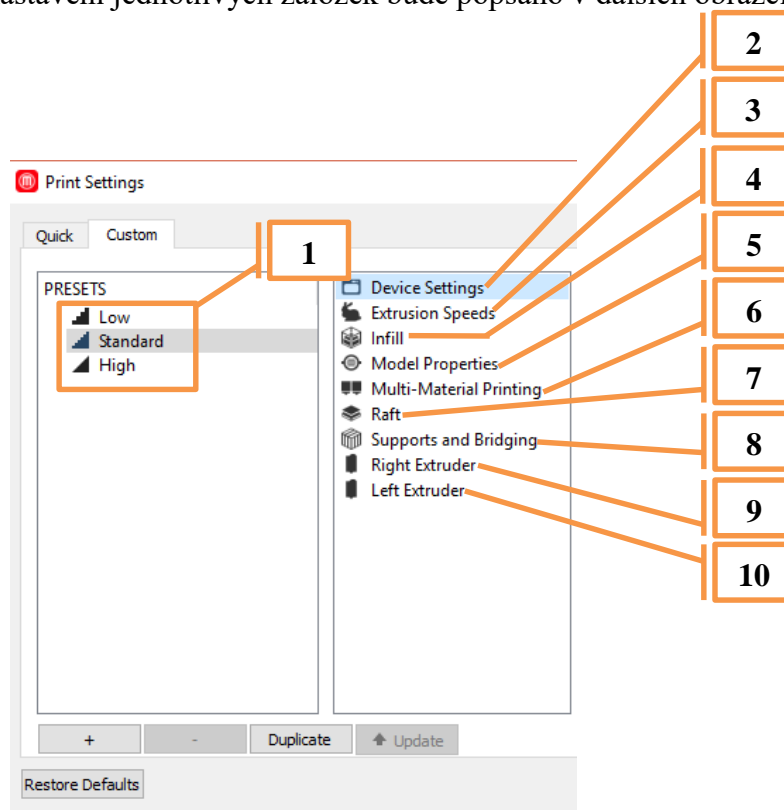
PLA filament,

HIPS filament (pro stavbu podpůrných struktur).

10 – I v tomto případě se jedná o dvojici nastavení pro levý a pravý extrudér, avšak zde se nastavuje teplota po 1 °C v rozmezí 0 ÷ 280 °C. Vhodná teplota pro materiál ABS od firmy MakerBot je 230 °C

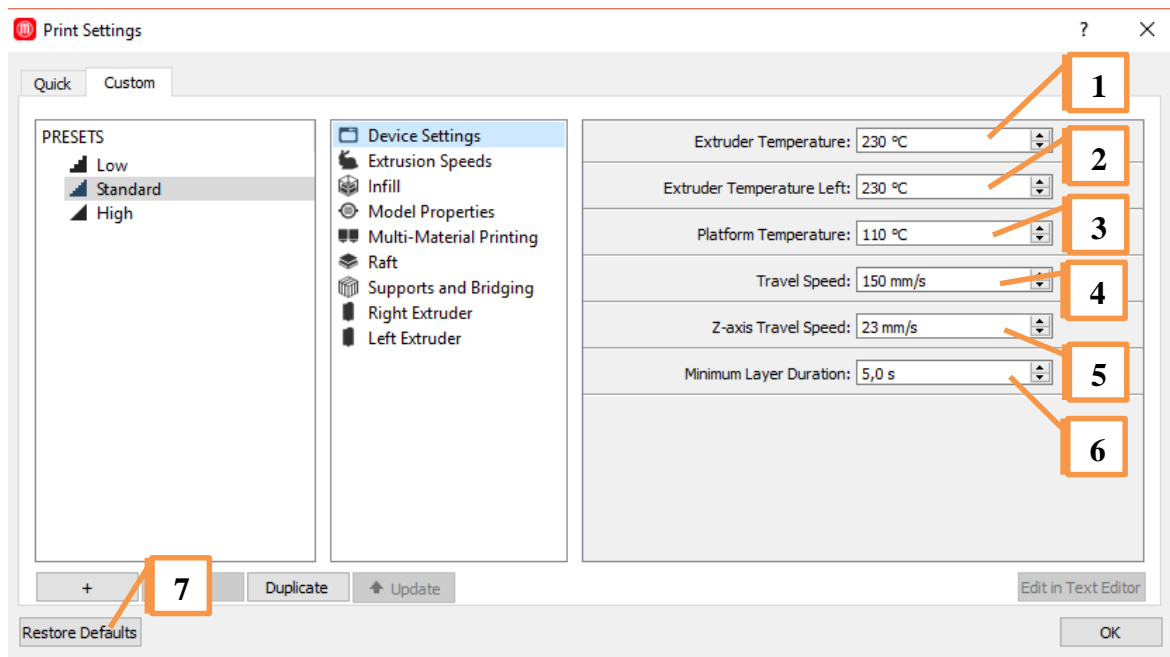
11 – Zde se nastavuje teplota vyhřívané podložky v rozmezí 0 ÷ 280 °C. Optimální teplota pro ABS filament od MakerBotu je 110 °C. [27]

V obrázku 28 budou popsány jednotlivé záložky pokročilého rozhraní tisku, detailnější nastavení jednotlivých záložek bude popsáno v dalších obrázcích této kapitoly:



Obrázek 28: Dialogové okno pokročilého nastavení tisku s jednotlivými záložkami

- 1 – volba kvality zpracování detailů modelu jako u zjednodušené formy,
- 2 – řízení parametrů 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X,
- 3 – nastavení parametrů při vytlačování filamentu z extrudéru,
- 4 – parametry ovlivňující výplň objektu,
- 5 – nastavení parametrů tisknutého modelu,
- 6 – možnosti tisku z více druhů materiálu nebo barev,
- 7 – optimalizace základny modelu,
- 8 – parametry pomocných struktur,
- 9 – nastavení pravého extrudéru,
- 10 – regulace levého extrudéru.



Obrázek 29: Software MakerBot Desktop pro řízení parametrů 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X

1 – nastavení teploty pravého extrudéru

2 – nastavení teploty levého extrudéru

3 – nastavení teploty vyhřívané stavěcí podložky

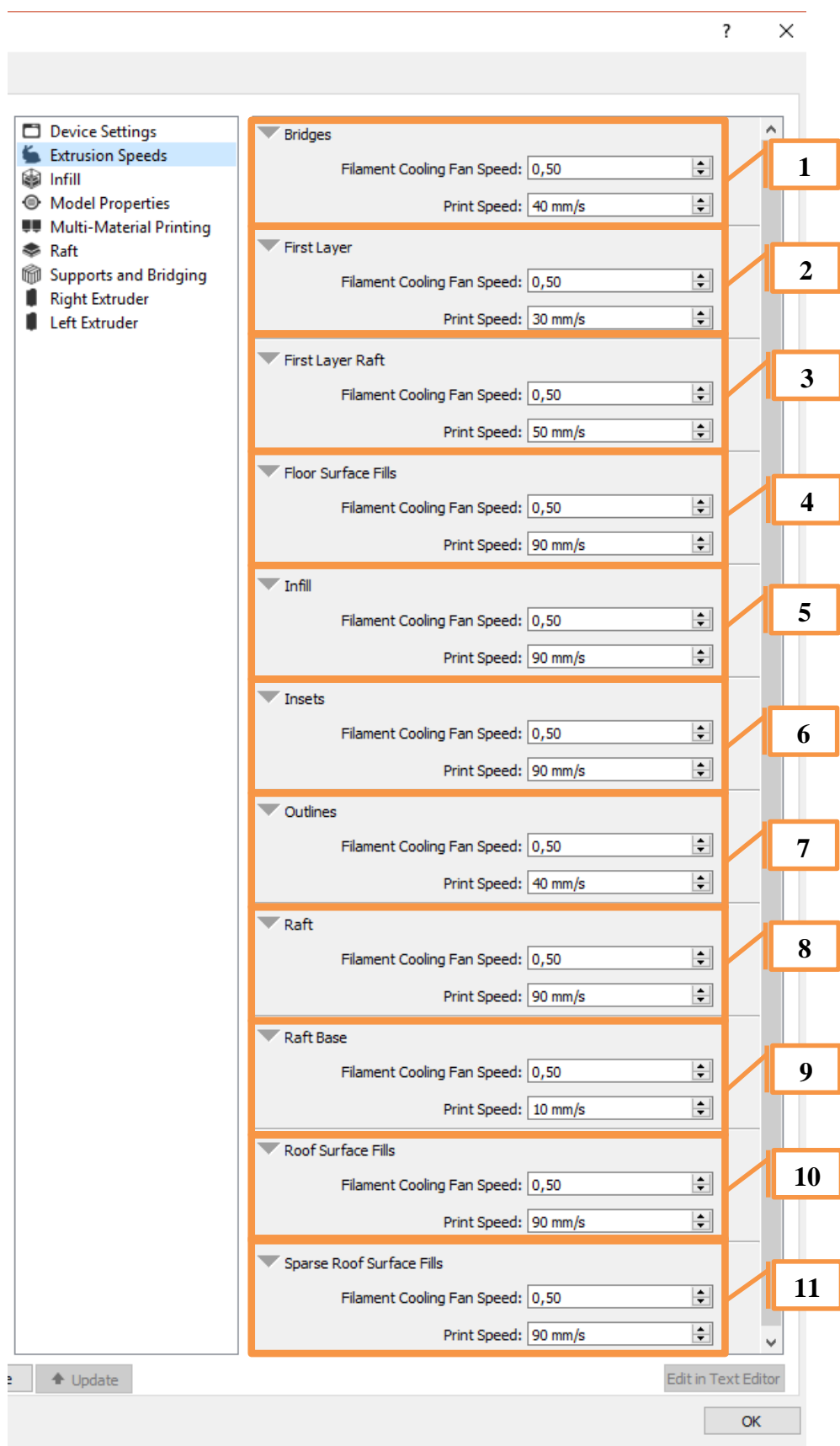
4 – Změna tohoto parametru ovlivní rychlost přesunu extrudéru v horizontální rovině, když extrudér netiskne (vyšší nastavená hodnota znamená rychlejší přesun extrudéru).

5 – Volba hodnoty má vliv na rychlost přesunu nosné konstrukce i s vyhřívanou stavěcí plošinou v ose Z. Na aktuálně tištěném modelu dojde vytvoření potřebné vrstvy a pro vytvoření další vrstvy sjede vyhřívaná stavěcí podložka o definovaný rozměr níže. S jakou rychlostí tento krok provede, definuje tento parametr.

6 – Hodnota v sekundách udává nejnižší možný čas mezi tiskem jednotlivých vrstev. Pokud by se vrstva objektu vytiskla rychleji, než je nastavená hodnota, dojde ke zpomalení tisku z důvodu zchlazení předchozí vrstvy. Vyšší hodnota parametru v sekundách znamená delší čas mezi jednotlivými vrstvami. Při navolení nevhodné hodnoty dochází buďto k deformacím objektu při nanášení další vrstvy (nedostatečný čas potřebný na zchlazení), nebo nadbytečnému prodloužení času tisknutí modelu.

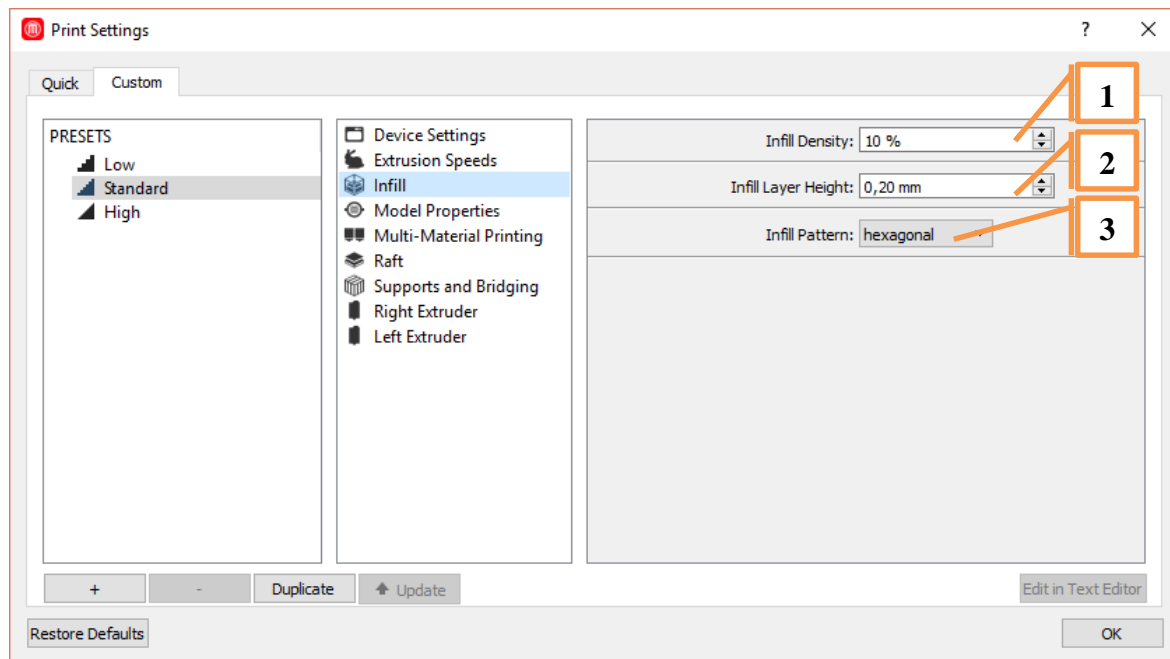
7 – Potvrzením této možnosti dojde k resetování námi nastavených možností tisku, dojde k nastavení výchozích hodnot (resetují se všechny parametry tisku, nejenom aktuální záložka). [27]

Ve všech orámováních obrázku 30 se upravují parametry tisku určité části objektu a raftu pomocí otáček ventilátoru a rychlost extruze materiálu.



Obrázek 30: Nastavení parametrů při vytlačování filamentu z extruderu pro 3D tiskárnu

- 1 – V rámečku lze nastavit dvojici parametrů, které ovlivní způsob tisknutí „mostu“ (pomocné stavební podpůrné struktury).
- 2 – Změnou první volby se reguluje jakost první vrstvy objektu. Model je tištěný bez základny (model se tiskne přímo na vyhřívanou podložku).
- 3 – Třetí orámování umožňuje nastavení parametrů první vrstvy objektu, avšak model je tištěný se základnou.
- 4 – V předchozích verzích programu nebylo toto nastavení možné. Výběr parametrů výrazně ovlivní kvalitu dna objektu. V bodě sdělení 2 se nastavení týká pouze první vrstvy. Zatímco zde nastavení působí na více spodní vrstev (dno) objektu.
- 5 – Kvalita vnitřní výplně je regulována opět otáčkami ventilátoru a rychlostí tisku. Nastavení parametrů má vliv i na kvalitu spodních (bod sdělení 4) a vrchních vrstev objektu (bod sdělení 10).
- 6 – Vnější struktura je tvořena několika jednotlivými linkami v určité vrstvě. Linky na sebe vzájemně navazují, a tvoří tak obal objektu. Jakost vnějšího obalu modelu se reguluje dvojicí těchto voleb. Linka, která je nejvíce vnější, není tímto nastavením ovlivněná.
- 7 – V každé vrstvě se nachází nejkrajnější linka filamentu, kvalitu linky lze optimalizovat volbou touto volbou.
- 8 – Optimalizace kvality povrchu na rozhraní povrchových vrstev raftu.
- 9 – Nastavení parametrů (rychlosti tisku a otáček ventilátoru) jednotlivých vrstev raftu.
- 10 – Rámeček má vliv na jakost vrchních vrstev tištěného modelu (vrchní strana objektu).
- 11 – Jedná se o podobné nastavení jako v 10, ale zde proměnné mají vliv na kvalitu řidších vrstev tištěného modelu (vrchní strana objektu). [27]



**Obrázek 31: Softwarová regulace parametrů ovlivňující výplň objektu**

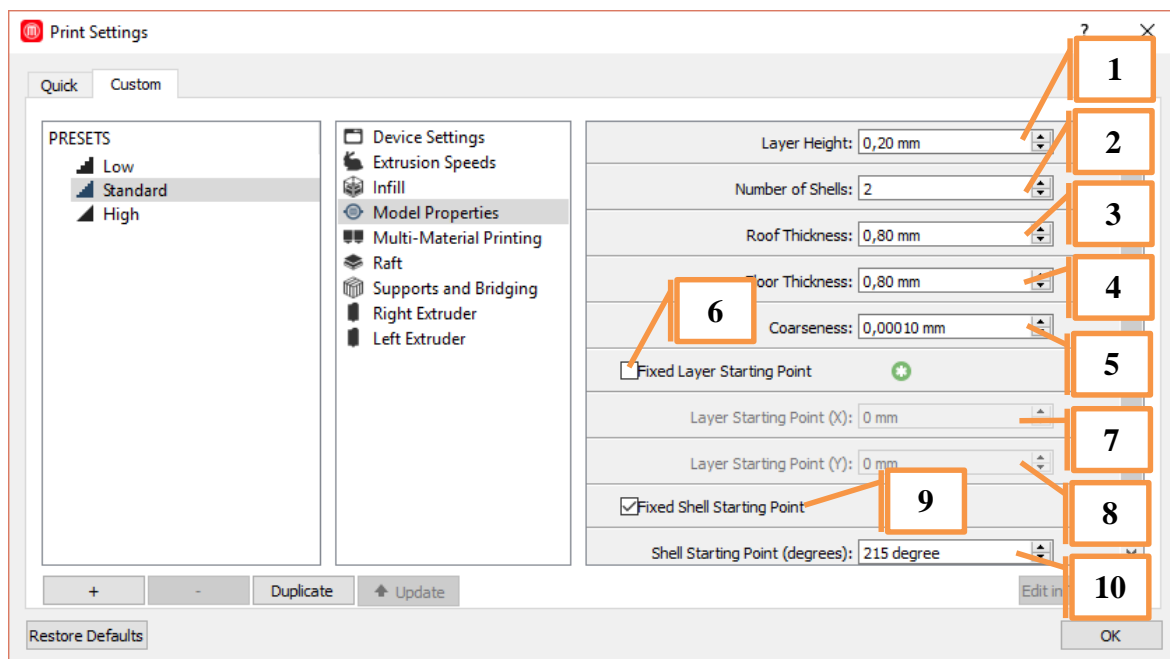
- 1 – Číslo udává procentuální výplň materiálu uvnitř objektu. Vyšší číslo odpovídá vyšší spotřebě materiálu, ale i vyšší tuhosti modelu (viz zjednodušené nastavení tisku).
- 2 – *Infill Layer Height* umožňuje nastavit jinou hodnotu vrstvy materiálu pro výplň objektu oproti vnějším stěnám objektu. To pozitivně ovlivní čas tisku bez ztráty kvality povrchu objektu. Vnitřní vrstva by měla vždy být násobkem vnější vrstvy.
- 3 – Způsob vykreslování výplně – výplň je kladená do objektů systematicky a dochází k vykreslování určitých obrazců:

*hexagonal* – vhodná pro odolnější objekty bez přidání hmotnosti objektu, extrudér vykresluje šestihrany uvnitř objektu;

*linear* – výplň je tvořená paralelními čarami, které jsou kolmé na předešlou vrstvu, dráha nástroje je jednodušší než u *hexagonal* (rychlý tisk);

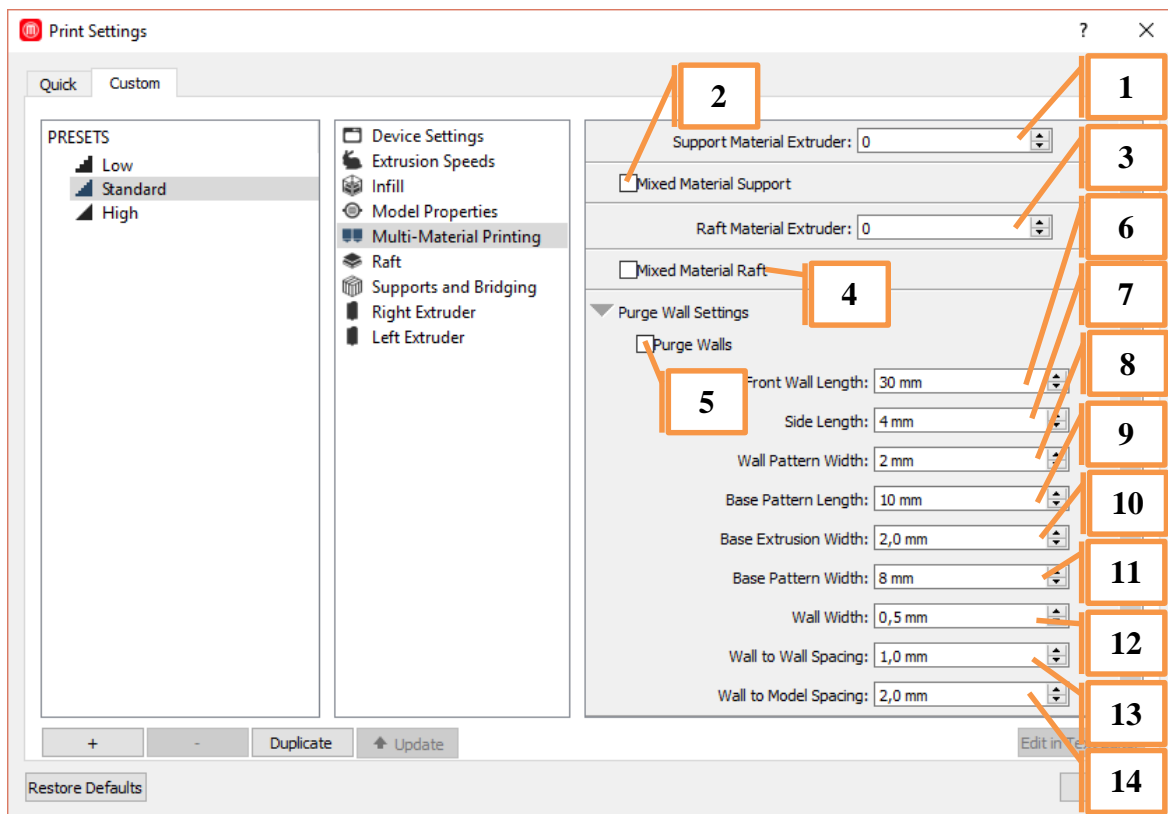
*diamond* – plocha výplně vytváří obrazce odpovídající diamantu, výplň je houževnatější a tiskne se rychle, alternativou je *diamond (fast)*, který tiskne až o 30 % rychleji, než s ostatními výplněmi;

*catfill*, *sharkfill* a *moroccanstar* – dekorativní účel výplně zvyšující čas tisku (složitější dráha extrudéru). [27]



**Obrázek 32: Dialogové okno upravující možnosti nastavení výplně objektu**

- 1 – Číslo udává, jakou výškou vrstvy bude mít každá vrstva modelu (vnější vrstvy mohou mít rozdílnou výšku oproti vnitřním vrstvám). Nižší číselná hodnota ve výsledku udává lepší kvalitu zpracování, ale i delší čas tisknutí modelu.
- 2 – Popis je již uvedený v obrázku 27 a bodě sdělení 8.
- 3 – Změnou parametru lze nastavit tloušťku vrcholu („střechy“) objektu. Vršek modelu je tvořený vrstvami v nastavené tloušťce v milimetrech.
- 4 – Jedná se o podobné nastavení jako v předchozím bodě, ale tady se upravují spodní vrstvy (dno) objektu.
- 5 – Úpravou hodnoty lze upravit detaily obrysu objektu. Zvýšením hodnoty dojde k vynechání drobnějších detailů objektu, zjednodušení tisku a kratší době tisku.
- 6 – Vybráním této možnosti bude každá vrstva vnějšího pláště (shell) začínat na stejných souřadnicích. To obvykle vede k viditelným svislým švům.
- 7 – X-ová souřadnice při nastavení pevné pozice počátku vnější vrstvy modelu.
- 8 – Y-ová souřadnice při nastavení pevné pozice počátku vnější vrstvy modelu.
- 9 – Vybráním možnosti se aktivuje možnost nastavení úhlu, kde bude výchozí pozice pro začátek každé vrstvy vnějšího pláště (shell). Po směru hodinových ručiček se úhel zvětšuje.
- 10 – Parametr *Shell Starting Point* souvisí s bodem sdělení 9. Číselnou změnou se provede nastavení úhlu pro výchozí pozici každé vrstvy vnějšího pláště. [27]



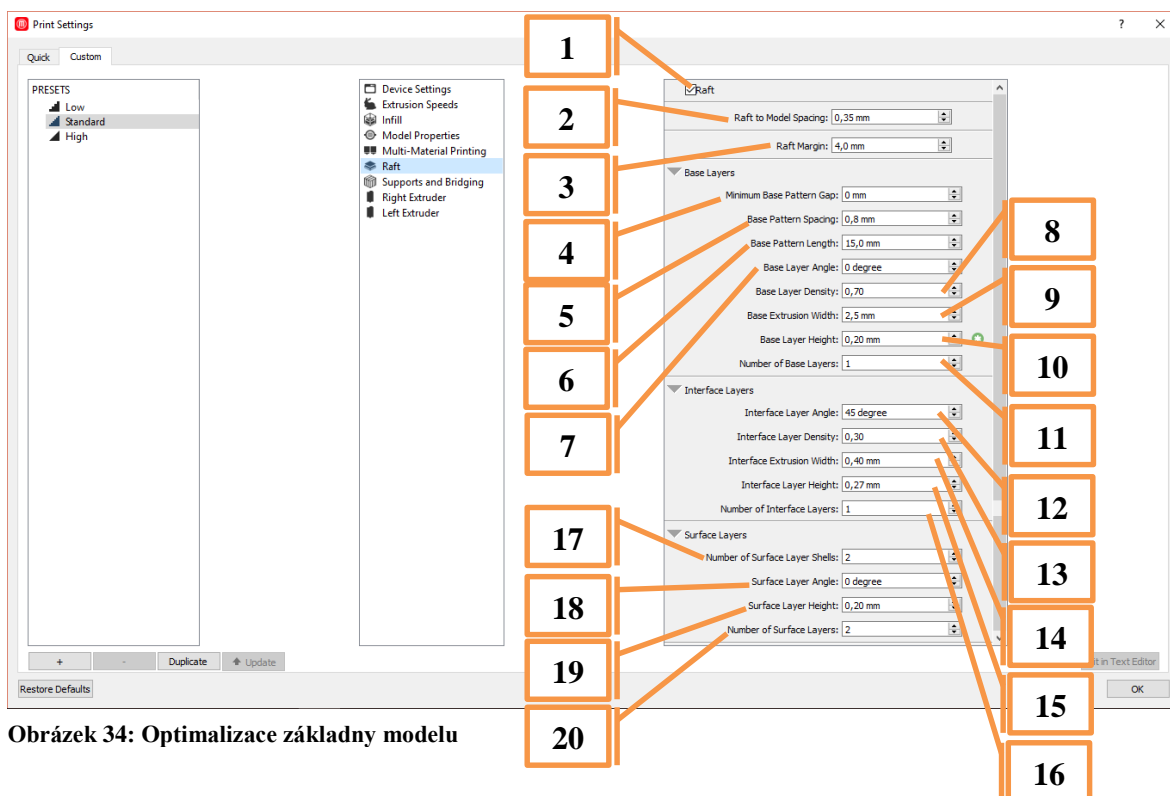
Obrázek 33: MakerBot Desktop upravující parametry tisku pro dvojici rozdílných materiálu nebo barev

- 1 – Tiskárna MakerBot Replicator 2X je tvořená dvojicí extrudérů. Tato položka umožňuje nastavit, z kterého extrudéru (případně materiálu) bude podpůrná konstrukce modelu, pokud je potřeba u modelu tištěná. Číslo 0 označuje pravý extrudér, číslo 1 je značení pro levý extrudér.
- 2 – Pokud se tiskne předmět složený ze dvou různých materiálů, nebo dvou různých barev stejného typu materiálu. Uživatel zatrhne políčko 2. Tiskárna vytiskne smíšené podpůrné konstrukce ze dvojice materiálů nebo barev, kde určitá část modelu podpůrných struktur tištěných ze stejného materiálu jako část objektu. Je-li zvoleno políčko *Mixed Material Support*, bude nastavení *Support Material Extrudér* ignorováno.
- 3 – Pokud chce uživatel, aby raft vytištěný z konkrétního materiálu, jako je „MakerBot rozpustné vlákno“, zvolí *Raft Material Extrudér*. Tento raft se vytiskne z vybraného extrudéru a váš model bude vytištěný z ostatního extrudéru. Číslo 0 označuje pravý extrudér a 1 označuje levý extrudér.
- 4 – Pokud se tiskne model složený ze dvou různých materiálů, nebo dvou různých barev stejného druhu materiálu. Uživatel zatrhne volbu 4. Tiskárna vytiskne základnu modelu ze smíšených materiálů nebo barev, kde určitá část modelu leží na části raftu ze stejného materiálu jako je model. Je-li zvoleno políčko *Mixed Material Raft*, nastavení *Raft Material Extrudér* je ignorovány. [27]



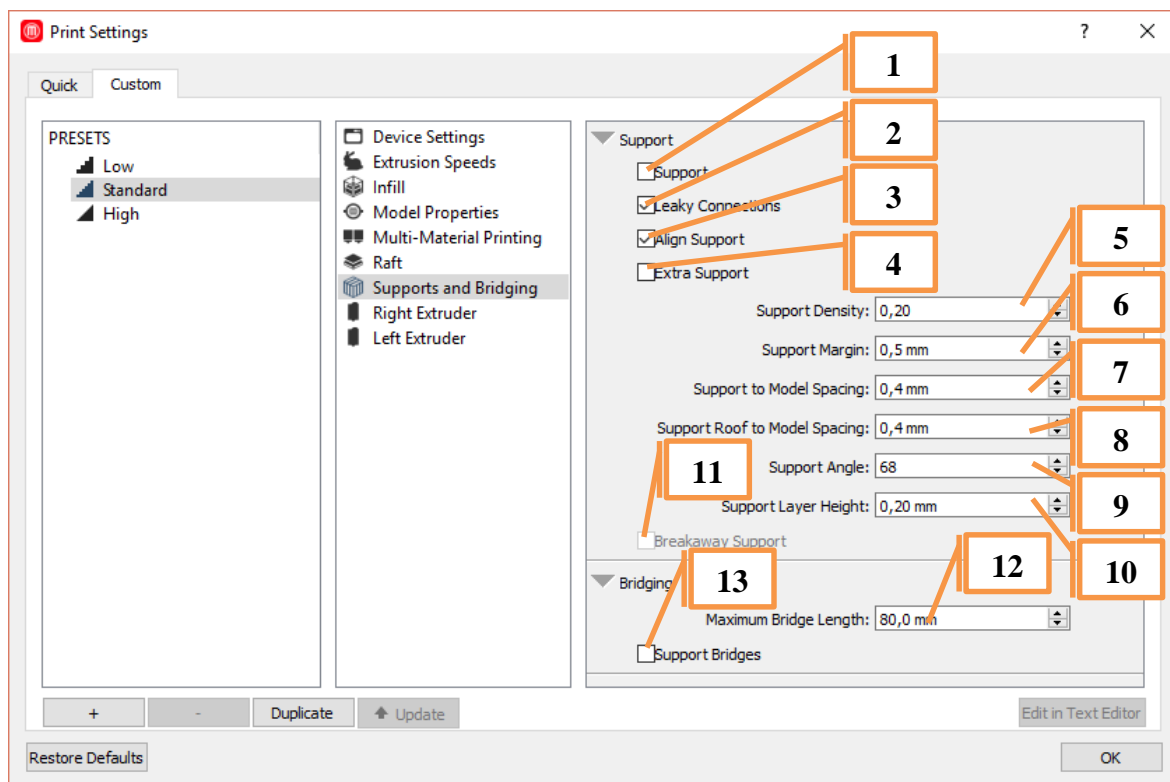
- 5 – Při navolení této možnosti dochází k vytváření speciální struktury po obvodu objektu při využití duálního extrudéru. Tato funkce pomáhá omezit míchání filamentu při tisknutí modelu z různých barev nebo jejich odstínů. Dochází k vyššímu úbytku filamentu, avšak nedochází ke snížení kvalitě povrchu tisknutého objektu.
- 6 – Nastavením se ovlivní maximální délka předního Purge walls („pročišťovacího valu“) podél objektu.
- 7 – Parametr mění maximální délku bočního „pročišťovacího valu“ podél objektu.
- 8 – *Wall Pattern Width* udává šířku „pročišťovací stěny“ v milimetrech.
- 9 – „Očišťovací struktura“ je vytisknuta na základní vrstvu. Čáry základní vrstvy se vytisknou blíže k sobě při nižších hodnotách a dál od sebe na vyšších hodnotách.
- 10 – *Base Extrusion Width* omezuje šířku extruze na základní vrstvu při Purge walls.
- 11 – *Base Pattern Width* ovlivní šířku vzoru základní vrstvy purge walls.
- 12 – Parametr má vliv šířku extruze hlavní části Purge walls.
- 13 –Vzdálenost mezi sousedními „očišťovacími stěnami“. Doporučená vzdálenost je mezi 1 a 3 milimetry.
- 14 – Minimální vzdálenost mezi okrajem modelu a Purge walls. [27]

V obrázku 34 se optimalizuje veškeré nastavení týkající se raftu (základny) modelu, které ovlivní především přilnavost modelu na vyhřívané podložce.



Obrázek 34: Optimalizace základny modelu

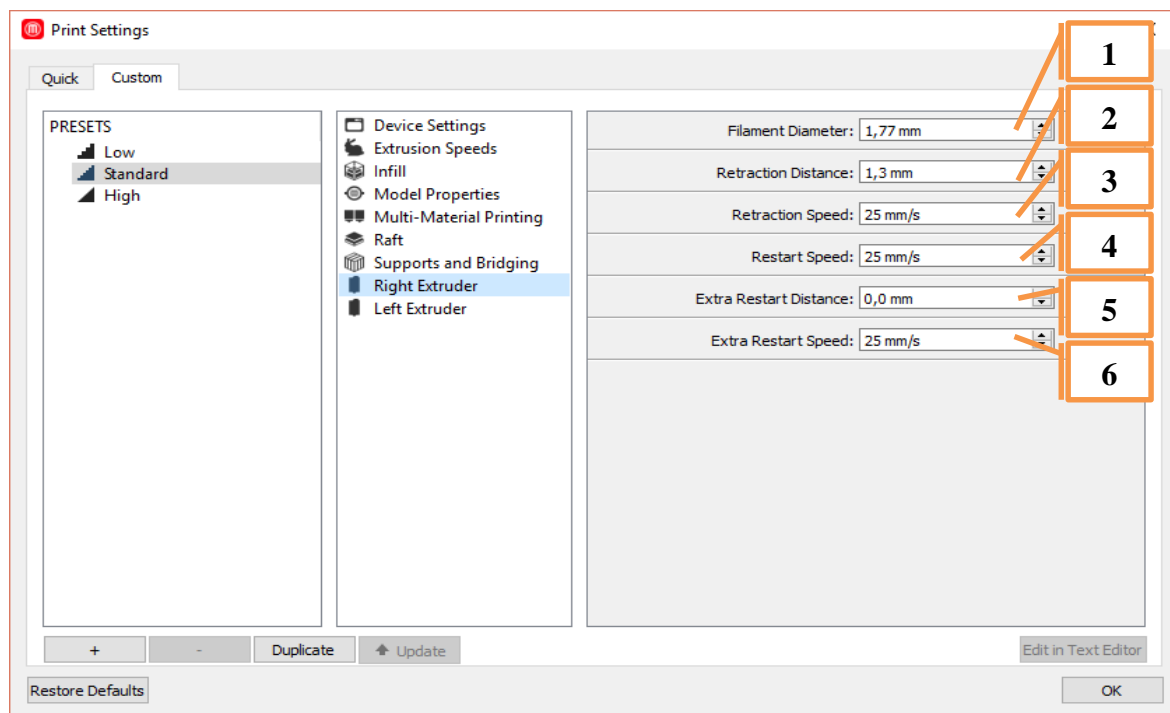
- 1 – Zaškrťovací políčko zapíná, nebo vypíná tvorbu raftu (základny) pod tištěným objektem.
- 2 – Hodnota určuje vertikální vzdálenost mezi raftem a modelem. Menší hodnoty mohou zapříčinit obtížnější odstranění základny z modelu, zatímco větší mezera bude snižovat kvalitu povrchu dna objektu.
- 3 – Tímto políčkem se nastavuje, jak daleko raft přesahuje okraje vašeho objektu.
- 4 – Mezery menší než toto minimum budou zaplněny (snížení složitosti základny modelu).
- 5 – Definuje mezery mezi linkami základny základní (mi) vrstvou (vrstvami).
- 6 – Délka příčného vzoru napříč základními vrstvami, který tvoří raft.
- 7 – Velikost úhlu mění orientaci vzoru na vyhřívané podložce.
- 8 – Změna hustoty základní vrstvy, která umožňuje vyplňovat mezery mezi jednotlivými linkami v jedné vrstvě.
- 9 – Šířka vytlačování základních vrstev raftu. Hodnota by měla být výrazně větší, než je šířka trysky.
- 10 – Parametr ovlivňuje výšku vrstev základny modelu. Firma MakerBot doporučuje případně nastavit hodnotu vyšší, než je normální výška vrstvy.
- 11 – Vrstva základny je tištěná velmi pomalu, se silnější extruzí. Políčko ovlivní, kolik vrstev je ve spodní části základny modelu použito.
- 12 – Provádí se nastavení úhlu pro vrstvy na rozhraní mezi spodními a vrchními vrstvami raftu.
- 13 – Při změně tohoto parametru se ovlivní hustota vnitřních vrstev základny objektu. Vyšší hodnota odpovídá vyšší hustotě linek, menší hodnota snižuje hutnost plochy. Firma MakerBot doporučuje hodnotu  $0,2 \div 0,5$ .
- 14 – Šířka extruze niterných vrstev raftu. Pro odpovídající kvalitu vrstev musí být číslo rovnocenné nebo vyšší než je šířka trysky.
- 15 – Hodnota reguluje výšku vnitřních vrstev raftu.
- 16 – Počet vnitřních vrstev, kterými je tvořený vnitřek základny.
- 17 – Volba ovlivňuje počet linií, které tvoří výslednou vnější (vrchní) stranu raftu. Přidáním dalších vrstev dojde k jednoduššímu odstranění základny objektu po dokončení tisku.
- 18 – Optimalizace úhlu kladení vrchních vrstev raftu.
- 19 – Výška linky filamentu, která je položena jako vrchní vrstva základny. Pro optimální funkci je třeba volit hodnotu podobnou výchozí hodnotě.
- 20 – Počet vrchních vrstev, které budou kladeny na svrchní stranu raftu. [27]



Obrázek 35: Dialogové okno zobrazující nastavení pomocných konstrukcí

- 1 – Zaškrtnutím políčka *Support*, program automaticky vytvoří podpůrné konstrukce modelu v místech, kde je to potřeba (převisy objektu atd.).
- 2 – Možnost *Leaky Connections* umožňuje vytékat (odkapávat) filamentu z trysky extrudéru během přesunu. Dochází k posilování vazeb mezi různými úseky podpůrných struktur, ale i přesto lze podpory snadno odstranit.
- 3 – Podpory jsou tištěné paralelně (dvojice podpůrných stěn vedle sebe). Není-li položka zaškrtnutá, tvoří se podpory křížem krážem (pevnější podpory).
- 4 – Vybráním položky *Extra Support* se vytváří mimořádné odolnější podpory pro objekt.
- 5 – Uživatel může nastavit hustotu podpůrných struktur dle svého uvážení. Vyšší hodnota znamená menší rozteč mezi jednotlivými částmi podpor (vyšší hustota), menší hodnota snižuje hustotu podpor.
- 6 – Změnou hodnoty se optimalizuje vzdálenost mezi okrajem modelu a vnějšími okraji podpor. Zvolí-li uživatel hodnotu 0, podpora se neprodlouží dále, než je převis objektu.
- 7 – Parametr nastaví vzdálenost mezi vnějšími okraji objektu a vnitřními okraji pomocných konstrukcí. Podpůrné struktury blíže k objektu poskytují větší oporu, ale mohou být mnohem obtížněji odstranitelné.
- 8 – Vzdálenost mezi vrchní vrstvou podpory a tištěného modelu v horizontální rovině.

- 9 – Úhel reguluje, kde a v jaké části objektu potřebuje podpůrnou strukturu. Software bude stavět podporu v rámci převisů, které svírají větší úhel od svislice, než je zde nastavená hodnota. Při navolení hodnoty  $0^\circ$  budou pomocné konstrukce vytvořeny téměř všude. V případě pravého úhlu  $-90^\circ$  se nevytvoří žádné podpory.
- 10 – Parametr definuje výšku jedné vrstvy filamentu, která vytváří pomocné struktury. Optimálním navolením výšky vrstvy lze zkrátit čas tisku. Hodnotu lze volit nezávisle na výšce vrstvy, kterou je tištěný model.
- 11 – Most je struktura, která je ukotvena pouze na obou koncích. Jestliže je délka mostu větší, než nastavená hodnota v políčku, most bude vytištěný s pomocnou strukturou a můstky kratší, než tato délka budou tištěny bez dalších podpor.
- 12 – Zaškrtnutím možnosti *Support Bridges* budou automaticky tištěny mocné struktury pod mosty a můstky nezávisle na jejich délce. [27]



**Obrázek 36: Software MakerBot Desktop – záložka pro nastavení parametrů pravého extruderu (analogie s levým extruderem)**

- 1 – Softwarová hodnota průměru vlákna musí odpovídat skutečné hodnotě. Extrudér dávkuje vlákno v závislosti na této hodnotě. Pokud se nastavená hodnota výrazně odchyľuje od skutečné, extrudér dávkuje nedostatek, nebo nadbytek materiálu.
- 2 – Délka vlákna, které je navinuta do extrudéru před přemístěním extrudéru. Význam spočívá v omezení vzniku otřepů na hranách tištěného modelu.
- 3 – Rychlost ovlivňující vtažení vlákna do extrudéru před jeho přesunem (bod sdělení 2).
- 4 – Parametr rychlosti určuje rychlost posunu vlákna do trysky po přemístění extrudéru.
- 5 – Políčko umožňuje změnit, kolik vlákna je sunuto zpět do trysky extrudéru. Nastaví-li uživatel 0, stejné množství vlákna bude vsunuto zpět. Vidíte-li nedostatky nebo drobné kuličky z plastu na tištěných stranách, lze použít toto nastavení opravit to.
- 6 – Nastavení ovlivní rychlost extruze pro bod sdělení 5. Zadáním kladné hodnoty dojde přidání vlákna a redukci mezer na stěně, a naopak. [27]

## 8 Software pro 3D modelování pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X

V dnešní době jsou široké možnosti 3D modelování a programů, které jsou uživatelsky přívětivé i pro běžného člověka, který se modelování vyloženě nevěnuje. Na začátek bych rád programy rozdělil podle několika kritérií:

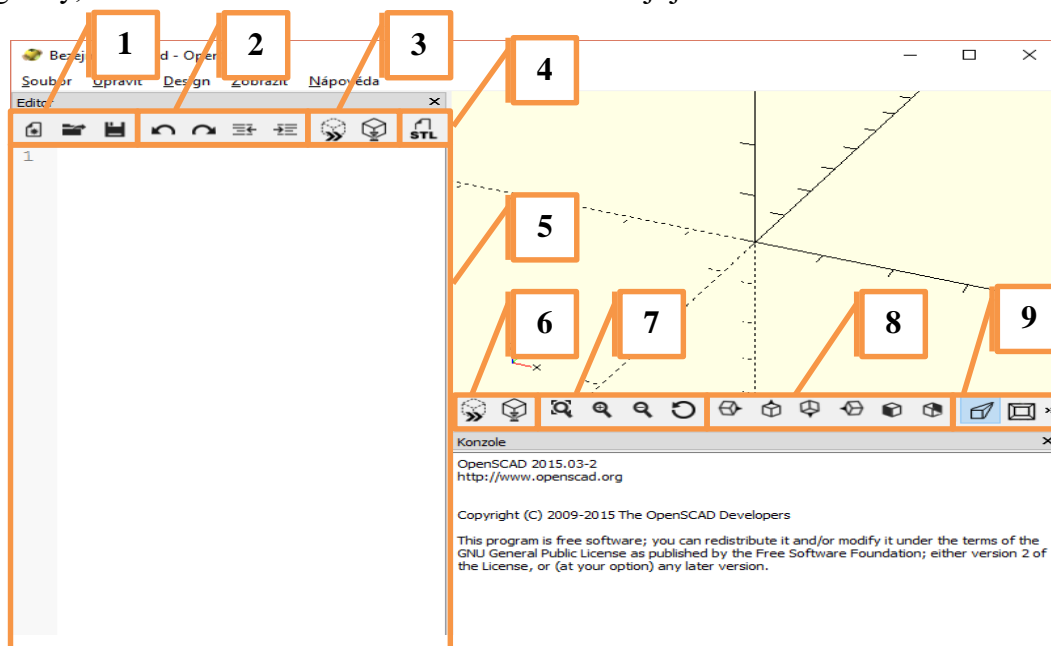
- licence:
  - na placené (shareware),
  - volně dostupné (freeware).
- způsobu modelování:
  - modelování v 3D programu → objekt (primární)
  - objekt (primární) → modelování v 3D programu → objekt (sekundární)
  - objekt (primární) → modelování scannerem → objekt (sekundární)

Možnosti modelování jsou rozličné a není vyložené náplní této diplomové práce analyzovat trh se softwarem a věnovat se každému vytvořenému programu. Na základě osobních zkušeností a výběru jsem vybral několik variant programů, které plnohodnotně mohou doporučit pro tvorbu 3D modelů:

- OpenSCAD,
- Google SketchUp,
- DesingSpark Mechanical,
- SolidWorks,
- Autodesk 123 Design,
- Autodesk 123 Catch.

## 8.1 OpenSCAD

Jedná se o volně dostupný program, který dovoluje uživateli pomocí definovaných příkazů vytvářet modely dle svého uvážení. Ovládání programu je přeloženo do češtiny, avšak příkazy se zadávají v angličtině. Návod na jednotlivé příkazy lze získat v online nápovědě, nebo neoficiální cestou a to různými videi od uživatelů na serveru Youtube. Již vytvořené modely se nechají následně editovat. OpenSCAD patří mezi jednoduché programy, které zvládne obsluhovat kdokoliv. Pro svoji jednoduchost se těší značné oblibě.

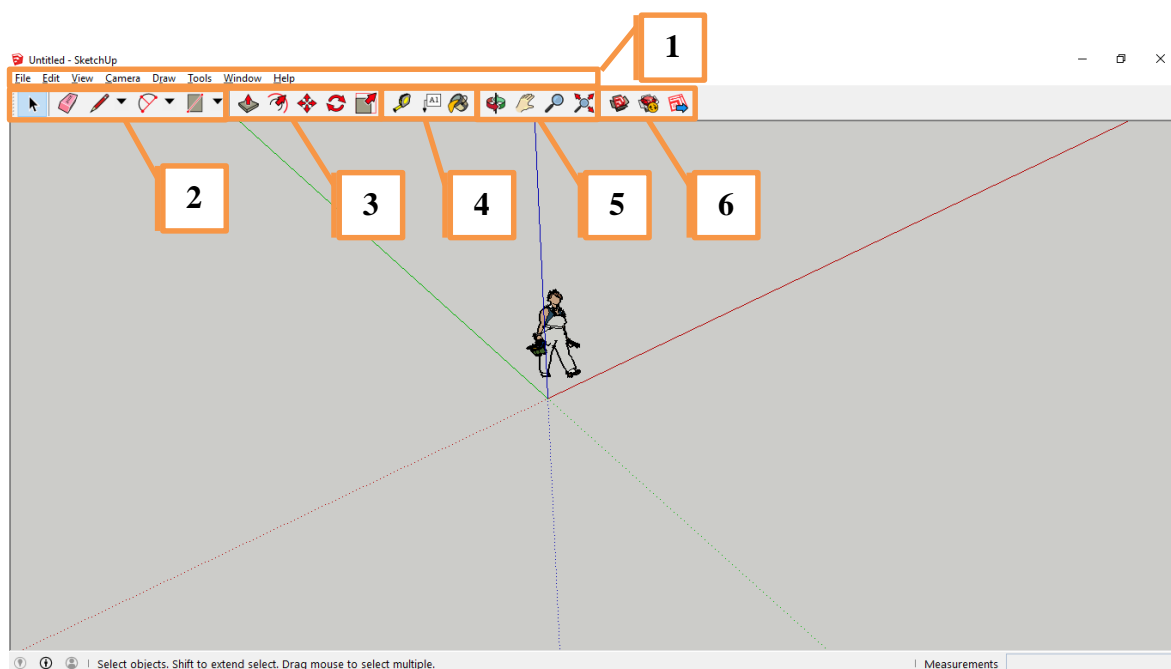


Obrázek 37: Pracovní plocha programu OpenSCAD

- 1 – možnosti pro načítání a ukládání souborů
- 2 – krok zpět a vpřed příkazu, odsazení příkazu v zadávacím okně (5)
- 3 – provedení příkazu a rendrování modelu
- 4 – exportování modelu do formátu STL
- 5 – okno pro vkládání příkazů
- 6 – totožná funkce jako volba (3)
- 7 – změna pohledu na model
- 8 – cílená změna pohledu na určitou stranu modelu
- 9 – volba (perspektivního, nebo ortogonálního) pohledu

## 8.2 Google SketchUp

Název již napovídá, že program je od firmy Google, která každoročně aktualizuje a vydává novější verze tohoto programu. Nespornou výhodou programu je uživatelsky sdílená knihovna, které obsahuje modely vytvořené ostatními uživateli a je tak k dostání mnoho kvalitních modelů. Avšak modely je potřeba převést do STL formátu, jelikož program MakerBot Desktop nepracuje s formátem SKP, který je specialitou programu SketchUp. Pro převod do STL formátu je třeba doinstalovat oficiální plugin, který umožní právě již zmíněný převod. Mnou vytvořené modely lze bez problémů načíst do programu MakerBot Desktop, ale některé modely vytvořené ostatními uživateli nebyl schopný načíst a tisk nebyl v pořádku provedený. Pro čerpání modelů od jiných autorů mám k tomuto programu výhrady, ale jinak se jedná o vhodný program pro modelování pro nezkušeného člověka.



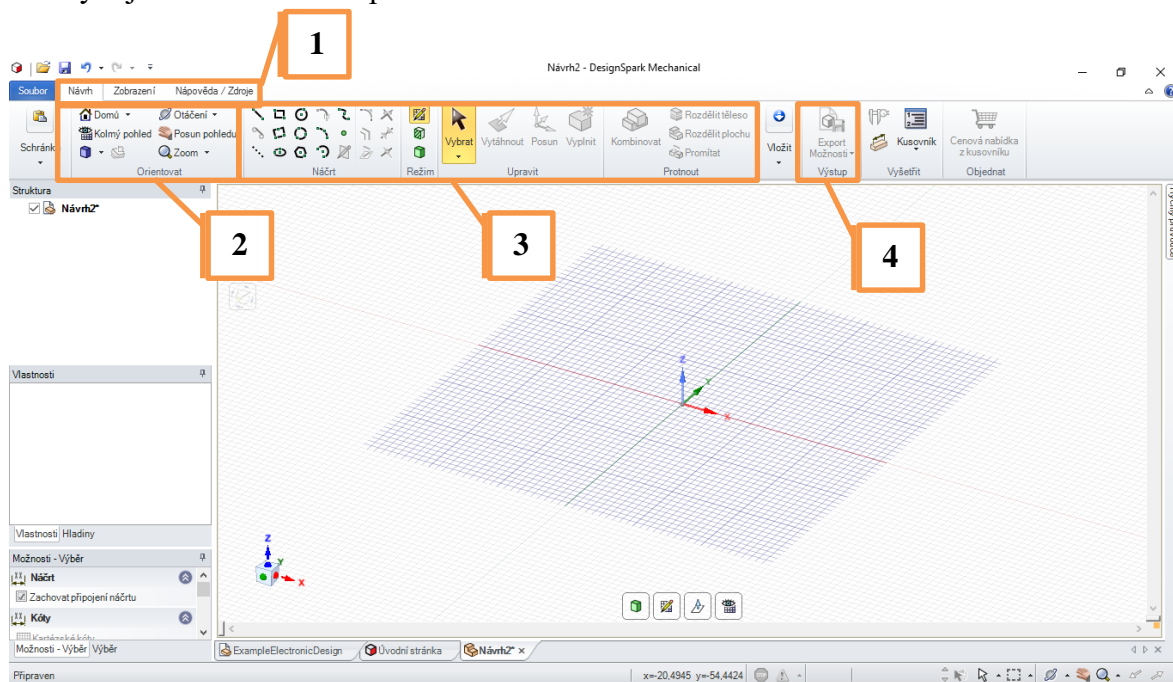
Obrázek 38: Program Google SketchUp

- 1 – ovládání programu a jeho nastavení, export vytvořeného objektu do formátu STL v záložce *File*
- 2 – nástroje kreslení
- 3 – nástroje modelování a posuvu objektu
- 4 – záložka umožňující měření, kótování a změnu barvy objektu
- 5 – změna pohledu na model
- 6 – uložení vlastního modelu do databáze, nebo načtení modelů od cizích uživatelů z databáze SketchUp



### 8.3 DesingSpark Mechanical

Po jednoduché registraci uživatel dostane pokročilý program určený pro 3D modelování. Program je zcela bezplatný a je možné ho použít i pro komerční účely. Program DesingSpark Mechanical je v českém jazyce jeho ovládání je intuitivní a uživatelské prostředí připomíná prostředí programu SolidWorks. Nejenom že umožňuje tvorbu elektronických modelů, ale i výkresů. Zakomponovaný převod do mnoha formátů včetně do STL verze. Osobně shledávám DesingSpark Model za jeden z nejlepších programů pro tvorbu modelů, s kterým jsem měl možnost pracovat.



Obrázek 39: Pracovní plocha DesingSpark Mechanical

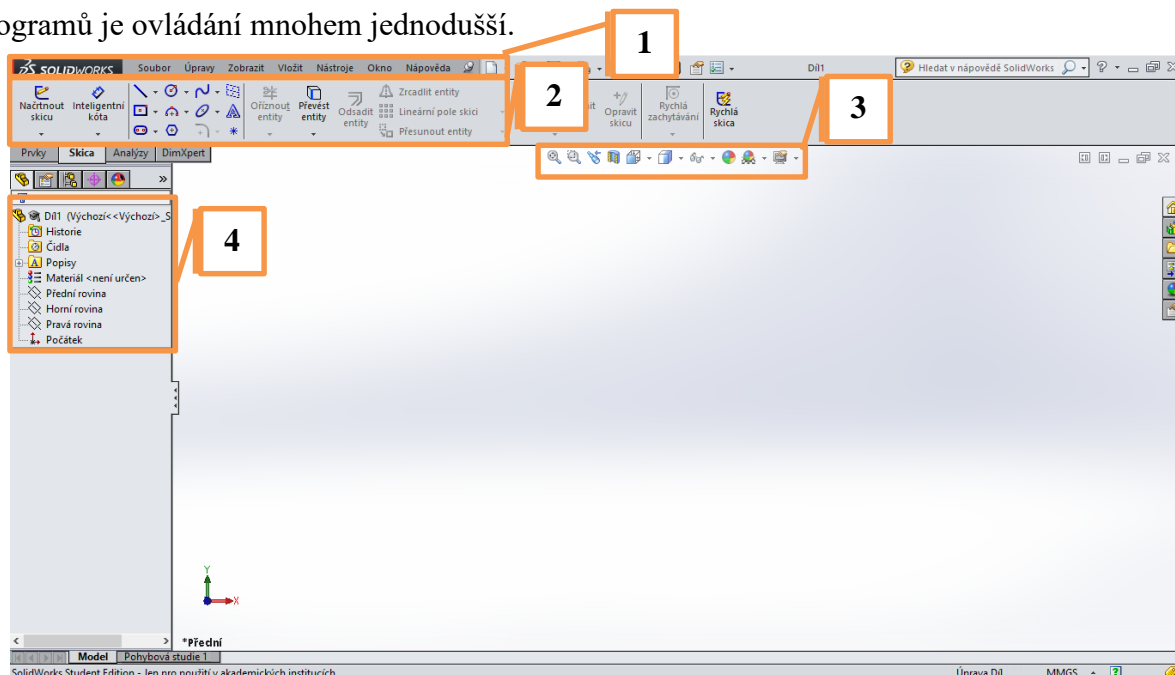
Popis prostředí programu:

- 1 – menu pro nastavení programu a přepínání mezi modelováním objektu a tvorbou výkresů,
- 2 – regulace pohledu na model, nebo výsledný objekt,
- 3 – nástroje 2D a 3D modelování,
- 4 – export do různých formátů.

## 8.4 SolidWorks

Americký producent programu vytvořil program SolidWorks, který se převážně využívá ve strojírenském průmyslu. SolidWorks je dostupný pouze v placené verzi, to považují pro modelování u běžného člověka a na základní škole nepřijatelné a nemyslitelné, aby platili za licenci. Program je pro uživatele přeložen do češtiny i nápověda je v češtině. Cena licence se pohybuje v řádech desetitisíců.

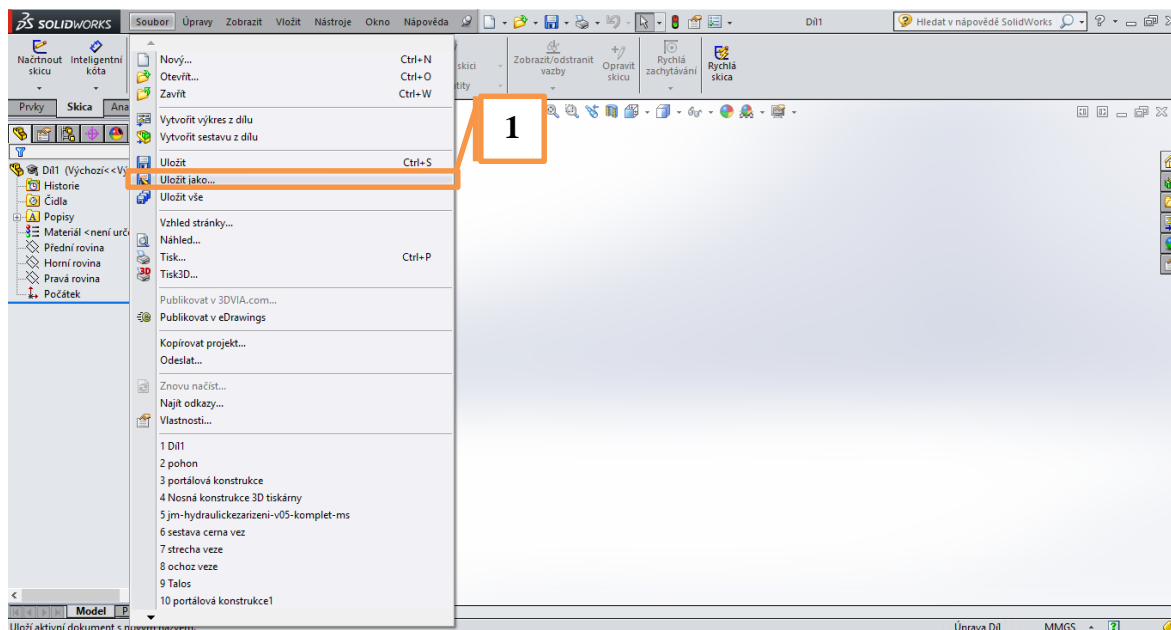
DesingSpark Mechanical vizuálně vychází z programu SolidWorks, avšak možnosti modelování modelů jsou propracovanější u SolidWorks (tažení po křivce, spojit profily atd.). Tyto nástroje a mnohé další podstatně ulehčí a zrychlí tvorbu modelů. I tvorba výkresů a sestav je na mnohem vyšší úrovni (vazby mezi objekty atd.). Distributor předpokládal využití programu pro 3D tisk a tak je v SolidWorksu zakomponováno velké množství formátů pro 3D tisk další formáty včetně formátu STL detailněji upravovat podle svých nároků. 3D tisk lze provést přímo z programu SolidWorks, avšak mně se tato funkce nepovedla zprovoznit společně s 3D tiskárnou MakerBot Replicator 2X. Program SolidWorks bych vyloženě nedoporučoval pouze pro tvorbu modelů na 3D tiskárnu. Získání znalostí tohoto programu zabere určitý čas, v předchozích případech programů je ovládání mnohem jednodušší.



Obrázek 40: Program SolidWorks - tvorba modelu, objektu

- 1 – položky pro ovládání programu SolidWorks, pokročilejší možnosti modelování (nástroje) a převod do různých formátů (soubor)
- 2 – nástroje pro tvorbu modelu
- 3 – regulace pohledu na model, nebo výsledný objekt
- 4 – postup modelování součástí

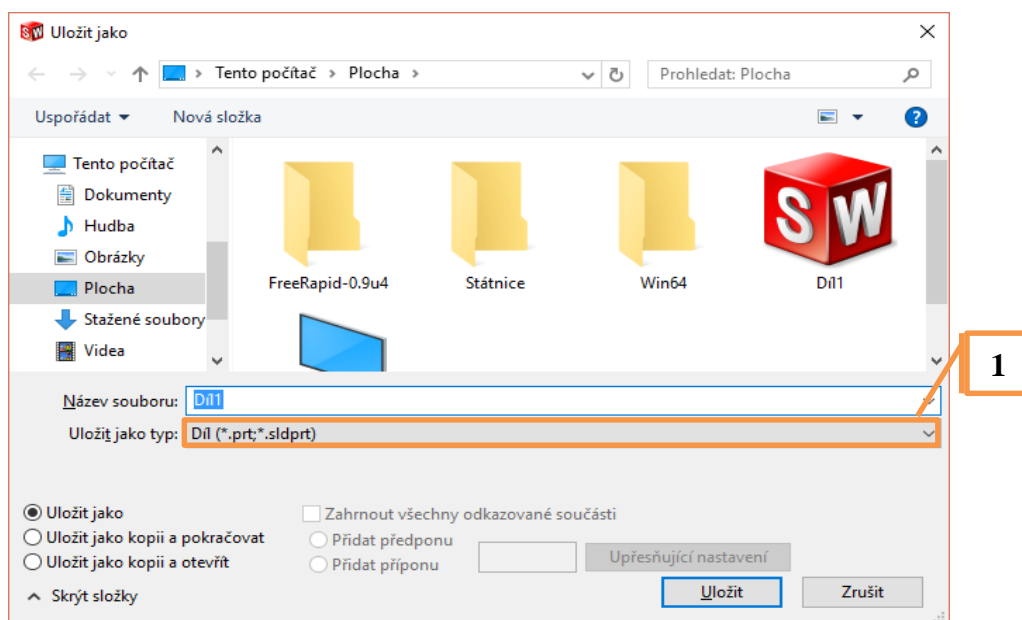
Jelikož je program SolidWorks používáný i na Pedagogické fakultě JU v Českých Budějovicích, bude ukázáno, jakým způsobem lze ovlivnit kvalitu tisku již při tvorbě modelu v programu SolidWorks.



Obrázek 41: SolidWorks - uložit jako

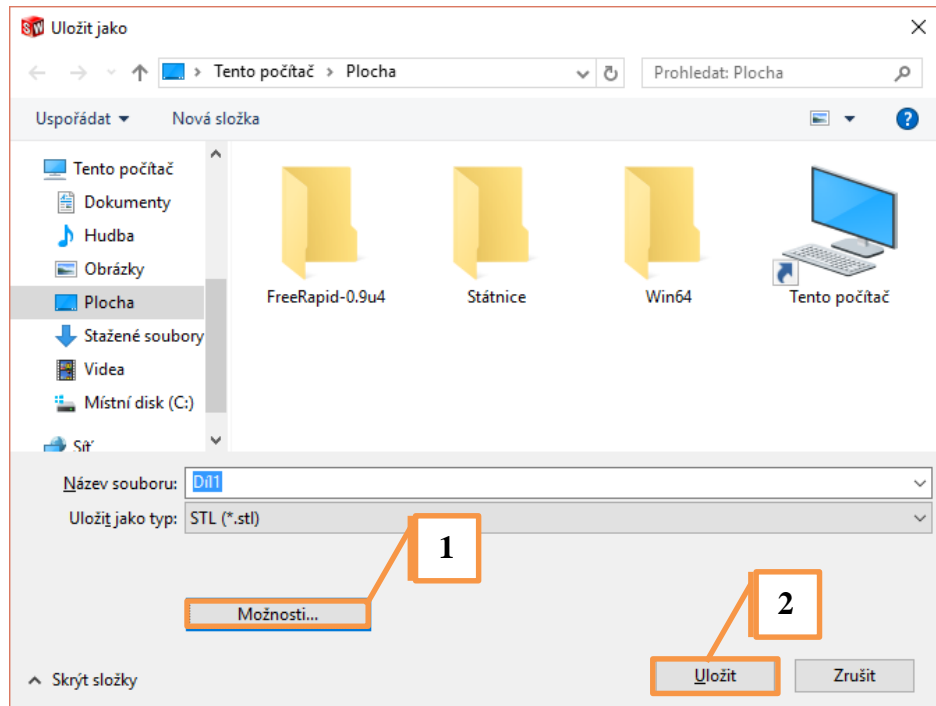
1 – Pro převod do STL formátu se ukazatelem myši přesune uživatel v programu SolidWorks a klikne do nástrojového menu *Soubor* a zde zvolí nabídku *Uložit jako...*

Poté se vytvoří nové dialogové okno, v kterém lze ovlivnit, do jakého formátu uživatel chce model uložit.



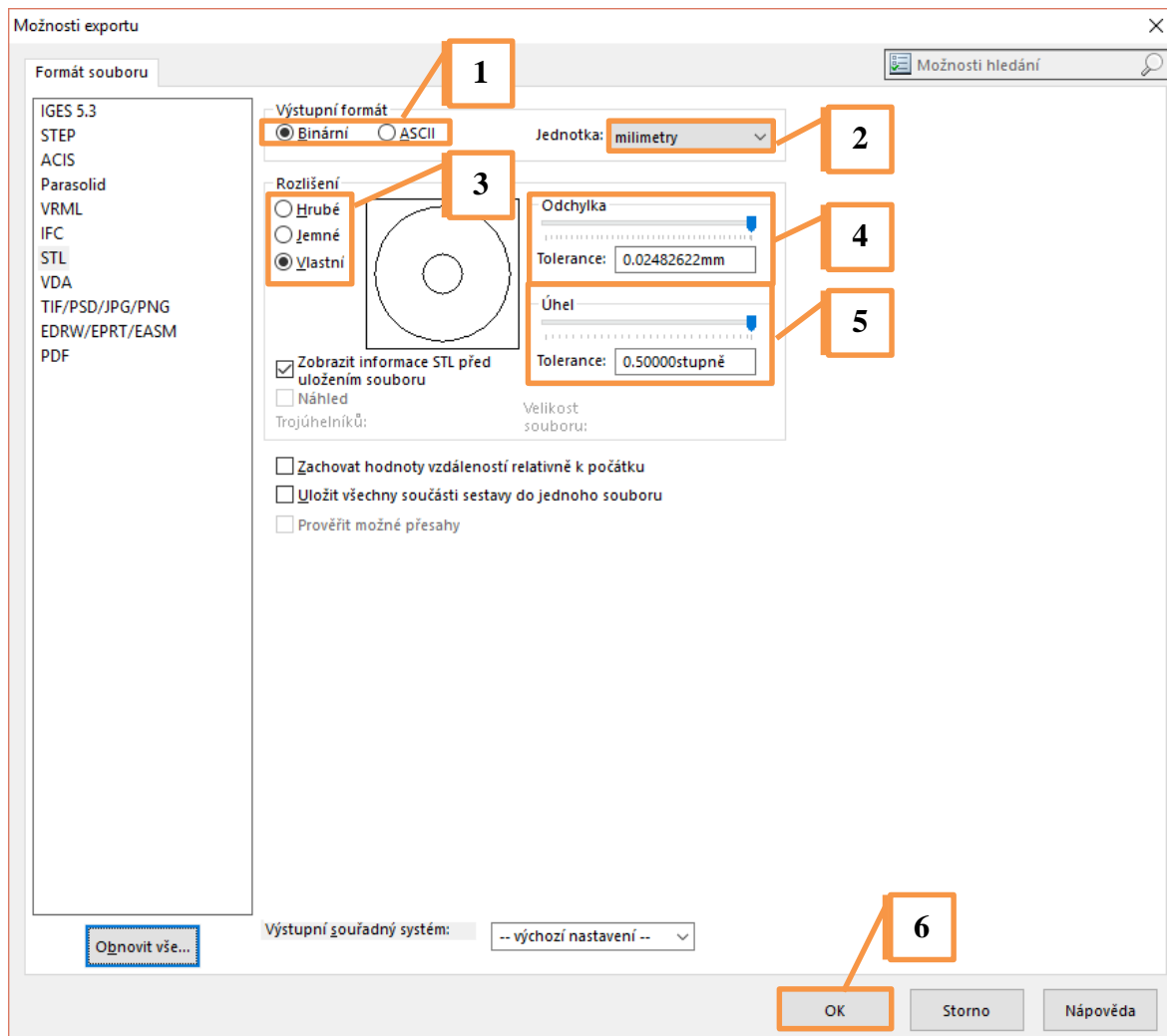
Obrázek 42: Dialogové okno s možností volby formátu

1 – volba formátu uložení



**Obrázek 43: Dialogové okno umožňující nastavení voleb pro formát STL**

- 1 – Možnosti umožňují nastavit kvalitu souboru pro 3D tiskárnu.
- 2 – Uživatel nemusí upravovat kvalitu vytvořeného modelu, pokud nechce a může model pouze uložit.

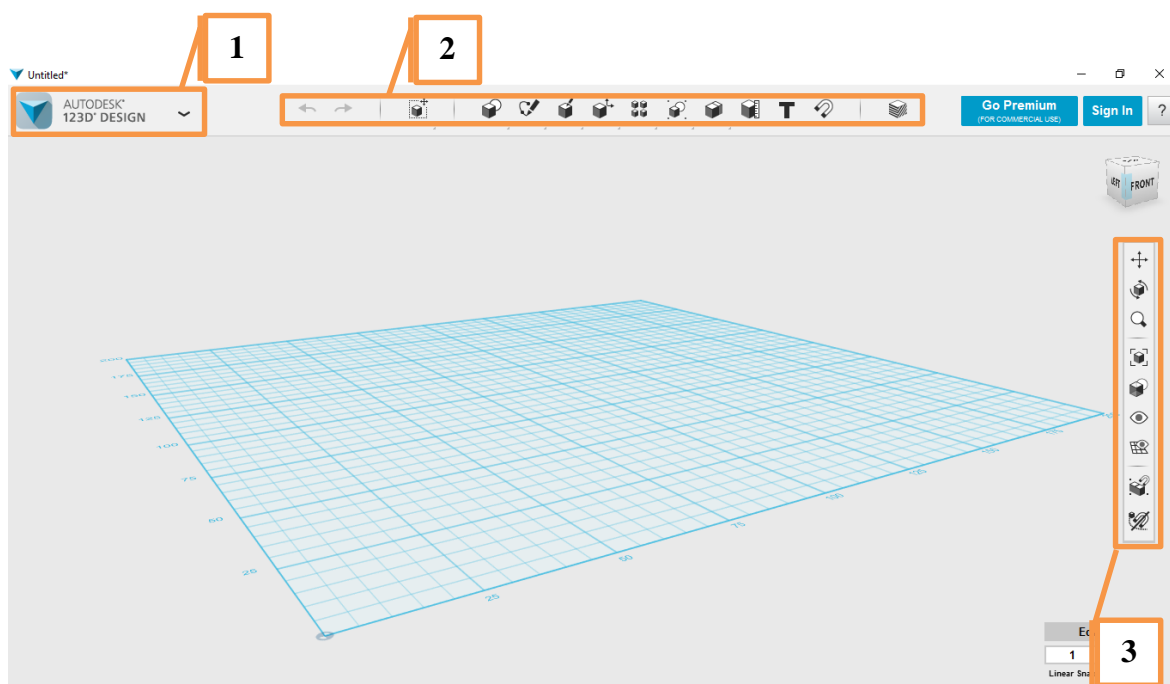


Obrázek 44: Optimalizace formátu STL v programu SolidWorks

- 1 – výstup formátu STL (více informací viz kapitola DP Využitelné formáty a software pro 3D tiskárnu MakerBot Replicator 2X)
- 2 – Jednotky, do kterých bude model následně konvertovaný.
- 3 – Kvalita rastru elektronického modelu, při zvolení položky *Vlastní* program uživateli dovoluje upravit volbu 4 a 5.
- 4 – toleranční odchylka rozměrů v milimetrech vymodelovaného modelu (nižší hodnota odpovídá vyšší přesnosti)
- 5 – toleranční odchylka úhlů ve stupních vymodelovaného modelu (nižší hodnota odpovídá vyšší přesnosti)
- 6 – potvrzení nastavených parametrů

## 8.5 Autodesk 123 Design

Autodesk 123 Design je volně dostupný (freeware) bez jakéhokoliv omezení pro uživatele. Po registraci uživatel získá prémiovou verzi, která mu zpřístupní použití modelu pro komerční použití. Modelovací program umožňuje tisk vytvořeného modelu přímo z programu libovolnou 3D tiskárnou bez nutnosti exportovat model do vhodného formátu (software obsahuje převod na STL formát). Veškeré ovládání a nápověda je v anglickém jazyce. Ovládání programu je navrženo v jedinečnosti a jednoduchosti. Distributor programu Autodesk 123 Design je oficiálně podporovaný firmou MakerBot pro jejich 3D tiskárny.



Obrázek 45: Okno programu Autodesk 123 Design

- 1 – menu pro export souboru do různých formátů a nastavení programu
- 2 – jednotlivé nástroje kreslení, např. přednastavené objekty, druhy materiálů, měřidlo, textura atd.
- 3 – regulace pohledů na model

## 8.6 Autodesk 123 Catch

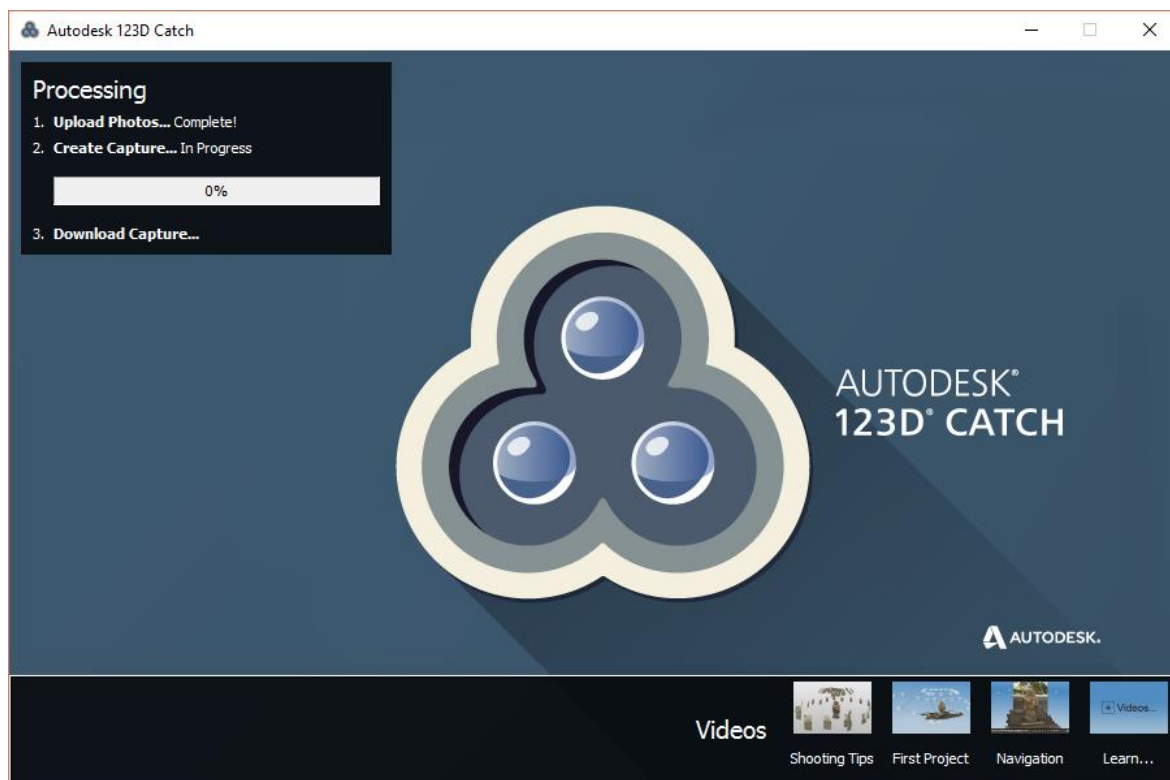
Program od firmy Autodesk je opět volně šiřitelný, avšak nejedná se o běžný 3D modelovací software, které jsem doposud popisoval. Zvláštností tohoto programu je možnost vytvoření 3D elektronického modelu ze série fotek a následné vytištění elektronického modelu na 3D tiskárně. Tvorba modelu pomocí fotografií má určité zákonitosti, které je třeba dodržet. Jak postupovat při práci s programem Autodesk 123 Catch je možné získat v oficiální i neoficiální nápovědě na serveru Youtube.

Fotografie byly vytvořené na telefonu Lenovo P70 a fotoaparátem Nikon D3200 a následně poslány do programu. Autodesk 123 Catch fotografie zpracovával a po určité době nahlásil chybu, že model nelze vytvořit. Program je dostupný i pro mobilní telefony. Testování v mobilních telefonech proběhlo na systému Android ve dvojici telefonu LG Nexus 4 a Lenovo P70 ani v jednom případě se nepodařilo vytvořit elektronický model. Ve všech případech došlo k nahlášení stejné chyby jako na PC. Na mnoha webových fórech týkající se 3D grafiky lze vyčíst negativní reakce od uživatelů, tudíž se přikláním k názoru, že program za běžných podmínek prezentovaných v instruktážním videu nepracuje.

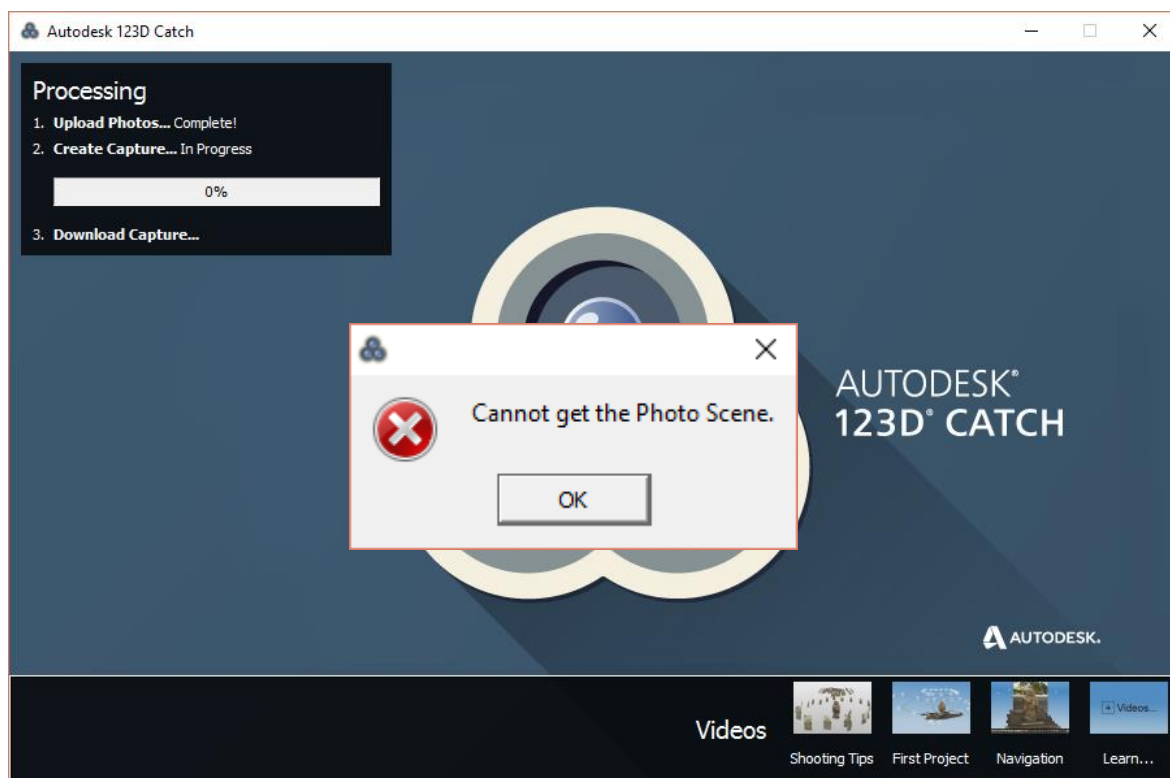


Obrázek 46: Plocha pro výběr činnosti v programu Autodesk 123Catch

- 1 – Vytvoření nového projektu z vlastních fotografií.
- 2 – Výběr z cizích uložených elektronických modelů v internetové databázi Autodesku, případně volba pro pokračování na vlastním již započatém projektu (program přesune uživatele do volby 3).
- 3 – Nástroje pro úpravu vytvořených (cizích, nebo vlastních) modelů
- 4 – Oficiální nápověda, jak pracovat s programem (přesměrování na server Youtube).



Obrázek 47: Snímek průběhu procesu vytváří elektronického modelu – Autodesk 123 Catch



Obrázek 48: Chyba vyskytující se ve všech mnou zkoušených případech



## 9 Problematika a zásady 3D tisku s tiskárnou MakerBot Replicator 2X

Kapitola bude pojednávat o problematice kvality 3D tisku metody FDM a přímo pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X a řešení určitých komplikací, které mohou nastat během tisku.

- limity a omezení tiskárny,
- zásady tvorby a použití elektronického modelu,
- umístění modelu do tiskárny,
- malá přilnavost modelu na podložce,
- volba kvality tištěného modelu,
- dodatečné úpravy modelu.

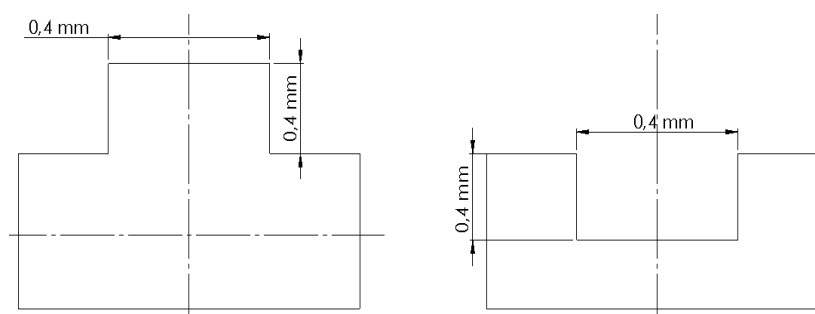
### 9.1 Limity a omezení 3D tiskárny

- **Malé objekty** – drobné objekty musí být tištěny o něco nižšími teplotami než větší objekty. V jiném případě by docházelo k „přetavování“ částí objektu a kvalita se rapidně snížila. Teplota se mění v závislosti na výsledné kvalitě modelu, neexistuje pravidlo, které by sloužilo k přesnému nastavení teploty. Dle mých zkušeností pro menší modely stačí teplota vyhřívané podložky v rozmezí 80 ÷ 100 °C, vyšší teploty podložky při tištění drobných modelů příliš ohřívají vytištěný model a může dojít k jeho deformaci.

V některých případech drobných modelů nebyla tiskárna Replicator 2X s programem MakerBot Desktop schopná ponechat modelu potřebný čas na vychladnutí právě vytištěné vrstvy a při tisku další vrstvy došlo ke zkroucení modelu. V takovýchto případech jsem vložil v programu tištěný model 2x na stavěcí platformu a model byl vytištěný 2x, kvalita byla odpovídající elektronickému modelu. Objekt minimálního rozměru pro tisk je 3 mm x 3 mm x 3 mm (s tryskou o průměru 0,4 mm).

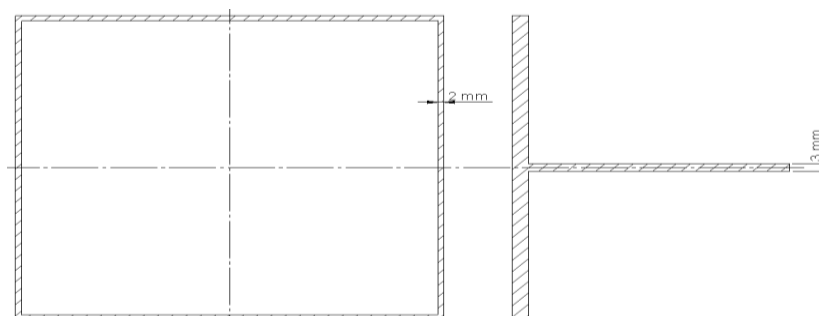
- **Použití raftu** – raft je vhodné použít v případě, že objekt je tvořený rozlehlou základnou a následně by objekt byl obtížně oddělitelný od vyhřívané podložky. Raft je schopný „pojmout“ určité nerovnosti (např. kaptonové fólie) namísto objektu. Avšak kvalita spodní vrstvy s raftem je nižší, než při tvorbě modelu bez raftu.

- **Velké objekty** – v závislosti na předchozím bodě je potřeba pro rozměrnější objekty volit vyšší teploty, než je teplota malých objektů. Teplotu podložky jsem volil v rozmezí od 110 ÷ 130 °C. Maximální rozměry objektu, který lze tisknout udává výrobce MakerBot 246 mm x 163 mm x 155 mm. Avšak reálné možnosti v osách X, Y jsou o něco málo nižší, protože extrudér nedosáhne okraje vyhřívané stavěcí platformy – boční vozík se v krajní poloze založí o uložení kladky (osa Y).
- **Minimální tisknutelný rozměr** – u tiskárny MakerBot Replicator 2X se mi jako minimální rozměr tisknutí ukázal jako 2 ÷ 3 milimetrový otvor, nebo kulatina stejného průměru. Kvalitu otvorů, nebo kulatiny lze ovlivnit orientací v prostoru. Nejlepší kvality se dosáhne ve vertikálním umístění modelu. Kvalita provedených otvorů, kulatin byla přijatelná pouze v nejlepším nastavení tisku. Kvalitu lze ovlivnit i výměnou trysky, avšak firma MakerBot ve svém e-shopu neumožňuje koupit trysky s menším průměrem. Mnoho neoriginálních trysek je možné získat na různých internetových obchodech.
- **Detaily** – program MakerBot Desktop v záložce Model Properties odkazuje na položku Coarseness, kde lze pro program nastavit, jak drobné detaily mají být na modelu vykresleny, avšak při nastavení minimální hodnoty tiskárna MakerBot Replicator 2X zvládne vykreslit detaily větší než 0,4 mm v přijatelné kvalitě.



Obrázek 49: Nákres minimálních rozměrů detailů pro kvalitní 3D tisk

- **Tenkostěnné modely** – tenkostěnné modely vykazují stejné omezení jako objekty s minimálním tištěným rozměrem a malé objekty. Tisk závisí na parametrech tiskárny a to především na parametrech trysky, ve 3D tiskárně MakerBot Replicator 2X je dodávaná tryska o průměru 0,4 mm. Vhodné rozměry pro tenkou stěnu jsou 0,4 mm, 0,8 mm atd. Při návrhu elektronického modelu je třeba volit vhodné násobky průměru trysky 3D tiskárny. V případě vytištění stěny o tloušťce např. 0,6 mm musí tryska vytlačit více materiálu, případně doplnit materiál v dalším tahu.



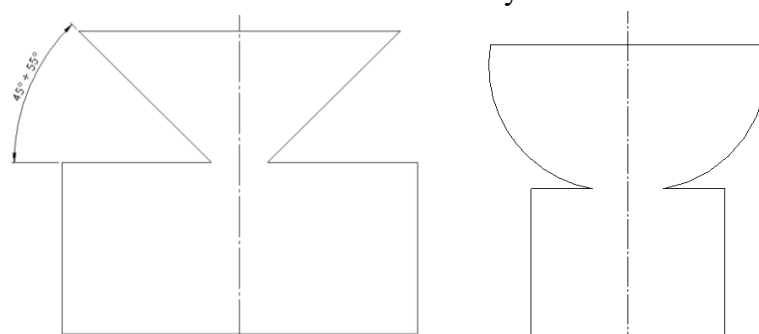
Obrázek 50: Doporučené minimální rozměry tenkostěnných modelů

Pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X doporučuji minimální tloušťku stěny 2 mm u stěny, která je podepřena alespoň ve dvou, nebo více bodech. Nepodepřenou stěnu alespoň o tloušťce 3 mm. Toto doporučení je pouze informativní, stěny lze tisknout i tenčí stěny, ale při manipulaci, obrábění s objektem často dojde k poničení výrobku. Velké objekty s tenkou stěnou jsou náchylné k tzv. warpingu. Jedná se o zkroucení některých vrstev modelu.

- **Přesnost objektů** – tato problematika se netýká pouze tiskárny MakerBot Replicator 2X, avšak je začleněna do metody FDM. Výrobky, které mají mít přesné rozměry, je vhodné vytvořit s určitým přesahem, jelikož 3D tiskárna vlivem mnoha faktorů tiskne v rozmezí  $\pm 0,1$  mm od požadovaného rozměru. Velikost tolerance závisí na kvalitě seřízení 3D tiskárny. Případně se model s přesahem může obrobit pomocí dokončovacích způsobů upravit na požadovaný rozměr.

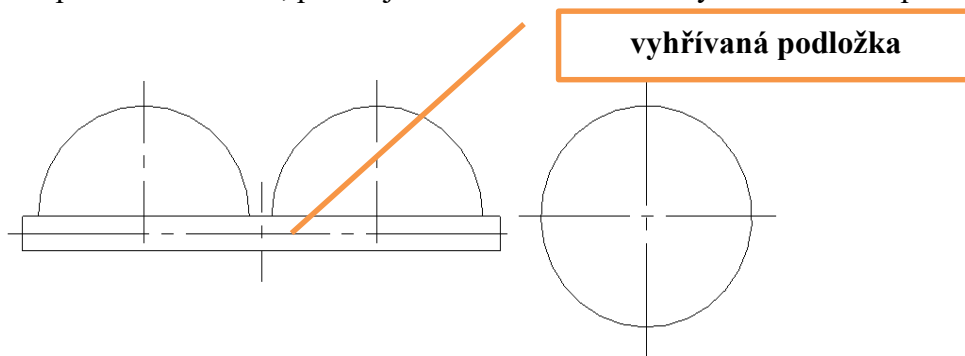
- **Převíslé, zkosené a zaoblené objekty** – při tvorbě mostů je třeba v některých případech vytvořit pro model podpurné konstrukce. Při návrhu modelu je třeba minimalizovat počet a vzdálenost, kterou extrudér musí urazit bez podpor. Platí pravidlo, že pro jakoukoliv převíslou zkosenou část objektu svírající úhel větší, než  $45^\circ$  je vhodné doplnit podpurnými konstrukcemi pro minimalizování obtíží tisku. Tisknout bez podpor je možný až přibližně do úhlu  $55^\circ$ , avšak kvalita je nižší, než s podpurnými konstrukcemi.

Oblé stěny vykazují podobné obtíže jako zkosené hrany – nejvíce problémový je tisk oblých stoupajících ploch, např. model vázy. V tomto případě je potřeba model orientovat vrchní stranou na dno tiskárny.

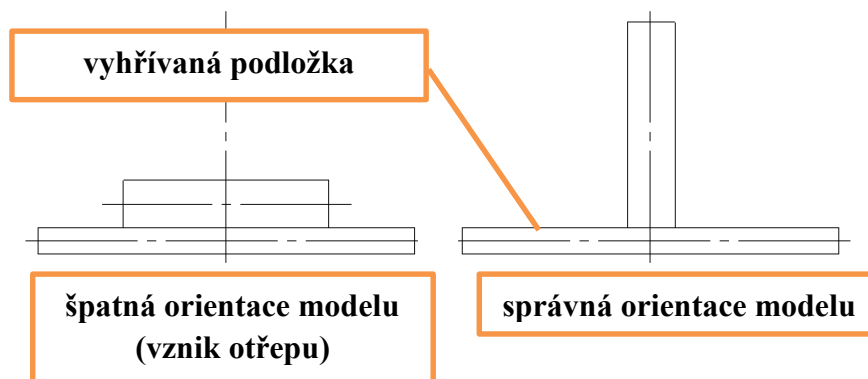


Obrázek 51: Objekt se zkosenými a oblými hranami

- **Otřep** – je nevhodný útvar, který se většinou vyskytuje u součástí typu koule, válec atd. Kouli je vhodné rozdělit na dvě poloviny a následně spojit dohromady. Otřep u válce vznikne, pokud jako základnu uživatel vybere válcovou plochu.

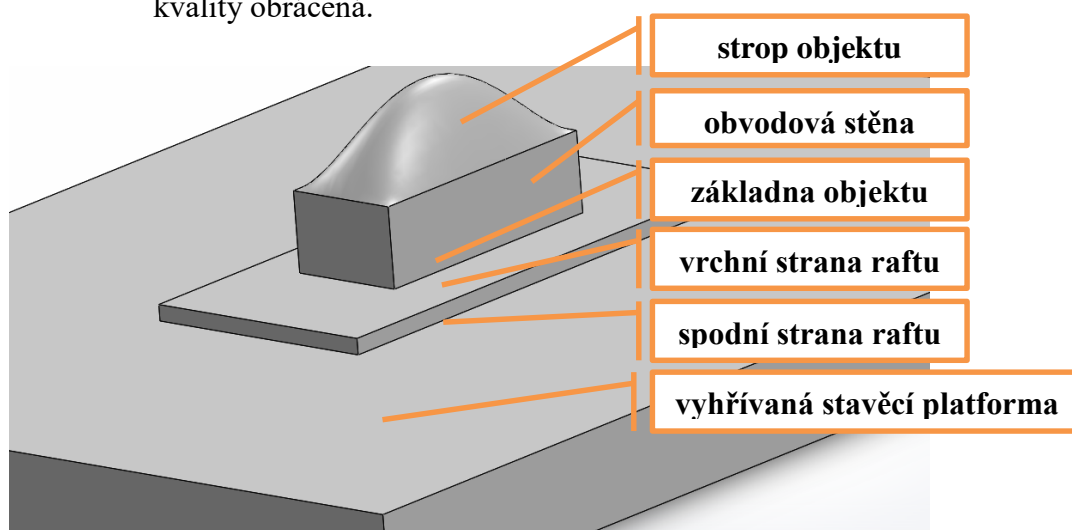


Obrázek 52: Eliminace otřepu u koule na vyhřívané podložce a následné spojení koule



Obrázek 53: Eliminace otřepu u válcové součásti

- **Kvalita stěn** – Stěny objektu mají rozdílnou jakost povrchu, celý předmět není stejné kvality, toto je třeba si uvědomit již při orientování modelu do prostoru tiskárny.
  - Základna objektu nabývá rozdílné kvality v závislosti, zda je pod modelem umístěný raft, nebo není. Pokud „sedí“ model na raftu, jakost spodní strany modelu je vždy o něco nižší. V případě tisku objektu přímo na vyhřívané podložce kvalita spodní strany převyšuje vrchní stěnu.
  - Na vnějších obvodových (vertikálních) stěnách je vidět proces tvorby objektu (jednotlivé vrstvy předmětu). To se považuje za nevýhodné, pokud uživatel chce vytvořit estetický model. Rozměry obvodových stěn jsou nejpřesnější.
  - Strop objektu dosahuje vyšší kvality v porovnání se základnou modelu – při tisknutí s raftem, v případě tisku spodních vrstev modelu bez raftu je kvalita obrácená.



Obrázek 54: Předmět na vyhřívané podložce

Kvalitu lze ovlivnit nejenom orientací modelu na vyhřívané podložce, výškou vrstvy materiálu, ale i snížením rychlosti času [mm/s]. Platí zásada – při nastavení malé výšky vrstvy, např. 0,05 mm snížit rychlost tisku alespoň na  $\frac{1}{2}$  přednastavené hodnoty. Lze tak dosáhnout preciznějšího tisku, avšak na úkor časové náročnosti.

Dále platí, že mezera mezi extrudérem a vyhřívanou podložkou by měla být ve velikosti  $\frac{3}{4}$  plánované výšky vrstvy. Před každým tiskem by se měla mezera seřídit dle potřeby aktuálního modelu.

Již několikrát bylo zmíněno v diplomové práci, trysky o menších průměrech lze sehnat na různých e-shopech, které jsou vhodnější pro tisk estetických modelů, např. trysku o průměru 0,1 mm. Běžně se tyto trysky nevyužívají, jelikož při jejich použití vzrůstá čas potřebný pro tisk.

## 9.2 Zásady tvorby a použití elektronického modelu

Kapitola Zásady tvorby elektronického modelu se částečně prolíná s kapitolou Limity a omezení 3D tiskárny. Je třeba neustále dbát na to, aby jednotlivé prvky modelu byly pro tiskárnu vytisknutelné v přijatelné kvalitě a času.

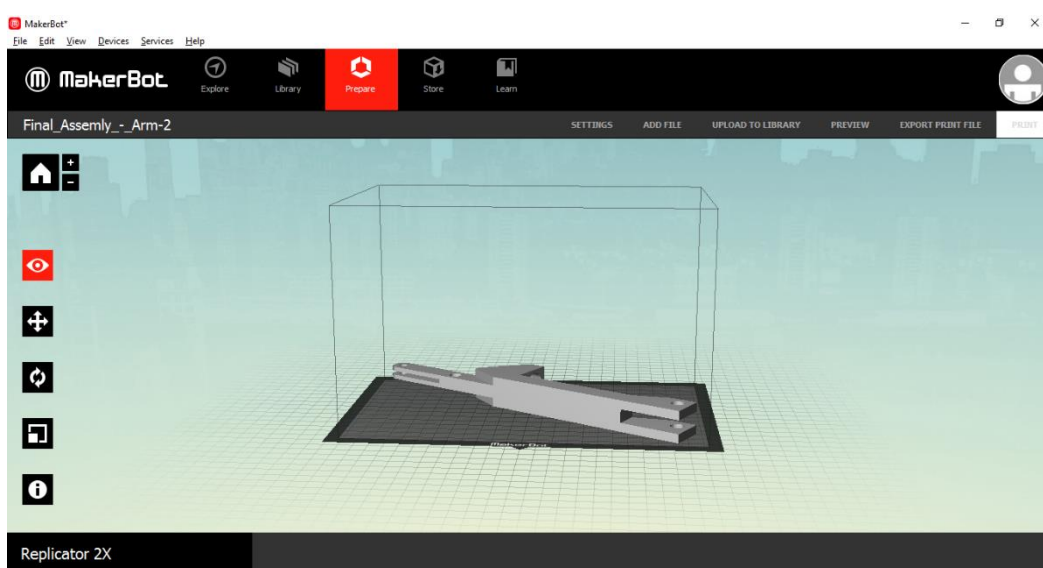
- **Maximální rozměry elektronického modelu** – uživatel občas potřebuje vytisknout model v nadlimitní velikosti, kterou tiskárna umožňuje, je třeba dobře uvážit, jak model dimenzovat, aby byl následně snadno spojitelný (např. kyanoakrylátovými lepidly) a tisknutelný. I když jde model vytisknout v jednom kroku, je tvarově náročný (např. Černá věž) a tisk trvá v řádech hodin, může nastat během tisku chyba (nejčastěji zanešení extrudéru filamentem), proto je vhodné rozdělit objekt do několika modelů a chránit se před vznikem chyby, aby celý tisk nebyl pouze ztrátou času a peněz. I když tiskárna MakerBot Replicator 2X dle výrobce umožňuje tisknutí modelu v prostoru o maximálních rozměrech 246 mm x 163 mm x 155 mm, avšak konstrukce nedovoluje extrudérům dostat se až do krajní polohy vyhřívané podložky.
- **Minimální rozměry elektronického modelu** – v modelovacím programu není problém vytvořit různé tenkostěnné prvky, které na sebe navazují a vzájemně se prolínají, avšak 3D tiskárna neprovede tisk v uživatelem požadované kvalitě. Jedná se o různé tenké stěny (fólie), pruty (sloupky) a jemné detaily modelu.
- **Uzavřená plocha** – na internetových databázích je k sehnání mnoho elektronických modelů od cizích uživatelů. Ale z mé zkušenosti vyplývá, že modely nejsou vždy správně přečteny programem MakerBot Desktop, anebo obsahují trhlinu v „uzavřené“ ploše. V takovém případě je potřeba je načíst do modelovacího programu a opravit detekovaný problém pomocí nástrojů programu. Za nespornou výhodu je považováno nahrát model do modelovacího 3D programu, který automaticky detekuje, zda jsou plochy modelu v pořádku. Program MakerBot Desktop nehlásí neuzavřené plochy a pracuje s nimi jako by chybu neobsahovaly, ale ve výsledku nebude model správně vytištěný.
- **Spoření času tisku** – některé modely je vhodnější vytisknout po jednotlivých částech a spojit právě kyanoakrylátovým lepidlem, než model tisknout jako celek,
- **Tvorba pohyblivého modelu** – při tisknutí pohyblivých součástí, např. řetěz, ložisko je vhodné ponechat mezeru mezi pohyblivými částmi alespoň 0,7 mm pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X, aby nedošlo ke spojení pohyblivých částí.

### 9.3 Umístění modelu do tiskárny

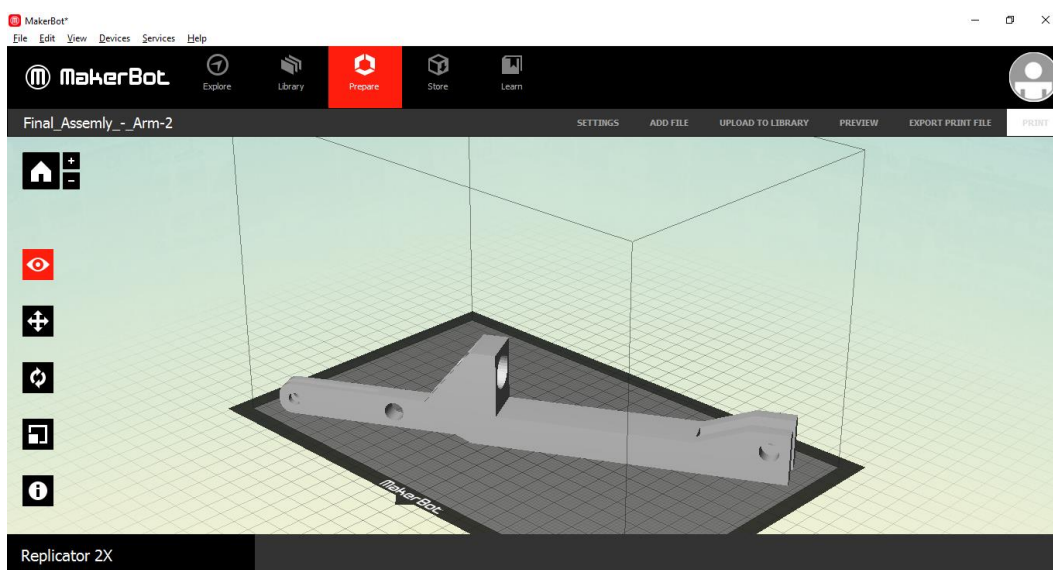
Nejenom nastavením parametrů v programu MakerBot Desktop lze ovlivnit kvalitu objektu, ale i umístěním modelu do 3D tiskárny určuje výslednou kvalitu povrchu. Je třeba si rozmyslet účel modelu. Funkce modelu může být následující:

- pracovní funkce,
- estetická funkce.

Pokud má plnit model pouze pracovní funkci, není třeba se vyloženě zabývat výslednou jakostí povrchu. Jedná se mnou zkoušené modely např. model převodovky, hydraulický nakladač atd., kdy musí být model orientován tak, aby tiskárna nemusela tvořit značné množství podpůrných struktur a zbytečně prodražovat tisk modelu a dobu tisku.

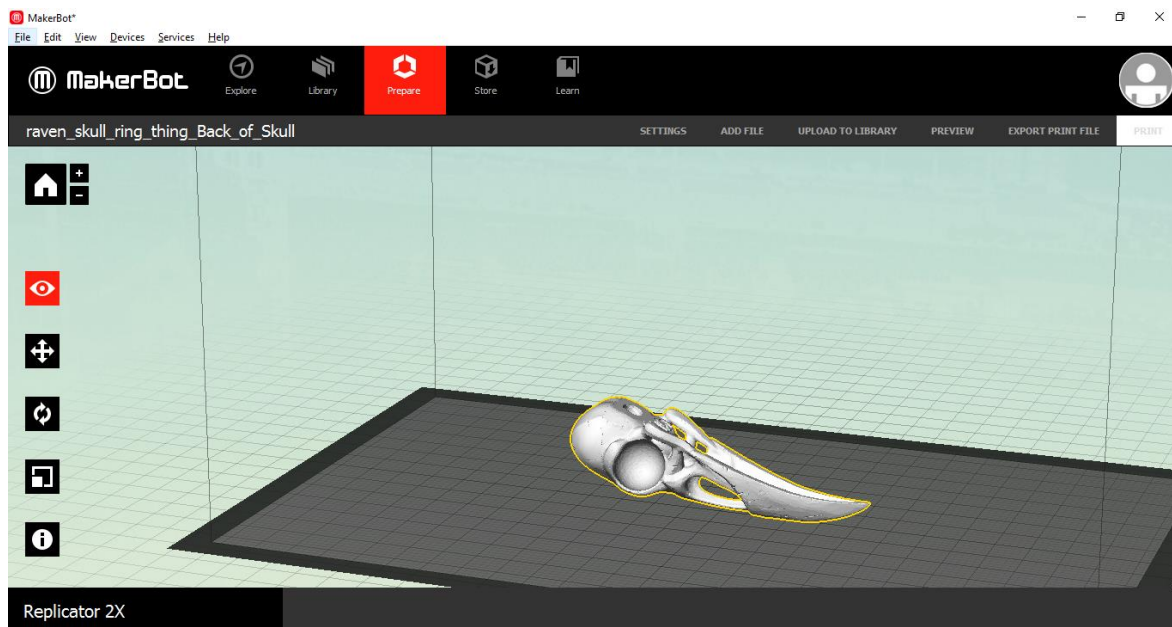


Obrázek 55: Nevhodná orientace modelu v prostoru tiskárny v důsledku výstavby většího množství podpůrných kostrukcí, doby tisku a menší tuhosti základny modelu v závislosti na podporách

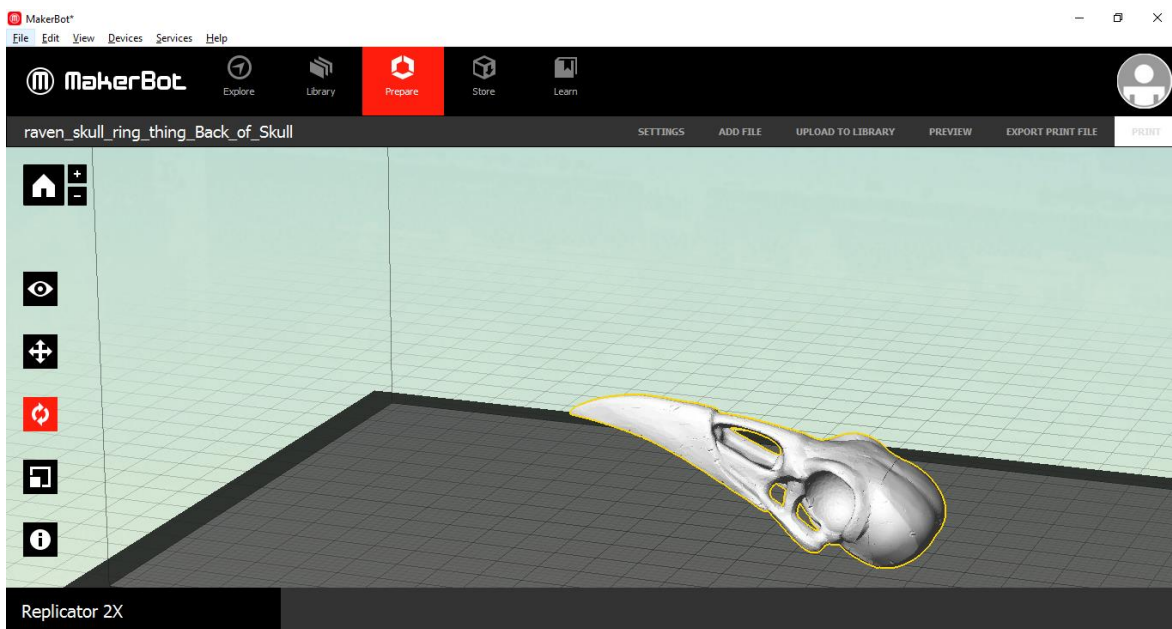


Obrázek 56: Správná orientace modelu – odstranění vyjmenovaných nedostatků v obrázku 55

Estetická funkce modelu je výrazněji náročnější na jakost výsledného povrchu. Pokud se uživatel snaží získat kvalitní povrch pro daný model je vhodné model orientovat tak, aby pohledová strana nebyla základnou raftu nebo vyhřívané podložky. Lze tak dosáhnout dostatečně kvalitního povrchu i bez potřebných dodatečných úprav modelu.



Obrázek 57: Nevhodná orientace estetického modelu - nízká kvalita pohledové strany



Obrázek 58: Správná orientace estetického modelu - vyšší kvalita pohledové strany



## 9.4 Malá přilnavost modelu na podložce

Tiskárna MakerBot Replicator 2X je schopná tisknout z filamentu ABS a PLA, avšak při zpracovávání diplomové práce jsem pracoval pouze s materiálem ABS. Tudíž doporučení pro dobrou přilnavost bude platit pouze pro materiál ABS. Pro lepší adhezi se doporučují následující postupy:

- kaptonová fólie,
- acetonový roztok s ABS,
- lepidlo,
- lak na vlasy.

Předměty, které jsou právě vytištěné, je výhodné nechat zchladnout na teplotu okolo  $50 \div 70$  °C a poté jdou snadněji oddělit. Oddělování je vhodné provádět z více stran objektu, z důvodu menší deformace objektu a např. kaptonové fólie.

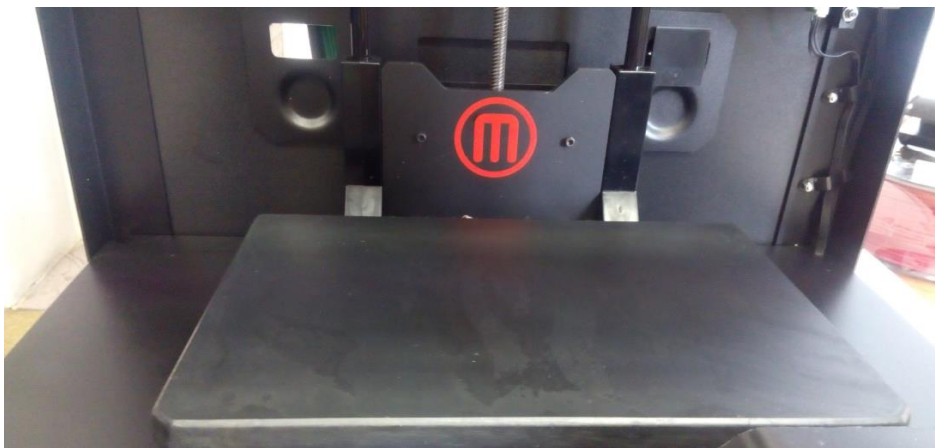
**Kaptonová fólie** – je tvořená polyamidovými vlákny, které jsou získávány z ropy. Pro své výhodné vlastnosti je využíváný v oděvním, elektrotechnickém průmyslu a mnoho dalších. Pro 3D tisk je vhodný především z důvodu odolnosti vyšších teplot (do 300 °C) a vynikající tepelné vodivosti  $0,46 \frac{W}{m \times K}$  již při nižších teplotách v provedení tenké fólie.

Kaptonovou fólii je možné získat v provedení nastříhaných tenkých fólií mnoha rozměrů, např. pro tiskárnu Replicator 2X v rozměrech 175 mm x 260 mm. Avšak je k dispozici v rolích. Vždy při aplikaci nové kaptonové pásky je třeba upravit mezeru mezi vyhřívanou podložkou a tryskami, jelikož se nepatrně mezera změní. Následně se na očištění plošiny po tisku používá především aceton. Kaptonová fólie se snadno poruší, a tak je potřeba při tisku objekty, které se obtížněji odtrhávají opatrně oddělit. Nevhodné je tak používat nože, špachtle a jiné ocelové ostré předměty. Výhodnější je užití plastových dílců s malým úhlem, např. stěrky na fólie, nebo na automobil (oškrabování oken).

Kaptonovou fólii je možné na vyhřívanou podložku aplikovat dvěma způsoby:

- suchý způsob,
- mokrá způsob.

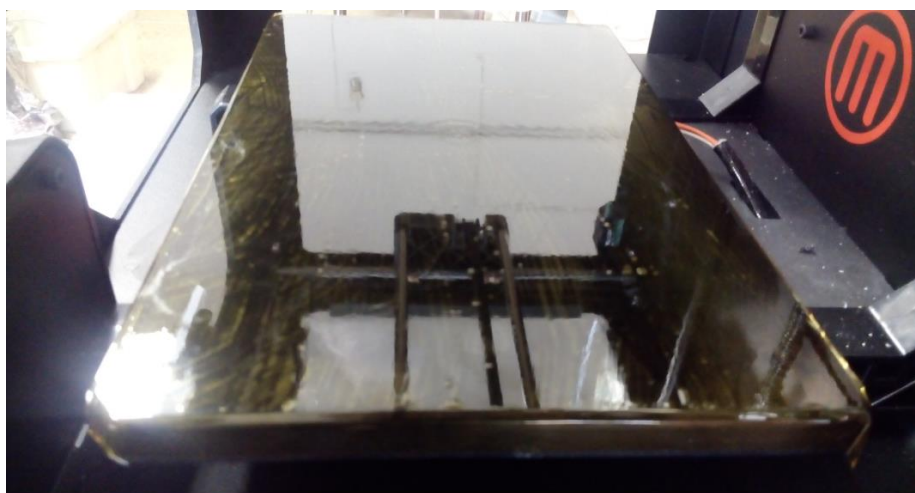
Suchý způsob: vyhřívaná podložka musí být kompletně čistá a odmaštěná od jakýkoliv nečistot. Pro tento účel je vhodné použít líh, nebo aceton a následně omýt vyhřívanou podložku jarovou vodou. Líh i aceton se rychle odpařují, nejnáze se nanáší pomocí vatového tampónu. Poté se navíc vyhřívaná podložka umyje čistou vodou a osuší bavlněným hadrem. Nedoporučuji dotýkat se podložky prsty, jelikož mastnota z prstů nenapomáhá lepší přilnavosti kaptonové fólie.



**Obrázek 59:** Pohled na očistěnou stavěcí platformu 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X

Poté se sloupne ochranná vrstva, která chrání lepidlo nanesené na kaptonové fólii. Začátek kaptonové fólie se rovně přilepí na vyhřívanou podložku, velká část fólie se drží zhruba pod úhlem 45°, ochranná fólie se postupně odlepuje a např. plastovou škrabkou se od středu vyhlazuje směrem do kraje s minimálním počtem „bublinek“.

Takto se postupuje až do konce kaptonové fólie. V případě vytvoření menšího počtu „bublinek“ je možné bublinku propíchnout ostrým předmětem a hadříkem vyhladit.



**Obrázek 60:** Nanesená čistá kaptonová fólie

Mokrý způsob: postup přípravy očištění je stejný jako u suchého způsobu (odmaštění a čistota podložky). Odmaštění se provede též acetonem, nebo lihem. Poté se očistí vyhřívaná podložka od lihu čistou vodou. Menší množství jaru se přimísí do vlažné vody a promíchá. Následně se houba na mytí nádobí namočí do jarové vody a jarová voda se aplikuje na vyhřívanou podložku. Na podložce se vytvoří tenký film jarové vody. Neprodleně je třeba pracovat s kaptonovou fólií (odstranění ochranné fólie a její lepení na podložku). Jelikož se na podložce vytvořil tenký film jarové vody a fólie se postupně pokládá na vyhřívanou podložku, nepřilepí se ihned, ale až po odpaření jarové vody. Mezitím je možné pomocí stěrky vyhladit povrch kaptonové fólie.

**Acetonový roztok s ABS** – v některých případech objekt neudrží pouze na kaptonové fólii, ale je třeba zvýšit adhezi. V tomto případě se připravuje roztok, kdy se v různých poměrech acetonu a plastu ABS. Pokud je roztok příliš koncentrovaný, obtížněji lze následně předmět oddělit od kaptonové fólie a může dojít k jejímu poškození. Naopak je-li roztok málo koncentrovaný, mívá se svojí funkcí a objekt se oddělí od podložky. Mnou připravovaný roztok jsem vytvářel v poměru 150 ml acetonu a přibližně 60 cm filamentu. Zbytky filamentu je potřeba odstranit po chemické reakci mezi strunou a acetonem. Roztok se zabarví do barvy filamentu. Následně jsem roztok uzavřel do skleněné nádoby, abych nemusel při každém tisku znovu roztok tvořit.



Obrázek 61: Koncentrovaný roztok acetonu a filamentu ABS

**Lak na vlasy** – se nabízí jako alternativa pro přilnutí modelu k vyhřívané podložce. Na webových stránkách lze sehnat přímo speciální lak pro 3D tisk – Dimafix. Lze použít i obyčejný lak na vlasy, který obsahuje hnací plyn, polymery, alkoholy a další doplňkové látky. V nádobě spreje je obsažen hnací plyn společně s polymery a alkoholy v kapalné formě, přes vypouštěcí ventil opouštějí nádobu a následně se vytváří aerosolovou směs, která usychá a vytváří pevnou plastickou a průhlednou vrstvu. Toho se právě využívá pro potřebnou adhezi součástí na vyhřívané podložce.

Je třeba mít na paměti, že se jedná o hořlavinu a látku, která může být zdraví nebezpečná, a tak je rozumně manipulovat se sprejem i jeho obsahem:

- neumisťovat do blízkosti horkých předmětů,
- nemanipulovat se sprejem v blízkosti otevřeného ohně,
- nevystavovat nádobu ani obsah teplotám vyšších než 45 °C,
- aplikovat v dobře větraných prostorech,
- používat ochranné pracovní pomůcky,
- v případě zasažení některých částí těla (např. očí) neprodleně omýt vodou a při přetrvávajících potížích vyhledat lékaře.

Postup aplikace spreje na vyhřívanou podložku je následující:

- platforma by měla být čistá – odmaštěná, bez zbytků předchozího výrobku,
- stavěcí platforma by měla být studená – aplikace při pokojové teplotě,
- sprej je nutné aplikovat rovnoměrně ze vzdálenosti zhruba 20 cm při minimálním počtu tahů,
- následně se chvíli posečká, až dojde k odpaření alkoholu a dalších nepotřebných látek,
- schopnost adheze výrobku se zkouší prstem v místech, kde nebude umístěna součást,
- podložka by měla být lepkavá a připravená k použití.

Nyní je možnost k přikročení k samotnému tisku. Objekt by se měl po dokončení tisku samostatně oddělit od vyhřívané podložky. Následně se platforma očistí, např. lihem, jarovou vodou a je možnost další přípravy lakem na vlasy.

Lak na vlasy (Wella Wellaflex Brilliant colors pro ultra silné zpevnění) je mnohem spolehlivější při tisku, než používání lepidla, v průběhu testování nedošlo k žádnému oddělení součástí od vyhřívané podložky, jako to bylo v případě lepidla.

**Lepidlo** – tento postup je v mnoha případech využíván u tiskáren typu RepRap, ale uplatnění nalezne i u tiskárny MakerBot Replicator 2X. Tyčinková lepidla jsou založena na principu škrobu (nejčastěji bramborového, nebo kukuřičného) naředěného menším množstvím vody. Po odpaření vody dojde k vytvrzení lepidla. Nejčastěji se uvádí vhodné tuhé lepidlo Kores, ale je možné zkusit i jinou značku. Pro tuto diplomovou práci jsem vyzkoušel tyčinkové lepidlo od firmy Centropen o hmotnosti 36 g. Zásady pro správnou aplikaci lepidla:

- povrch vyhřívané stavěcí platformy musí být čistý,
- platforma musí být studená,
- aplikuje se pouze jedna tenčí vrstva lepidla,
- lepidlo se nechá zaschnout,
- poté se aplikuje acetonový roztok s ABS (vatový tampón, toaletní papír, rozprašovač).

Ze své zkušenosti bych rád uvedl, že výhodněji se jeví aplikace kaptonové pásky a následné použití acetonového roztoku s ABS, než použití lepidla a následné užití roztoku. Z hlediska ceny je levnější varianta užití roztoku acetonu s ABS a lepidla, ale příprava pro tisk je časově delší a obtížnější. Za hlavní nevýhodu považuji nutnost nanášet lepidlo pouze za studena. Častý problém 3D tiskáren pro metodu FDM nastane zanesením extrudéru.

V takovém případě je nutné tisk zastavit a vyčkat, než podložka zchladne z určité teploty na pokojovou teplotu a je možné aplikaci s lepidlem opět provést. To je samo o sobě časově náročné. Originální balíček 10 kusů kaptonových fólií lze zakoupit za \$30, v závislosti na převodním kurzu hodnota odpovídá přibližně 716 Kč. Užívání kaptonové fólie vystačí na 1 ÷ 3 cívky filamentu. Za autora diplomové práce je doporučeno jednoznačně použití kaptonové fólie.

## 9.5 Souhrn

V kapitole byly popsány způsoby a možnosti pro zvýšená adheze objektu na vyhřívané podložce včetně postupů aplikace. I když jsou tyto postupy analyzovány samostatně, je možné je kombinovat – kaptonová fólie společně s roztokem acetonu a ABS, nebo lepidlem, případně lakem na vlasy.

V kapitole 6.2.3 Vyhřívaná stavěcí platforma byla popsána konstrukce plošiny. Dále bylo uvedeno, že tiskárna MakerBot Replicator 2X obsahuje speciální vrchní vrstvu – BuildTak na hliníkové podložce. V rámci testování bylo zjištěno, že není nutné používat kaptonovou podložku, ale je možné nanést lepidlo, roztok acetonu a ABS, lak na vlasy přímo na BuildTak. Určité obtíže vyvstaly u objektu přesahující rozměry základny větší než 50 mm × 50 mm, docházelo k odstávání rohů objektu. V takovém případě musel být tisk zopakován.

Při tisku větších modelů bylo převážně využíváno kaptonové fólie s lakem na vlasy, případně se spojením roztoku acetonu a ABS, které usnadnily adhezi rozměrnějších modelů. Některé modely se i přes použití kaptonové fólie a další dvojice možností oddělovaly v rozích základny. Situace byla řešena extrémně silnou koncentrací roztoku ABS a acetonu. Následně vyvstal problém s oddělením materiálu od kaptonové fólie. Při použití hrubé síly – dláta, stěrky došlo ve většině případů k poničení kaptonové fólie a bylo nutné použít novou kaptonovou fólii.

Jako východisko se ukázalo nechat zchladnout vyhřívanou plošinu přibližně pod 70 °C a následně aplikovat líh pomocí injekční stříkačky, nebo stříčky využívané v chemii. Aplikaci je nutné provést ze všech stran základny a snažit se „vtlačit“ líh pod raft. Poté se musí počkat alespoň 30 s, kdy dojde k narušení přílnavých vazeb mezi kaptonovou podložkou a acetonovým roztokem s ABS. Objekt je možné oddělit za použití podstatně menší síly a nedochází k destrukci kaptonové podložky. Nelze-li objekt oddělit, aplikaci líhu je možné bez obav opakovat.

## 9.6 Dodatečné úpravy modelu

Především se jedná o mechanické a chemické úpravy hotového objektu, z důvodu lepšího vzhledu a zvýšení jakosti povrchu modelu

Obecně platí, že je potřeba zvolit při obrábění povrchu nejjemnější metodu, případně několik metod na sebe navazujících od nejhrubší až po nejjemnější. K dispozici se naskýtá mnoho řešení od klasických dokončovacích metod známých z ručního obrábění plastu:

- pilování,
- broušení smirkovým papírem,
- leštění povrchu.

Kromě klasických metod se naskýtají i metody chemické, nejčastěji založené na chemické reakci mezi objektem a chemickou látkou. V tomto případě se jedná o dimethylketon, jinak také známý aceton. Při práci s acetonem musíme postupovat v souladu s bezpečností práce:

- pracovat v dobře větraných prostorech,
- používat ochranné pracovní pomůcky,
- netestovat senzoričky chemikálie,
- nenechávat na dosah nezpůsobilých osob,
- nepřelévat do nenáležitých nádob (možnost chemické reakce, nechtěné vypití chemikálie),
- nepít a nestravovat se,
- nemanipulovat s otevřeným ohněm.

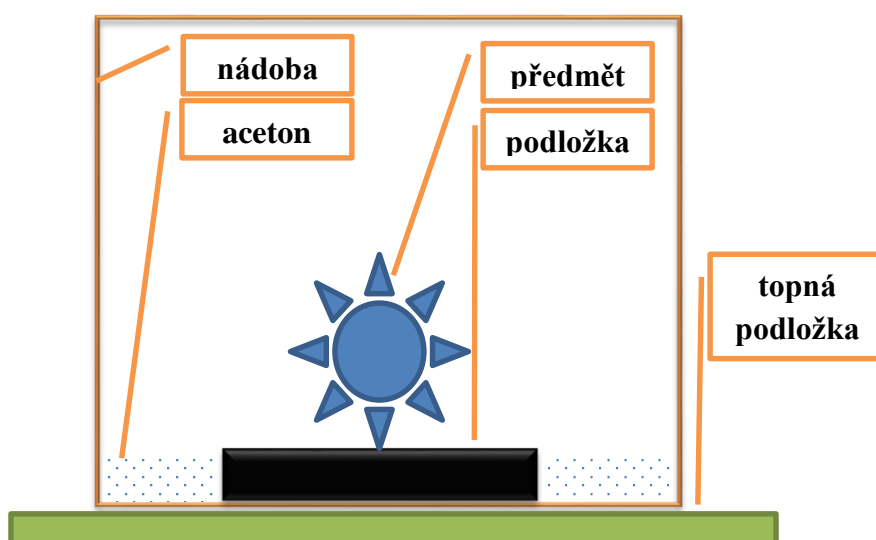
Mnoho těchto postupů je zdraví nebezpečných, a tak je potřeba pracovat rozvážně, aceton je možné aplikovat několika rozličnými způsoby:

- máčením v acetonové lázni,
- nátěr objektu acetonem,
- umístěním do odpařující se acetonové lázně.

**Namáčeniím v acetonové lázni** – jedná se o nejjednodušší postup aplikace acetonu a získáním požadovaných vlastností. Aceton je nalitý do kovové, nebo do skleněné nádoby do potřebné úrovně (dle velikosti objektu). Objekt se upne na tenký drátek nebo položí na vhodnou podložku, aby ho bylo možné vyjmout bez dotýkání na jeho naleptané plochy. Je třeba mít na paměti, že při manipulaci s objektem po naleptání povrchu případně zůstanou otisky na předmětu. Namočením objektu již během několika sekund dojde k reakci acetonu povrchem a následně se nechá objekt uschnout. Tím je celý postup dokončen. Nevýhodou tohoto postupu je potřeba většího množství acetonu, který je ale možné následně použít pouze pro stejný druh barvy.

**Nátěr objektu acetonem** – při tomto postupu se použije pouze malé množství acetonu nalité také v kovové, nebo skleněné nádobě a plochý štětec, kterým potíráme povrch objektu. Sice je postup trochu zdlouhavější, ale není potřeba tolik acetonu jako v předchozím postupu.

**Umístění do odpařující se acetonové lázně** – pro lepší porozumění jsem vytvořil nákres, jakým je možné upravovat povrch pomocí acetonu. Nejlépe kovová nádoba se položí na topnou desku. Do nádoby se nalije přiměřené množství acetonu. Objekt se umístí opět na podložku a topná deska se ohřívá přibližně na teplotu okolo  $50 \div 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu několika minut, kdy dojde ke zlepšení jakosti povrchu vlivem odpařování acetonu. Tento postup lze provést za studena a postup opracování povrchu trvá déle.



Obrázek 62: Nákres postupu - umístění objektu v acetonové lázni na vyhřívané podložce



## 10 Problematika 3D tisku a jejich korekce

Kapitola pojednává o nejčastějších problémech souvisejícími s 3D tiskem a nápravných řešeních. Mnoho uživatelů řeší stejné otázky týkající se 3D tisku. Řešení lze hledat na různých zájmových fórech o FDM technologii, případně na různých fórech o RepRap tisku. Ucelená databáze těchto problémů a nápravných postupů je na webové adrese: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting>.

Opravné postupy, které jsou uvedeny v databázi lze uplatnit na většině 3D tiskáren, avšak na webu se nachází mnoho postupů, které není možné aplikovat pro tiskárnu MakerBot Replicator 2X. Jelikož software je rozdílný a nabízí jiná řešení pomocí softwaru, ale i přesto při tisknutí modelů pro tuto diplomovou práci byl tiskové procesy korigovány právě z databáze Simplify3D. Nyní budou uvedeny ty nejdůležitější postupy, které lze uplatit pro tiskárnu MakerBot a jejich software (aktuální verze 3.9).

### 10.1 Potíže s extrudérem

Nevytlačuje-li extrudér filament již na začátku tisku modelu, existují čtyři možné příčiny: [28]

#### *Extrudér nebyl naplněn před zahájením tisku*

Při nečinnosti z extrudéru při zahřátí na vysokou teplotu uniká horký filament. Vytéká ze špičky, to vytváří mezeru uvnitř trysky. Vytékání může nastat na začátku tisku, když se extrudér přehřívá, ale rovněž na konci tisku při ochlazování extrudéru.

Ztratil-li extrudér nějaký materiál, je pravděpodobné, že to bude trvat několik sekund, než plast začne vytýkat z trysky znovu. Pokud se uživatel snaží spustit tisk poté, co z trysky vytekl filament, může si všimnout zpožděné extruze. Chce-li tento problém vyřešit, musí se ujistit, že tryska extrudéru těsně před zahájením tisku je plná z plastu a extrudér je připraven k vytlačení. [28]

#### *Značná mezera mezi extrudérem a vyhřívanou podložkou*

V případě, že tryska je příliš blízko k povrchu vyhřívané platformy, nebude dost místa pro filament, aby vyšel z extrudéru. Otvor v horní části trysky je v podstatě zablokovaný – struna nemůže „vytéci“. Snadný způsob, jak poznat tento problém je, když se při tisku nevytlačuje materiál při první, nebo druhé vrstvě, ale začíná se vytlačovat až kolem 3., nebo 4. vrstvy – platforma se posunuje v ose Z. [28]

### *Filament se odtáhne od hnacího kola*

Většina 3D tiskáren používá malá ozubena kola k posunu vlákna. Zuby na rýhovaném kole se zakousnou do vlákna a tím se nechá přesně řídit posun vlákna. Zaznamená-li uživatel mnoho plastových otřepů, nebo chybí-li část z vlákna, pak je možné, že hnací ozubené kolo odstranilo příliš mnoho plastu. Jakmile se to stane, hnací kolo nemůže posunout materiál při pokusu o přesunutí vlákna do, nebo z extrudéru. [28]

### *Extrudér je ucpaný*

Pokud žádný z výše uvedených návrhů nevyřešil problém, pak je pravděpodobné, že extrudér je ucpaný. To se může stát i v případě cizích nečistot zachycených uvnitř trysky. Filament je ohříván v extrudéru příliš dlouho, nebo je-li chlazení extrudéru nedostatečné a vlákno začíná měknout mimo požadované zóny. [28]

## **10.2 Model nedrží na vyhřívané podložce**

Je velmi důležité, aby první vrstva předmětu pevně přilnula k vyhřívané plošině, takže zbytek tištěného předmětu může být postaven na tomto základu. Nepřilne-li k platformě, později to může způsobit potíže. Existuje mnoho různých způsobů, jak se vypořádat s těmito problémy. [28]

### *Vyhřívaná platforma není vyrovnaná*

Mnoho tiskáren má nastavitelnou mezeru mezi vyhřívanou stavěcí plošinou a extrudérem pomocí šroubů. Není-li platforma ve vodorovné poloze, jedna strana platformy může být příliš blízko k trysce, zatímco druhá strana může být příliš daleko. Dosažení perfektní první vrstvy vyžaduje precizní nastavení tiskové platformy. [28]

### *Tryska se nachází příliš daleko od platformy*

Jestliže byla platforma správně seřízená, ještě je třeba se ujistit, že tryska začíná ve správné výšce vzhledem k sestavení platformy. Cílem je najít ideální vzdálenost extrudéru od platformy - ne příliš daleko a ne příliš blízko. Pro dobrou přilnavost k vyhřívané plošině, se požaduje, aby vlákno mírně „klouzalo“ po platformě. Mimo mechanického seřízení lze provést korekci pomocí softwaru. [28]

### *První vrstva se tiskne příliš rychle*

Při extruzi první vrstvy na vyhřívanou stavěcí platformu, se musí uživatel ujistit, že filament správně přilne k povrchu plošiny před tisknutím další vrstvy. Tiskne-li uživatel první vrstvu příliš rychle, filament nebude mít dostatek času navázat se k platformě. Z tohoto důvodu je obvykle velmi užitečné nastavit tisk první vrstvy pomaleji, takže plast má čas se vázat. Pro většinu potíží s rychlostí tisku se doporučuje snížit rychlost na 50 % původní hodnoty. [28]

### *Teplota tisku, nebo teplota chlazení*

Filament má tendenci se smršťovat, protože se ochlazuje z teploty nastavené uživatelem na teplotu okolí. Je-li extrudér nastavený na teplotu 230 °C a struna byla nanesená na studenou stavební plošinu, je pravděpodobné, že plast vychladne ihned po opuštění horké trysky.

Dnes je běžnou součástí každé 3D tiskárny chladicí ventilátor, který urychluje proces chlazení. Pro lepší pochopení je možné si představit situaci, kdy je na 3D tiskárně tištěna 100 mm široká kostka. Je-li teplota extrudéru nastavena na 230 °C a materiál ABS se ochladí na teplotu místnosti 30 °C. Široká část 100 mm by se měla smrštit téměř o 1,5 mm. Na vyhřívané stavební platformě v 3D tiskárně se nebude součást smršťovat tolik, protože teplota vyhřívané plošiny je udržovaná na konstantní úrovni.

Vzhledem k této skutečnosti se model nebude mít tendenci oddělit od plošiny při chladnutí. To je důležitý fakt, je třeba mít na paměti, jak tisknout první vrstvu objektu. Zjistí-li uživatel, že první vrstva se odděluje od platformy, protože se ochlazuje, je pravděpodobné, že nastavení teploty platformy, nebo chlazení ventilátorem je špatně nastaveno. [28]

### *Přilnavost platformy*

Různé materiály mají tendenci držet na rozmanitých površích. Z tohoto důvodu mnoho 3D tiskáren obsahuje speciální platformy, které jsou navrženy pro dané materiály. Některé 3D tiskárny používají BuildTak sheet v horní části platformy, na kterém velmi dobře drží předmět vyrobený z PLA. Jiní výrobci využívají tepelně ošetřené skleněné plošiny – borosilikátové sklo, které se zahřeje na požadovanou teplotu a ABS dobře přilne. Pokud se uživatel chystá tisknout přímo na těchto površích. Měl by se ujistit, že platforma je bez prachu, mastnoty před zahájením tisku. Čištění platformy se provádí pomocí vody, nebo lihu. [28]

### *Když vše ostatní selže: okraje a rafty*

Někdy tiskne uživatel jen velmi malou součást, která nemá dostatečnou plochu k postačující adhezi na povrchu platformy. V takovémto případě je třeba softwarově upravit raft – rozšířit plochu raftu na takovou velikost, aby přilnavost byla dostatečná. [28]

## **10.3 Není vytlačován dostatek filamentu (underextrusion)**

3D tiskárna neposkytuje žádnou zpětnou vazbu o tom, jaké množství filamentu ve skutečnosti vytéká z trysky. Vystupuje-li vlákna z trysky méně, než software požaduje, nastává jev známý jako podextruze – underextrusion. Uživatel si může všimnout mezer mezi sousedními extruzemi v každé linii. Nejspolehlivějším způsobem otestování 3D tiskárny je vytisknout jednoduchou 20 mm vysokou krychli s nejméně třemi obvodovými linkami (shells). V horní části kostky je třeba zkontrolovat, zda se trojice obvodových linek pevně spojila dohromady. Existují-li mezery mezi obvodovými linkami, pak 3D tiskárna nedodává dostatek materiálu. Nabízí se několik možných příčin, proč 3D tiskárna trpí podextruzí: [28]

### *Nesprávný průměr filamentu*

První věc, kterou by měl uživatel ověřit, je to, zda v softwaru je nastavená správná hodnota průměru vlákna. Dále je třeba zkontrolovat, zda tato hodnota odpovídá průměru vlákna. Je možné změřit průměr vlákna pomocí dvojice posuvných měřitek tak, aby se uživatel ujistil, že se jedná o skutečně správný průměr filamentu. Nejběžnější hodnoty pro průměr vlákna jsou 1,75 mm a 2,85 mm. [28]

## 10.4 Díry a mezery ve vrchních vrstvách

Většina 3D tištěných dílů je tvořena pevným obalem (obvodem), který obklopuje porézní, částečně dutý vnitřek. Vnitřek objektu může obsahovat např. 30 % výplně. To znamená, že pouze 30 % z vnitřního prostoru tvořeno filamentem, zatímco zbytek je vzduch. Vnitřek součásti může být částečně dutý, avšak je potřeba, aby vnější stěny byly plné. Tato technika může ušetřit obrovské množství filamentu a času, a přitom vytváří velmi pevné součásti. V závislosti na tom, jaké nastavení uživatel užívá si lze všimnout, že horní tuhé vrstvy součásti nejsou zcela pevné. Mezery nebo otvory mezi jednotlivými extruzemi také tvoří tyto pevné vrstvy. Setká-li se uživatel s tímto problémem, zde je několik jednoduchých nastavení, které jej opraví: [28]

### *Nedostatečný počet vrchních vrstev*

První krok nastavení se týká počtu horních pevných vrstev, které jsou použity. Při pokusu o tisk první vrstvy se 100 % výplní po předchozích částečně dutých vrstvách, pevná vrstva musí překlenout přes duté vzduchové kapsy výplně objektu. Při překlenutí mají tendenci první vrchní krycí vrstvy se prohýbat či klesnout dolů do vzduchové kapsy.

Z tohoto důvodu je třeba zvolit vyšší počet pevných vrstev v horní části výtisku s cílem zajistit hezkou stěnu, která má kvalitní a jemný povrch. Pro kvalitní vrchní vrstvy je třeba, aby vršek objektu měl tloušťku nejméně 0,5 mm. Používá-li uživatel výšku vrstvy např. 0,25 mm, bude potřeba alespoň dvojici pevných vrstev. Tiskne-li v menší výšce vrstvy, jako je např. 0,1mm. Bude třeba alespoň pěti pevných vrstev v horní části součásti k dosažení stejného efektu.

Všimne-li si uživatel mezery mezi linkami ve vršku součásti. Měl by zkontrolovat počet vrchních pevných vrstev. Nastal-li problém při tisku např. se třemi vrchními pevnými vrstvami, měl by zkusit zvýšit hodnotu na pět pevných vrstev, aby zjistil, zda se problém vyřešil. Přídavné pevné vrstvy jsou vytvořeny v rámci rozměru součásti – nezvětšují objem objektu. [28]

### *Nízké procento výplně*

Výplň uvnitř objektu slouží jako základ pro vrstvy nad ním. Je-li procento výplně velmi malé, budou existovat velké vzduchové mezery uvnitř objektu. Vidí-li uživatel stále mezery v horní části (v pevných vrstvách) objektu, musí zvýšit podíl výplně a snížit tak počet vzduchových mezer. [28]

### *Podextruze*

Vyzkoušel-li uživatel rady popsané výše, i přesto jsou mezery v součásti, pak je pravděpodobně problém způsobený nedostatečným vytlačováním filamentu. [28]

## **10.5 Mezery v tenkých stěnách**

3D tiskárny mají trysku stálého průměru. Mohou nastat problémy při tisku velmi tenkých stěn, které jsou jen několikrát větší, než je průměr trysky. Pokouší-li se uživatel vytisknout stěnu např. 1 mm tenkou s tryskou o průměru 0,4 mm. Je nutné provést určité úpravy, aby tiskárna vytvořila dle požadavku: [28]

### *Změna šíře extruze*

V některých případech je výhodnější měnit množství filamentu, které je vytlačováno z trysky. Tiskne-li uživatel např. 1 mm tenkou stěnu, pro dosažení dobré kvality stěny a rychlého času je optimální nastavit šířku extruze na 0,5 mm. Metoda nachází uplatnění nejvíce pro součásti, které mají poměrně konzistentní tloušťky stěn. [28]

## **10.6 Řetězce (oozing, stringing)**

Vznikají vlivem „tenkých zbytků struny“ a jsou zanechány na vytištěné součásti a vytváří „řetězce“. Obvykle je to způsobeno vytékáním filamentu z trysky, zatímco extrudér se přesouvá do nové pozice. Nejběžnější nastavení, které se používá k omezení oozingu, je známé jako zatahování – retraction. Retrakce má význam, dokončí-li extrudér tisk v jedné části/vrstvy modelu, vlákno bude vtaženo zpět do trysky a omezí se vytékání materiálu z trysky. Má-li dojít k opětovnému tisknutí některé části modelu, vlákno bude vytlačováno ven z trysky. [28]

### *Posuv filamentu z trysky (retraction distance)*

Nejdůležitější nastavení retrakce je Retraction Distance, tedy vzdálenost (dráha), která určuje délku vlákna vytaženého z trysky. Obecně platí, že čím více filamentu je vytlačeno z trysky, tím méně je pravděpodobné, že tryska při přesunu bude vytvářet oozing. Hodnota se pohybuje v rozmezí 0,5 ÷ 2,0 mm. [28]

### *Rychlost retrakce*

Další nastavení, o kterém by měl uživatel vědět, je rychlost retrakce – Speed Retraction. Změnou hodnoty může uživatel ovlivnit rychlost vysunutí filamentu z trysky. Jestliže je hodnota příliš nízká, materiál bude pomalu vytékat dolů přes trysku a může začít unikat před tím, než se extrudér přesune na nové místo určení. Zatáhne-li se vlákno příliš rychle, následně se mohou oddělit části filamentu uvnitř trysky, nebo rychlý pohyb hnacího ozubeného kola může dokonce odlomit kousky vlákna. Optimální hodnoty se pohybují v rozmezí 20 ÷ 100  $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ , kde retrakce dosahuje nejvyšších kvalit. [28]

### *Příliš vysoká teplota*

Je-li teplota příliš vysoká, bude filament uvnitř trysky extrémně viskózní a dojde k úniku z trysky mnohem snadněji. Opačný případ nastane, jestliže je teplota příliš nízká, materiál bude tuhý a obtížně bude vytékat z extrudéru. Je-li si uživatel jistý správným nastavením retrakcí a stále se potýká s problémy oozingu, měl by zkusit snížit teplotu extrudéru o 5 ÷ 10 °C. [28]

### *Dlouhé přesuny extrudéru (stringing)*

Ke stringingu dochází, když se extrudér pohybuje mezi dvěma různými místy a v průběhu tohoto pohybu filament začne vytékat z trysky. Délka přesunu extrudéru může mít velký vliv na to, jak moc filament vytéká. Krátké přesuny mohou být dostatečně rychlé tak, že filament nestihne vytéct z trysky. Při dlouhých přesunech je mnohem pravděpodobnější, že dojde k vytvoření „tenkých vláken“. [28]

Software dovede nastavit přesuny tak, aby se extrudér přesouval po velmi krátkých drahách. V mnoha případech software vytvoří trasu přesunu, která zabraňuje přechod přes otevřený prostor. To znamená, že není možné vytvořit řetězce, protože tryska bude vždy v horní části pevného objektu a nikdy se nebude přesouvat mimo součást. [28]

## 10.7 Přehřátí filamentu (overheating)

Filament, který extrudován z extrudéru může mít teplotu v rozmezí od 190 ÷ 240 °C (platí pro ABS). Zatímco materiál je ještě horký, ohebný a může být snadno tvarován. Jakmile se materiál ochladí, rychle ztuhne a zachovává si svůj tvar. Je třeba nalézt rovnováhu mezi teplotou nahřívání materiálu a teplotou chlazení tak, aby plast mohl volně proudit z trysky, ale mohl také rychle ztuhnout k dosažení přesného požadovaného rozměru tisknuté součásti.

Není-li dosaženo rovnováhy, může si uživatel všimnout problémy s kvalitou tisku, kde vnější rozměry objektu nejsou tisknuty přesně dle elektronického modelu. Podkapitoly se zabývají příčinami přehřívání materiálu a jejich předcházení: [28]

### *Nedostatečné chlazení*

Nejčastější příčinou přehřátí je pomalé ochlazování materiálu po extruzi filamentu. Teplý materiál vlivem ochlazování mění svůj tvar, proto je vhodné intenzivně chladit vrstvy materiálu, aby se zabránilo nežádoucí změně. Obsahuje-li 3D tiskárna ventilátor a přesto dochází k pomalému ochlazování, měl by uživatel zvýšit výkon ventilátoru, případně instalovat ventilátor s vyšším chladicím výkonem. [28]

### *Tisk při vysokých teplotách*

Používá-li uživatel chlazení ventilátorem a stále dochází ke změně tvaru tištěného objektu. Nabízí se další řešení, snížení teploty o 5 ÷ 10 °C. Extruduje-li materiál při nižší teplotě, bude moci ztuhnout rychleji a udržet požadovaný tvar. Snížení teploty se musí provést v rámci určitých mezí. Přílišné snížení teploty může mít za následek, že materiál nemusí být schopen protlačit se skrz malý průměr trysky. [28]

### *Rychlý tisk*

Tisknou-li se jednotlivé vrstvy rychle, nemusí být dostatek času na ochlazení a ztuhnutí předchozí vrstvy, než extrudér „položí“ další vrstvu na předchozí. I s chladicím ventilátorem musí uživatel snížit rychlost tisku s cílem zajistit dostatek času pro ztuhnutí vrstvy. V softwaru uživatel často nastaví rychlost tisku pro vrstvy, které se tisknou méně než, např. 15 s program automaticky zpomalí rychlost tisku pro tyto malé vrstvy. [28]



### *Tisk více součástí najednou*

Vyzkoušel-li uživatel rady výše a pořád dochází k potížím s přehříváním součástí. Poslední možnost, kterou může zkusit, je importovat do softwaru tutéž součást ještě jednou. Vytisknutím dvou objektů najednou může poskytnout více času ke ztuhnutí vrstev/objektu. Horká tryska se od první součásti přesune k druhé a tam provede extruzi vrstvy. To poskytne čas na zchladnutí první součásti. Jedná se o jednoduchou, ale velmi účinnou strategii pro řešení problému s přehříváním. [28]

## **10.8 Vychýlení jednotlivých vrstev**

Většina 3D tiskárna používá systém řízení s otevřenou smyčkou. To znamená, že neexistuje žádná zpětná vazba pro 3D tiskárnu, v jaké pozici se nachází extrudér. Tiskárna přesouvá extrudér na určité místě a předpokládá, že se tam dostane. Ve většině případů tento princip pracuje spolehlivě, protože krokové motory, které řídí procesy přesunu 3D tiskárny snesou určité zatížení a během přesunu se nevyskytuje žádné výraznější zatížení zabraňující přesunu extrudéru.

Dojde-li k potížím při přesunu, 3D tiskárna nemá zpětnou vazbu o vzniklých komplikacích, tisk bude nadále pokračovat. Zjistí-li uživatel vychýlené vrstvy tisku, je obvykle způsobeno kvůli jedné z následujících příčin: [28]

### *Extrudér se pohybuje příliš rychle*

Tiskne-li 3D tiskárna velmi rychle, krokové motory a řídicí elektronika se snaží natavenou rychlostí tisknout. V tomto případě se obvykle ozve cvaknutí – motor nedosáhne požadované polohy. Jestliže se tato situace nastane, zbývající část objektu bude vychýlená vůči částem, které byly vytisknuty předtím. Má-li uživatel pocit, že 3D tiskárna tiskne příliš rychle, měl by hodnotu rychlosti snížit na 50 % původní hodnoty.

Rychlost přesunu v osách X a Y, když materiál neextruduje z trysky, je mnohem rychlejší než při extruzi materiálu. Při nevhodně navolených hodnotách může též dojít k nepříjemnému cvakání krokového motoru. [28]

### *Mechanické, nebo elektrické potíže*

Dochází-li přesto k vychýlení poté, co došlo ke snížení rychlosti tisku, pak je pravděpodobné, že komplikace jsou způsobeny mechanickými, nebo elektrickými částmi 3D tiskárny. Většina 3D tiskáren používá řemenové převody, které umožňují ovládání extrudéru. Řemenové převody jsou obvykle vyrobeny z pryže a vyztužené příslušným typem vlákna a slouží pro přenos točivého momentu. Za určitou dobu používání se mohou řemeny vytáhnout, což má zásadní vliv na napnutí řemene a vliv na přenos momentu. Je-li síla napnutí řemene příliš malá, řemen může klouzat na horní části hnací řemenice – kladka se otáčí, ale řemen nikoliv. V případě příliš utaženého řemene mohou nastat problémy vlivem nadměrného tření v ložiskách, nastane omezený přenos točivého momentu z krokového motoru na jednotlivé řemenice. Všimne-li si uživatel problémů na sebe vzájemně nedosedajících vrstev, měl by ověřit napnutí řemenů. Je-li řemen volný, uživatel by měl postupovat dle návodu výrobce, jak optimálně napnout řemen.

Řemeny v 3D tiskárnách rovněž zapadají do řemenic uložených na hřídeli krokového motoru pomocí malého šroubu. Šrouby ukotvují řemenici na hřídel motoru tak, aby se společně otáčely. Může nastat případ, kdy se šroub uvolní, řemenice se nebude otáčet společně s hřídelí krokového motoru. To znamená, že elektromotor se může otáčet, ale řemenice a řemeny nikoliv. Pokud k tomu dojde, extrudér se nedostane na požadované místo a může to mít vliv na vyrovnání všech budoucích vrstev tisku. Je třeba prověřit řádné dotažení všech šroubů.

Existuje také problémy týkající se elektroniky, které mohou způsobit nefunkčnost krokového motoru. Není-li krokovým motorům dodáván dostatek elektrické energie, elektromotory nemohou provést požadovanou činnost. Častým jevem, který nastává, je přehřátí elektromotoru, a proto elektronika dočasně odpojí elektromotor, než motor vychladne. [28]

## 10.9 Oddělování vrstev

Při tisku dochází k vrstvení jedné vrstvy na druhou a tím dochází k vytvoření požadovaného tvaru součásti. Jednotlivé vrstvy musí být provázány, aby nedošlo později k oddělení jedné, nebo několika vrstev od celého objektu. K dispozici jsou následující možnosti, kterými lze problémy řešit: [28]

### *Výška vrstvy je příliš velká*

Filament vytéká z trysky malým otvorem za účelem vytvoření velmi tenké extruze, např. pro tvorbu drobných, nebo detailních součástí. To přináší jisté limity a omezení, jako je výška vrstvy, která může být použita pro danou trysku. Tiskne-li 3D tiskárna jednu vrstvu filamentu na vrchol druhé vrstvy (předchozí), musí být nová vrstva přitlačena k předchozí, tak aby došlo ke spojení obou vrstev.

Obecné pravidlo, které se uplatňuje, říká, že výška vrstvy by měla být o 20 % menší, než je průměr trysky. Nejčastěji se u 3D tiskáren dodává tryska průměru 0,4 mm, výška vrstvy by neměla přesáhnout hodnotu 0,32 mm, jelikož následující vrstvy nebudou schopny správně přilnout k vrstvám předchozím a jakost součásti bude omezená. Uživatel by si měl bedlivě všimnout, zda nedochází k separaci vrstev. [28]

### *Nízká teplota extrudéru*

Jednotlivé vrstvy filamentu se spojují s dalšími vrstvami mnohem lépe, jestliže je materiál ohřátý na vhodnou teplotu. Zjistí-li uživatel, že vrstvy nejsou spojené a je si jistý, že výška vrstva není příliš velká, pak je možné, že vlákno potřebuje vyšší teplotu k vytvoření provázaných vrstev. Uživateli se doporučuje se zvýšení teploty o 5 ÷ 10 °C a sledovat, zda se přilnavost zlepšila. [28]

## 10.10 Ubroušený filament (grinding filament)

Extrudéry 3D tiskáren pro posuv filamentu používají malé rýhované hnací kolo, které „chytne“ vlákno proti jinému hladkému kolu a v závislosti na směru otáčení se filament posouvá z/do extrudéru.

V případě neposouvajícího se vlákna dojde k odbroušení vlákna – hnací ozubené kolo se stále otáčí. Odbroušená vlákna jsou ponechána v podávací části extrudéru. Uživatel si může všimnout, že krokový motor se točí, ale filament není posouván do extrudéru. Následně je třeba extrudér očistit od částecek filamentu. Existuje několik jednoduchých způsobů, jak omezit odírání materiálu: [28]

### *Zvýšení teploty extrudéru*

Zaznamená-li uživatel obroušování vlákna, zvýšením teploty o  $5 \div 10$  °C lze omezit odírání – materiál bude poddajnější a „poteče“ snadněji. [28]

### *Rychlý tisk*

Pokračuje-li i po zvýšení teploty odírání filamentu. Další věc, kterou by měl uživatel zkusit, je zpomalení rychlosti tisku. Elektromotor extrudéru se nemusí otáčet tak rychle, protože vlákno se vytlačuje delší dobu. Platí zde stejné pravidlo, které bylo zmíněno výše a to snížit rychlosti tisku na 50 % původní rychlosti tisku. [28]

### *Kontrola trysky*

Potýká-li se uživatel s odíráním filamentu i přes optimalizaci výše napsaných rad, pak je pravděpodobné, že došlo k zanesení trysky. Postup čištění trysky bude zmíněn níže. [28]

## 10.11 Ucpaný extrudér

Pro tisk objektů musí 3D tiskárna extrudovat mnoho kilogramů materiálu skrz trysku za celou dobu své životnosti. Materiál je extrudován malým otvorem v řádech desetin milimetrů. Tryska se zaneše např. zbytky filamentu a materiál nemůže být správně vytlačován tryskou. V takovém případě je potřeba vyčistit extrudér pomocí následujících postupů: [28]

### *Uvolnění filamentu*

Není-li filament stále posouván do extrudéru. Je vhodné provést opačnou činnost a to je uvolnění filamentu z extrudéru po zahřátí na optimální teplotu. Poškozená část vlákna se oddělí pomocí nůžek, případně štípacích kleští. Poté se uživatel pokusí znovu zavést vlákno do extrudéru. [28]

### *Ruční dodání filamentu do extrudéru*

Jedna z prvních možností čištění extrudéru je ručně vtlačovat filament o délce alespoň 40 mm do extrudéru. Extrudér musí být zahřátý na optimální teplotu filamentu. Krokový motor při posuvu materiálu nevyžaduje velkou sílu, a tak je možné tlačit vlákno pouze ručně. Ve většině případů ucpaného extrudéru bude stačit vyčistit extrudér popsáním způsobem. [28]

### *Čištění trysky*

Pokud nemohl uživatel filament protlačit ručně, pak je pravděpodobné, že bude muset vyčistit trysku před dalším tiskem. Mnoho uživatelů mělo úspěch zahřát extrudér na 100 °C, a pak ručně vytáhnout vlákno z extrudéru. Jiní upřednostňují používání struny E z kytary k protlačení nečistot a zbytků filamentu přes špičku trysky. Existují rozmanité metody a především každý extrudér má jedinečnou konstrukci. Vhodné je vyčistit extrudér dle pokynů výrobce. [28]

## 10.12 Zastavení extruze během tisku

Extruduje-li 3D tiskárna od začátku tisku objektu, avšak přestane extrudovat později, pak je to pravděpodobně způsobeno následujícími příčinami:

### *Konec filamentu*

Je to úsměvné, ale na začátek by měl uživatel nejdříve zkontrolovat, zda je do trysky zavedeno vlákno. Není-li, měl by vyměnit stávající prázdnou cívku za novou a zavést nový filament do trysky. [28]

### *Filament je odírán podávacím hnacím kolem*

Během tisku extrudér neustále posouvá materiál do trysky, tímto způsobem 3D tiskárna vytlačuje filament. Tiskne-li 3D tiskárna, nebo vysouvá-li extrudér větší množství filamentu příliš rychle, může se stát, že vlákno bude ubroušeno a hrací ozubené kolo následně nemůže posunout vlákno dále vlivem ubroušeného materiálu. Otáčí-li se krokový motor extrudéru, ale nedochází k posunu vlákna, pravděpodobně se jedná o výše zmíněný problém. [28]

### *Zanesený extrudér*

Nepomohla-li žádná z výše uvedených ke správnému řešení, pak nastala situace, kdy se mohl extrudér zanešt. Stane-li se tento problém v polovině tisku, bude se uživatel muset ujistit, že vlákno na cívce je čisté a nenachází se na ní prach. Vyskytuje-li se větší množství prachu na filamentu, v trysce může dojít k zanesení, protože se prach hromadí uvnitř trysky. [28]

### *Přehřátí krokového motoru extrudéru*

Elektromotor extrudéru je provozován za neuvěřitelně tvrdých podmínek během tisku – vystavený vysokým okolním teplotám, neustále extruduje filament z trysky i zpět do trysky. Rychlá změna činnosti vyžaduje větší množství elektrické energie. Krokové motory mají tepelnou ochranu, která způsobí, že z hlediska bezpečnosti dojde k pozastavení činnosti motoru, bude-li teplota příliš vysoká. Jediný způsob, jak vyřešit tento problém je vypnutí 3D tiskárny a nechat elektroniku vychladnout. Případně lze dodatečně instalovat další ventilátor, jestliže problém přetrvává. [28]

### 10.13 Nedostatečná výplň součásti

Výplň uvnitř objektu má značný vliv na tuhost celé součásti. Výplň je důležitá zejména pro bezproblémové spojení obvodových stěn součásti, a také musí sloužit k napojení horních pevných vrstev. Jeví-li se výplň součásti jako nedostatečná, nebo vláknitá. Uživatel bude muset změnit některé parametry určující výplň: [28]

#### *Jiný vzor výplně*

Uživatel by měl mít povědomí, jaké výplně jsou v softwaru k dispozici. Každý vzor má jiné vlastnosti, např. tuhost, rychlost tisku. Jestliže se uživateli nedaří vytisknout tuhý model, měl by postupně zkusit různé výplně, aby mohl porovnat rozdíly mezi jednotlivými výplněmi.

Názvy výplní se liší v závislosti na softwaru, ve většině případů vykreslují stejné vzory. Grid, Triangular, a Solid Honeycomb jsou výplně vhodné pro tužší modely. Další výplně typu Rectilinear and Fast Honeycomb mají nižší pevnost, ale jsou tištěny mnohem rychleji. [28]

#### *Příliš rychlý tisk*

Výplň je obvykle vytištěna rychleji než kterákoli jiná část součásti. Pokouší-li se uživatel vytisknout výplně příliš rychle, extrudér nebude schopný dostatečně vytlačovat filament. Bude vytvořena slabá, vláknitá výplň, protože tryska není schopna vytlačovat potřebné množství filamentu. Vyzkoušel-li uživatel různé vzory výplní, ale i nadále má problémy se slabou výplní, měl by snížit rychlost. Opět platí pravidlo o snížení rychlosti na 50 % původní hodnoty. [28]

## 10.14 Hrudky (blobs and zits)

Během 3D tisku extrudér musí neustále pozastavovat a spouštět extruzi při přesunech mezi různými částmi objektu. Většina extrudérů vytlačuje filament stejnoměrně při extruzi, ale když extrudér nevytlačuje materiál a následně se připravuje znovu extrudovat, tak se mohou vytvořit zvláštní útvary na vnějších stěnách objektu – „hrudky, kapky“.

Představují místo, kde extrudér zahájil extruzi filamentu. Extrudér začíná tisknout v konkrétním místě objektu, nakonec se vrací na výchozí místo začátku tisku, poté co jsou vytištěny vnější stěny objektu. Je obtížné spojit dva kusy plastu dohromady, aniž by zanechával stopu vůbec, ale existuje několik nástrojů, které mohou být použity, aby se minimalizoval výskyt těchto povrchových vad: [28]

### *Retrakce a nastavení doběhu*

Začne-li si uživatel všimnout malých vad na povrchu součásti. Je důležité diagnostikovat, jaká je příčina vzniku vad. Objeví se vada v okamžiku, kdy extrudér začne tisknout obvod? Objeví se později, když je obvod dokončen a extrudér se zastaví? V případě objevení vady hned na začátku při tisku obvodové linky je možné upravit nastavení retrakce – Extra Restart Distance. Parametr určuje rozdíl mezi retrakční vzdáleností, když je extrudér zastaven a „plnicí“ vzdáleností, když je extrudér „restartován“.

Zjistí-li uživatel vadu extrudéru ihned po započetí, je pravděpodobné, že dochází k vytlačování přílišného množství filamentu. Vhodným opatřením je zadání záporné hodnoty pro položku Extra Restart Distance, tím dojde ke snížení „plnicí“ vzdálenosti. Jako příklad poslouží retrakční vzdálenost o hodnotě např. 1 mm a hodnota Extra Restart Distance nastavená na hodnotu – 0,2 mm. Po každém zastavení extrudéru, extrudér zatáhne 1mm filamentu. Nastane-li čas znovu tisknout objekt, do trysky bude vytlačeno pouze 0,8 mm délky filamentu. Změna nastavení se provádí do té doby, než bude vada odstraněna. [28]



### *Omezení přebytečné retrakce*

Jestliže nepomohla rada zmíněná výše. V některých případech je lepší zastavit retrakci (nastavit hodnotu 0 mm). Extrudér nemůže obrátit směr extruze, ale i nadále dochází ke stejnoměrnému vytlačování filamentu z trysky. To je týká především bodenových extrudérů, které mají velkou vzdálenost mezi krokovým motorem extrudéru a trysky. Omezení retrakce nezpůsobí potíže při tisknutí objektů

Překračuje-li tryska „volný prostor“, „tenké struny“ – oozing budou na vnitřních stěnách objektu. Tato vada nebude být moci viděna z vnějšku. Z tohoto důvodu většina 3D tiskáren provádí retrakci právě při překračování „volného prostoru“, aby nedocházelo k přebytečným retrakcím. Může-li se extrudér vyhnout obvodu objektu – změnit trasu, retrakce nebude potřeba. [28]

### *Zadání pozice počátku tisku*

Počáteční pozice jsou voleny záměrně – rychlost tisku. Uživatel má možnost zvolit náhodnou lokaci začátku tisku, případně začít tisk na určitém místě. Tikne-li uživatel sochu, může sladit všechny počáteční body na zadní straně modelu tak, aby nebyly viditelné zepředu. Určí souřadnice v osách X, Y, kde má být pozice počátku tisku. [28]

## **10.15 Mezery mezi výplní a obvodem objektu**

Každá vrstva vytištěné součásti je vytvořena pomocí kombinace obvodových linií a výplně. Obvod objektu tvoří pevný a přesný zevnějšek. Výplň je vytištěna uvnitř těchto obvodu a dotváří zbytek součásti. Výplň je obvykle tvořena vzorem výplně - urychlení času tisku, tuhost modelu. Výplň používá jiný vzor než obrysové stěny, dvojice rozličných útvarů musí vytvořit pevný celek. Všimne-li si uživatel malých mezer mezi okraji výplně, pak existuje několik nastavení, která omezí mezery: [28]

### *Příliš rychlý tisk*

Výplň součásti je obvykle vytištěna mnohem rychleji než obvod. Avšak je-li výplň vytištěna příliš rychle, nebude dostatek času k provázání vrstev obrysu a výplně. Opět platí pravidlo na snížení rychlosti o 50 % z původní hodnoty. [28]

## 10.16 Šrámy na povrchu součásti

Jednou z výhod 3D tisku je, že každá část je tvořena jednou vrstvou. To znamená, že pro každou jednotlivou vrstvu se tryska volně pohybuje po části vyhřívané stavěcí platformy. Tryska zanechává stopu, když koná pohyb, zanechává „značku“ na vrcholu předchozí vrstvy. Obvykle je to patrné nejvíce na horních pevných vrstvách součásti. Následující část se bude zabývat několika možnými příčinami vzniku „šrámů“ a doporučení k jejich omezení: [28]

### *Extruze větší množství filamentu*

Jedna z prvních věcí, kterou by měl uživatel ověřit, zda nedochází k nadbytečnému vytlačování filamentu. Vychází-li z trysky příliš mnoho materiálu, bude každá vrstva o něco silnější, než je požadováno. Bude-li se tryska pohybovat po předchozích vrstvách, bude se přemisťovat přes přebytek filamentu – vznik šrámů. [28]

## 10.17 Díry a mezery ve spodní části objektu, vibrace

Při tisku součásti se každá vrstva spojuje s vrstvou předchozí. Množství filamentu, které je použito pro tisk může způsobit komplikace, takže musí být dosaženo rovnováhy plností stěn modelu a filamentu. Není-li objekt dostatečně plný, uživatel může vidět díry a mezery mezi jednotlivými vrstvami. Nejzřejmější jsou tyto vady v rozích, kde se rozměry součásti mění. Existuje několik typických příčin těchto obtíží: [28]

### *Změna teploty*

Většina 3D tiskáren provádí regulaci teploty extrudéru pomocí termistoru. Není-li správně optimalizován, teplota extrudéru se může měnit v průběhu času. Termistor pracuje cyklicky. To znamená, že teplota se bude měnit podle sinusoidy. Odchyluje-li se termistor od udávaných hodnot více než 2 °C. Pravděpodobně to způsobí, že vrstvy budou extrudovány odlišně, budou vytvářeny viditelné rýhy po stranách výtisku. Extrudéry by měly být schopny udržet teplotu v rozmezí  $\pm 2$  °C od požadované teploty.

### *Mechanické potíže*

Mechanické problémy dílů 3D tiskárny mohou způsobit „šrámy“ na povrchu součásti. Vibruje-li stavěcí platforma během tisku, může to způsobit, že poloha trysky se mění. Dalším častým problémem je tyč se závitem osy Z, která není správně umístěna.

### *Příliš rychlý tisk*

Nejčastější příčinou vibrací je rychlý přesun částí 3D tiskárny. Změní-li náhle 3D tiskárna směr, mohou tyto rychlé pohyby vytvořit další sílu, která může způsobit přetrvávající vibrace. To může mít neblahý vliv na stabilitu 3D tiskárny a kvalitu tisku. Má-li uživatel pocit, že 3D tiskárna pohybuje příliš rychle, měl by snížit rychlost tisku.

## **10.18 Malé detaily nebyly vytištěny**

3D tiskárna obsahuje trysku s pevnou velikostí, která umožňuje přesně reprodukovat velmi drobné prvky. Mnoho tiskáren zahrnuje trysku s výstupním otvorem o průměru 0,4 mm. I když tryska tiskne dobře pro většinu součástí, dojde k potížím při tisku extrémně drobných, nebo tenkých objektů, které jsou menší, než je průměr trysky. [28]

### *Přepřeprogramování modelu s drobnými detaily*

Je nutné přeprogramovat model tak, aby obsahoval pouze detaily, které jsou větší, než je průměr trysky. Obvykle se je nutná úprava modelu v původním 3D modelovacím programu. [28]

### *Použití trysky s menším průměrem*

V mnoha případech, není uživatel schopný provádět jakékoli úpravy původního 3D modelu – model získaný z webu. V tomto případě je výhodné mít k dispozici další trysku menšího průměru pro 3D tiskárnu, která je vhodnější pro drobné a detailní modely. [28]

### *Softwarové změna průměru trysky*

Pokud nemůže uživatel provést změnu elektronického modelu a nelze nainstalovat menší trysku na 3D tiskárnu, pak je k dispozici poslední možnost. V příslušném softwaru lze upravit parametry pro tisk těchto drobných detailů. Je pravděpodobné, že to bude mít vliv na kvalitu tisku. [28]

### **10.19 Nekonzistentní vytlačování**

Pro 3D tisk přesných dílů, musí být tiskárna schopná vytlačovat rovnoměrné množství materiálu. Pokud se vytlačování liší v různých částech modelu, tak to bude mít vliv na výslednou kvalitu tisku. Nekonzistentní vytlačování lze obvykle identifikovat tím, že uživatel pečlivě sleduje tiskárnu při probíhajícím tisku. Tiskne-li tiskárna přímku, která je alespoň 20 mm dlouhá a zjistí-li uživatel, že při vytlačování je poněkud hrbolatá, či má rozdílnou velikost, pak pravděpodobně dochází k tomuto problému. Následující řešení pomohou tento problém vyřešit: [28]

### *Filament se zasekl, nebo se zamotal*

První věc, kterou by měl uživatel zkontrolovat, je filament vtahovaný do 3D tiskárny. Musí se ujistit, že cívka se může volně otáčet a struna se snadno odvíjí z cívky. Zamotá-li se vlákno cívky, cívka bude mít velký odpor proti odvíjení - zásadní vliv na rovnoměrnost vytlačování vlákna tryskou. [28]

### *Ucpaný extrudér*

V případě, že vlákno není zamotané a může být snadno vtaženo do extrudéru, pak další věc ke kontrole je tryska. Je možné, že existují malé nečistoty, nebo zbytky filamentu uvnitř trysky, který brání správnému vysunutí nataveného vlákna. Snadný způsob, jak zjistit, je ručně vytlačovat materiál z trysky. Uživatel musí bedlivě sledovat, zda filament vytéká z trysky rovnoměrně. Zaznamená-li problémy, může být nutné vyčistit trysku. [28]

### *Velmi nízká výška vrstvy*

Otáčí-li se vlákno volně a extrudér není ucpaný. Snaží-li se uživatel tisknout při extrémně nízké výšce vrstvy, jako je např. 0,01 mm, existuje jen velmi malý prostor pro plast pro opuštění trysky. Tato mezera pod tryskou je jen 0,01 mm vysoká, to znamená, že materiál může mít potíže s extruzí z trysky. Je potřeba výšku vrstvy zvýšit, aby se ukázalo, byl problém eliminován. [28]

### *Nízká kvalita filamentu*

Jednou z nejčastějších příčin nekonzistentního vytlačování, které doposud nebylo zmíněno, je kvalita vlákna. Nízká kvalita vlákna může obsahovat další přísady, které negativně ovlivňují konzistenci struny. Jiná vlákna mohou mít nekonzistentní průměr vlákna, která také způsobí nekonzistentní vytlačování. Mnoho filamentů degraduje vlivem stáří materiálu a okolních podmínek, jímž je materiál vystaven. V takovém případě je třeba vyzkoušet filament od jiného výrobce, případně jinou cívku od stejného výrobce. [28]

### *Mechanické potíže s extrudérem*

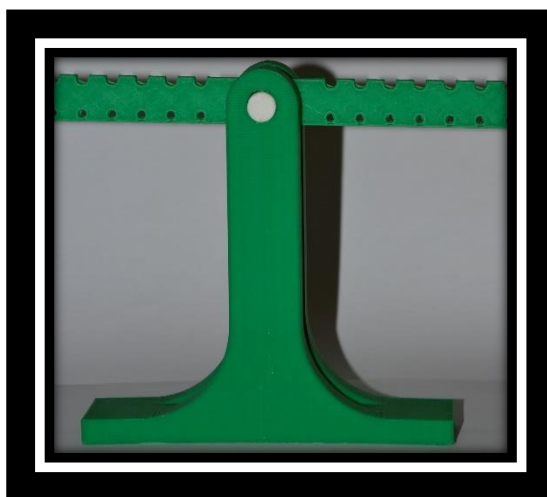
Vyloučil-li uživatel potíže, které byly řešeny výše a stále přetrvávají problémy s nestejným vytlačováním, pak možná bude třeba zkontrolovat mechanické části extrudéru. Mnoho extrudérů používá hnací ozubené kolo s ostrými zuby, které „se zakousne“ do vlákna. To umožňuje extrudéru posun vlákna. Extrudéry také umožňují regulovat přítlak posuvných kol. Pokud je vůle mezi koly příliš velká, negativně to ovlivňuje schopnost extrudéru přesně ovládat pozici vlákna. [28]

## 11 Modely vhodné k použití v hodinách fyziky, nebo pracovních činností

Zaměření mojí aprobační práce je fyzika pracovní činnosti pro 2. stupeň ZŠ, proto zde uvedené a vytvořené modely se budou týkat těchto předmětů. Základní školy v hodinách fyziky a technické výchovy mnohdy trpí nedostatkem pomůcek pro jednotlivé žáky, nebo jsou pomůcky po dlouholetém používání na hranici své životnosti. I když mnoho firem nabízí školám modernizované pomůcky. Pomůcky od těchto firem jsou značně finančně náročné. Situaci lze změnit pomocí 3D tiskárny. Rutinní učební látka se může stát mnohem zajímavější i pro samotného učitele. Učitel má možnost učit názorněji a zajímavěji, než pouze pomocí animací a videí.

### 11.1 Výuka fyziky

Žáci dle RVP v hodinách fyziky absolvují problematiku týkající se **páky – rovníramenných vah**. Pro případný nedostatek pomůcek si žáci nemohou vyzkoušet podrobněji a ve vlastních rukou závislost momentu síly  $M$  na délce ramene  $r$ . V takovém případě si učitel může vytisknout model rovníramenné páky pro žáky. Model byl získán na webové adrese: <http://www.thingiverse.com/thing:1268804>. Avšak po odzkoušení objektu bylo zjištěno, že ramena vah jsou nedostatečně dlouhá vzhledem k mohutnosti nosného rámu a první otvor pro zavěšení břemena je příliš blízko u otočného čepu. Z důvodu těchto nevýhod byly vymodelovány nová ramena vah. Po spojení s nově vymodelovanými rameny má model větší variabilitu v hodině fyziky.



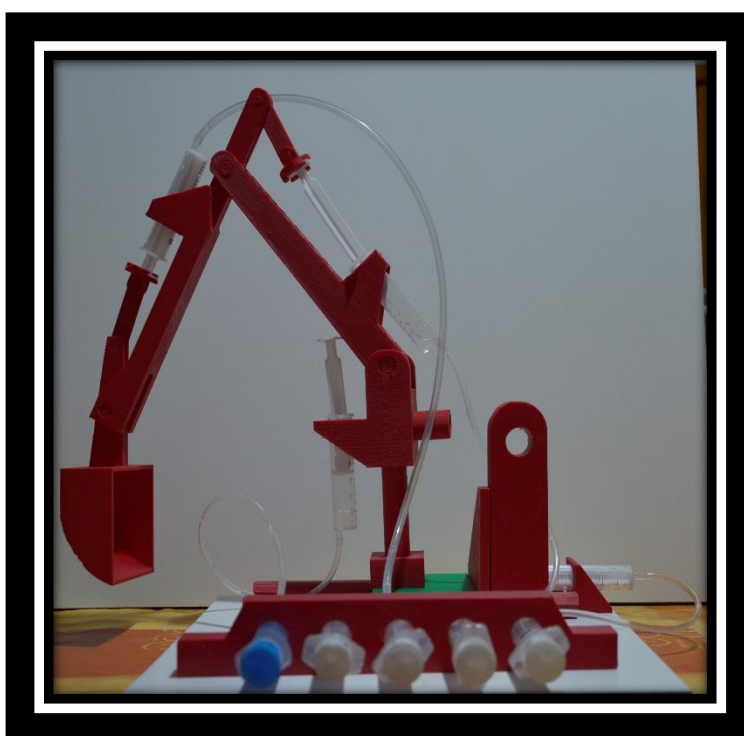
Obrázek 63: Rovníramenné váhy

Tabulka 3: Parametry rovníramenných vah

Parametry modelu:	
hmotnost modelu $m$ [g]:	42,24
doba tisku modelu $t$ [min]:	223

Dalším modelem, který jsem zvolil pro fyziku je **prototyp hydraulického rýpadla** pro lepší pochopení podstaty hydraulického lisu, přenos tlaku  $p$  v kapalině a principu hydraulického rýpadla (návaznost na praktické využití problematiky mimo školu). Model byl značně časově náročný na tisk, během tisku se vyskytovalo mnoho chyb v souborech získaných z webu: <http://www.thingiverse.com/thing:359220>.

Především mnoho dílců modelu je rozměrných pro tisk na tiskárně MakerBot Replicator 2X a některé byly vytištěny na hranici tisknutelných rozměrů 3D tiskárny. Základna hydraulického rýpadla musela být nahrazená deskou z dřevotřísky, jelikož originál nebylo možné rozměrově umístit na stavěcí platformu. Navíc množství použitého materiálu pro základní desku by bylo neekonomické. Soubor obsahující elektronický model základny ližin musel být znovu vymodelovaný, jelikož obsahoval chybu a v žádném případě nelze model vytisknout bez chyby – vytiskne se pouze  $\frac{1}{3}$  modelu. Následně byly jednotlivé obrobny a spojeny dohromady pomocí šroubů a kyanoakrylátového lepidla.



Obrázek 64: Model hydraulického rýpadla

Tabulka 4: Parametry modelu hydraulického jeřábu

Parametry modelu:	
hmotnost modelu $m$ [g]:	385
doba tisku modelu $t$ [min]:	1 125

Zajímavým modelem je **Tantalův pohár**, či jinak také nazývaný Pythagorův pohár, který se samovolně vyprázdní před vypitím jeho obsahu. Pohár je tvořen kapilárou, která v závislosti na množství nápoje se buďto vyprázdní celý obsah poháru, nebo také nikoliv. Z fyzikálního hlediska se jedná o vyrovnávání rozdílu mezi hydrostatickým  $p_h$  a atmosférickým tlakem  $p_{atm}$ .



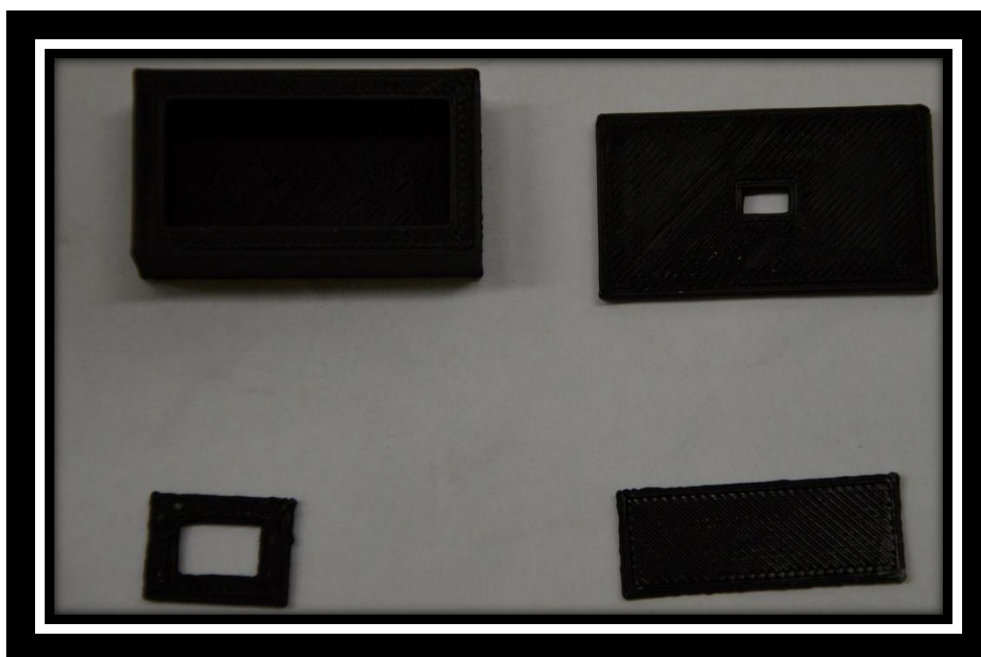
Obrázek 65: Fotografie Tantalova poháru

Tabulka 5: Parametry modelu Tantalova poháru

Parametry modelu:	
hmotnost modelu $m$ [g]:	6,69
doba tisku modelu $t$ [min]:	30



Model, který bude určitě učiteli oporou je **camera obscura**. Model bude názorným příkladem v optice pro ukázkou přímočarého šíření světla v prostoru. Seznámení s historií fotografie a fotoaparátů. Objekt byl vytištěn z černého ABS materiálu pro lepší zobrazení zachyceného předmětu, nebo prostředí. Model byl získán na webové stránce: <http://www.thingiverse.com/thing:2555>. Poté musel být převeden soubor z formátu .skp do formátu .stl. Ze zkušebních důvodů byla provedena miniaturizace, model se ukázal jako vhodný pro použití ve výuce.



Obrázek 66: Miniaturní verze camery obscury

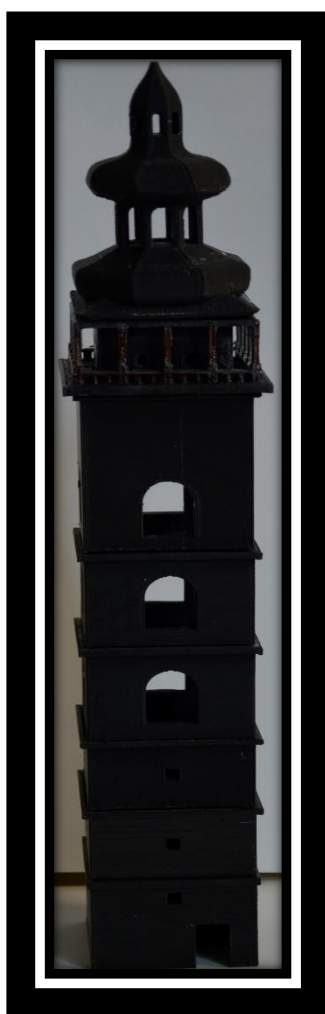
Tabulka 6: Parametry modelu camera obscura

Parametry modelu:	
hmotnost modelu $m$ [g]:	119
doba tisku modelu $t$ [min]:	319

## 11.2 Výuka pracovních činností

V rámci průběžné praxe byl pro žáky vytvořen projekt **Věže Českých Budějovic**. Projekt započal exkurzí pro nejznámějších věží Českých k získání potřebných znalostí – detaily, materiály atd. Ze svých nabitých znalostí v dalších hodinách provedli v rámci menších skupinek návrhy svých věží včetně výkresové dokumentace. Poté věž byla postavena dle jejich návrhu.

Myšlenka projektu by mohla být vylepšena o aplikaci 3D tisku – seznámení s moderní technologií tvorby dílů, aktivizace učební látky, směřování žáků do technických oborů a tvorba technického myšlení u žáků. Žáci si mohou vyzkoušet práci konstruktéra, designera a technologa při tvorbě věže.

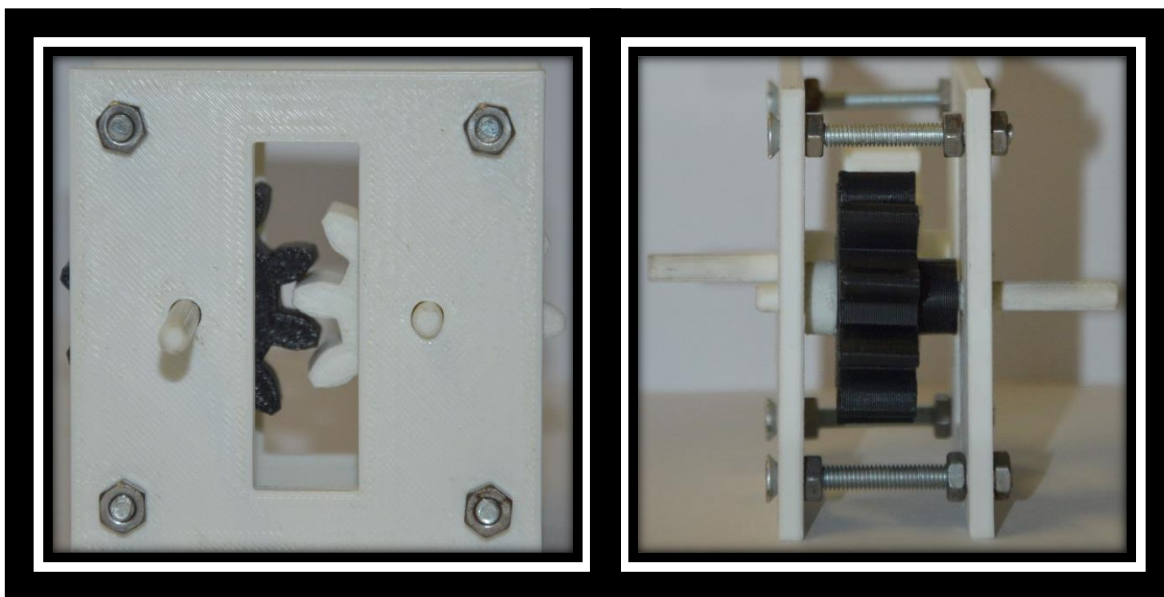


Obrázek 67: Fotografie Černá věž

Tabulka 7: Parametry modelu Černé věže

Parametry modelu:	
hmotnost modelu $m$ [g]:	178
doba tisku modelu $t$ [min]:	610

Poslední model, který je připraven pro pracovní činnosti, je model **ozubeného soukolí**, kde žáci mohou názorně vidět jednoduché ozubené kolo zapadající do zubových mezer druhého ozubeného kola. Principálně se jedná o nejjednodušší převodovku, kterou se lze vytvořit – přenos otáček  $n$  (krouticího momentu  $M_k$ ) z hnací hřídele na druhý hřídel. Na tomto modelu lze vysvětlit i princip zubového čerpadla. Jedná se o relativně malý a jednoduchý model, který v hodinách pracovních činností najde rozmanité uplatnění.



Obrázek 68: Fotografie modelu ozubené převodovky

Tabulka 8: Parametry modelu ozubeného soukolí

<b>Parametry modelu:</b>	
hmotnost modelu $m$ [g]:	42
doba tisku modelu $t$ [min]:	130

## 12 Webové stránky vhodné pro získání různých 3D modelů

V možnostech dnešní doby je sdílení dat mezi jednotlivými uživateli v rámci celého světa. I v oblasti tvorby elektronických modelů pro 3D tisk je možné nalézt nespočet webových stránek nabízejících zdarma, nebo i za určitý poplatek modely a šetřit čas uživatele při návrhu a následném testování modelu v 3D tiskárně.

V rámci tvorby diplomové práce nemůže být opomenuto vypsání serverů, na kterých lze získat zajímavé modely pro 3D tiskárny:

- <http://www.thingiverse.com>
- <http://www.tracepartsonline.net>
- <https://pinshape.com/3d-marketplace>
- <https://www.youmagine.com/designs>
- <http://www.stlfinder.com>

## 13 Náklady na tisk 3D tiskárnou

U většiny elektrických zařízení a strojů uživatele zajímají náklady potřebné na jeho provoz. I v případě 3D tiskárny je možné tyto parametry vyjádřit.

### 13.1 Výpočet materiálových nákladů

Celkové materiálové náklady na tisk modelů lze vyjádřit dle následujícího vztahu (1.1):

$$N_s = m_s \times c_m \quad (1.1)$$

kde:

$N_s$  [Kč] – výdaje na materiál tištěného předmětu,

$m_s$  [kg] – hmotnost spotřebovaného materiálu,

$c_m$  [Kč] – cena pořízené cívky.

### 13.2 Výpočet energetických výdajů

Celkové náklady na energii přitíštění modelů lze vyjádřit dle následujícího vztahu (1.2):

$$N_e = t_s \times C_e \times P_t \quad (1.2)$$

kde:

$N_e$  [Kč] – náklady na energii tiskárny,

$t_s$  [h] – doba tisku předmětu/předmětů,

$P_t$  [kW] – příkon 3D tiskárny,

$C_e$  [Kč  $\times$  kWh<sup>-1</sup>] – cena za energii od distributora.

### 13.3 Bilance nákladů modelů vytvořených pro diplomovou práci

Většina tištěných modelů pro diplomovou práci neumožňuje porovnání s cenami dodávaných pomůcek od dodavatelů pro ZŠ. Jedná se o originální a zajímavé modely, které běžně nelze pro školu získat v komerční sféře. Rovnoramenné váhy demonstrační je možné získat pouze s cenou okolo 5 800 Kč, nákup většího množství pro potřebu výuky nepřipadá v úvahu. Z tabulky 9 lze vidět náklady na provoz jsou pro školu přijatelné.

Tabulka 9: Náklady modelů tištěných pro DP

Model	Náklady na energii [Kč]	Náklady na filament [Kč]
hydraulické rýpadlo	89	200
rovnoramenné váhy	18	22
camera obscura	26	62
ozubené soukolí	10	21
Černá věž	49	93

Pořízením cenově dostupné 3D tiskárny pro školy lze provést určitou inovaci v učebních plánech. Modely byly vybrány pouze pro dvojici předmětů vyučovaných na ŽŠ, v přírodopise lze vytisknout kostru člověka po názorný model DNA šroubovice. V chemii lze vytvořit zobrazení vazeb jednotlivých prvků v periodické tabulce, případně pomůcek pro chemické pokusy. V zeměpise lze vytvořit slepé mapy, zobrazení zemského jádra atd. Možnosti tvorby jsou široké a přesahují rámec diplomové práce.

## 14 Závěr

Diplomová práce se zabývá technologií nazývanou 3D tisk. 3D tisk lze popsat jako soubor technologií, které lidem dovolují tvořit trojrozměrné modely bez jakéhokoliv omezení. Modely nachází široké uplatnění v běžném životě jednotlivce, ale i rozvoje celé společnosti

V úvodu diplomové práce jsem se snažil ucelit historii, vývoj a další cenné poznatky z období vzniku jednotlivých metod až do současnosti. Čtenář si může udělat přehled o provázanosti jednotlivých technologií a významných milnicích konkrétní rychlé tvorby prototypů.

V návaznosti na historickou část diplomové práce jsem sestavil důkladnější seznámení s významnými metodami Rapid Prototypingu a rozčlenil je dle určitých hledisek. U jednotlivých technik rychlé tvorby protypů jsou uvedeny výhody a nevýhody včetně významných parametrů.

Do diplomové práce byly uvedeny základní informace o firmě MakerBot, která je výrobcem 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X, kterou vlastní Katedra aplikované fyziky a technické výchovy Pedagogické fakulty JU v Českých Budějovicích, a která byla analyzovaná z hlediska jednotlivých komponent významných pro technologii Fused Deposition Modeling (FDM). V rámci kapitoly je podrobně vysvětlena spojitost mezi jednotlivými součástmi a kapitola je také doplněna o nákresy pro lepší pochopení principu činnosti 3D tiskárny.

Dalším bodem zájmu byly materiály vhodné pro tisk přímo na tiskárně MakerBot. Uvedl jsem podrobný rozbor materiálu z hlediska jejich surovin, upotřebení, škodlivosti, odolnosti vůči okolnímu prostředí a parametrech nastavení pro metodu FDM. Pro zajímavost jsem uvedl významné producenty filamentu vhodné jako neoriginální náplň pro tiskárnu MakerBot na českém trhu.

Byla provedena charakteristika softwarových formátů upotřebitelných pro 3D tiskárnu MakerBot včetně rozdílů mezi formáty a vhodnost formátu pro určité situace. V návaznosti na formáty, které MakerBot používá, podstatná část DP pojednává o programovém vybavení, které slouží uživateli pro ovládání 3D tiskárny Replicator 2X. Software MakerBot Desktop byl podroben testování a vyzkoušeny parametry, které ovlivňují tvorbu součástí.

Práce dále obsahuje význačné zástupce 3D modelovacích programů, které se uplatňují pro tvorbu 3D elektronických modelů. U každého zástupce bylo charakterizováno pracovní prostředí pro lepší orientaci v programu. Zástupci byly vyzkoušeny, následně vyzdviženy jejich silné a slabé stránky.

V neposlední řadě byla provedena analýza možností tiskárny MakerBot Replicator 2X. 3D tiskárna vykazuje jisté limity a omezení tisku. Proběhla určitá doporučení pro práci s tiskárnou pro dosažení vyšší efektivity při tisku.

Při seznamování s 3D tiskárnou docházelo k určitým potížím při 3D tisku, musela být nalezena nápravná řešení pro eliminaci problémů. Významné body jsou zaznamenány a měly by sloužit jako návod při opětovném výskytu.

Následující kapitola diplomové práce pojednává o využití 3D tisku na základní škole v hodinách fyziky a pracovních činností. Některé modely byly vytvořeny autorem diplomové práce, jiné byly získány z příslušné webové databáze modelů. Modely byly vytištěny a následně vyzkoušeny. V některých případech bylo navrženo řešení upravující modely pro lepší využití v hodinách, případně byl model upraven pro tisk na tiskárně MakerBot Replicator 2X.

Pro uživatele 3D tiskáren a zájemce o 3D tisk byl vytvořen jmenný seznam významných webových serverů pro získávání 3D elektronických modelů od cizích autorů. Databáze byla vytvořena pro spoření času zájemcům při získávání modelů a prohledáváním internetu pro nalezení webu s modely.

Poslední kapitola se zabývá výpočtem nákladů na provoz 3D tiskárny z hlediska energií a materiálu. Jsou uvedeny náklady na dva hlavní modely fyziky a pracovních činností – hydraulické rýpadlo a Černou věž.

## 15 Seznam použité literatury

- [1] 3D PRINTING INDUSTRY. *THE FREE BEGINNERS GUIDE TO 3D PRINTING* [online]. 3D Printing Industry, 2014 [cit. 2015-09-27]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2014/07/3D-Printing-Guide.pdf>
- [2] CHLEBO, Martin. *Časová linie 3D tisku I.: o3D* [online]. Imanica, s r. o., 2013 [cit. 2015-09-28]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/10/casova-linie-3d-tisku-i/>
- [3] *Technologie 3D tisku: ITnetwork* [online]. ITnetwork, 2014 [cit. 2015-09-30]. Dostupné z: <http://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>
- [4] WOHLERS, Terry T. *BPM Technology: Why the company failed: Wohlers Associates* [online]. Wohlers Associates, 1998 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: <http://www.wohlersassociates.com/JanMar98pti.html>
- [5] *The History of 3D Printing: 3Ders* [online]. Nizozemsko: 3Ders, ©2011-2015 [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/3d-printing/3d-printing-history.html>
- [6] *Rapid Prototyping Patent Museum: CASTLE ISLAND CO.* [online]. U.S.A.: Rapid Prototyping Patent Museum, 2010-09-10 [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: [http://www.additive3d.com/museum/mus\\_2.htm](http://www.additive3d.com/museum/mus_2.htm)
- [7] WOHLERS, Terry T. a Tim GORNET. *History of additive manufacturing: Wohlers Associates* [online]. Wohlers Associates, 2012 [cit. 2015-10-20]. Dostupné z: <http://www.wohlersassociates.com/history2012.pdf>
- [8] CHLEBO, Martin. *Časová linie 3D tisku II.: o3D* [online]. Imanica, s r. o., 2013 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/10/casova-osa-3d-tisku-ii/>
- [9] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl: MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [10] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 10. díl: MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [11] HAPCO, INC. *What does the term "post cure" mean?: Frequently Asked Questions* [online]. U.S.A.: Hapco, Inc., ©2010 [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.hapcoweb.com/faqs\\_postcure.htm](http://www.hapcoweb.com/faqs_postcure.htm)
- [12] *Selective Laser Sintering: 3D tisk* [online]. Brno: Nová média, s r. o., ©2014 [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>



- [13] *Technologie Rapid Prototyping FDM: Katedra výrobních systémů a automatizace* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/pro-firmy/technologie-rapid-prototyping-fdm>
- [14] *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping* [online]. Brno: VUT Ústav strojírenské technologie [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_technologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)
- [15] *3D tisk-metody: 1. Přehled a principy základních metod* [online]. Praha, ©2013 [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [16] *O 3D tisku: 3Dwiser* [online]. Praha: 3Dwiser, s r. o. [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.3dwiser.com/o-3d-tisku/>
- [17] *UČEBNÍ SBORNÍK PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ: USA STUDY TOUR* [online]. [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: [http://www.industrialengineering.cz/dokumenty/ucebni\\_sbornikpripadovych\\_studii.pdf](http://www.industrialengineering.cz/dokumenty/ucebni_sbornikpripadovych_studii.pdf)
- [18] HOMOLA, Jan. *Kvalitní 3D tiskárny MakerBot pořídíte překvapivě levně: Konstrukter* [online]. Brno: Nová média, s r. o., 2015 [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/02/17/kvalitni-3d-tiskarny-makerbot-poridite-prekvapive-levne/>
- [19] CANESSA, Enrique (ed.), Carlo FONDA (ed.) a Marco ZENNARO (ed.). *Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development* [online]. ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013 [cit. 2015-11-09]. ISBN 92-95003-48-9. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20150402165048/http://sdu.ictp.it/3d/book.html>
- [20] *MakerBot Replicator 2X: USER MANUAL* [online]. New York: MakerBot [cit. 2015-11-09]. Dostupné z: [https://mindtouch.makerbot.com/@api/deki/files/719/MakerBot\\_Replicator2X\\_User\\_Manual\\_Eng\\_V3.pdf](https://mindtouch.makerbot.com/@api/deki/files/719/MakerBot_Replicator2X_User_Manual_Eng_V3.pdf)
- [21] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *ZÁKLADY 3D TISKU* [online]. Prusa Research, s r. o., 2014 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

- [22] DYBAŁA, Bogdan, Tomasz BORATYŃSKI, Jacek CZAJKA, Tomasz BĘDZA, Mariusz FRANKIEWICZ a Tomasz KURZYNOWSK. : *Mechatronika* [online]. Modul 9: Rychlé vytváření prototypů. Warszawa, Polsko [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/forschung/verbundprojekte/minos/cz/download/Webseite/Modul%209/schuelerhandbuch.pdf>
- [23] Výstupní data: 3d - skenování. *3D SCAN* [online]. Brno: SolidVision, s r. o., 2013 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/vystupni-data>
- [24] *OBJ přípona souboru* [online]. Corel Corporation [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.reviversoft.com/cs/file-extensions/obj>
- [25] MakerBot Support. *MakerBot* [online]. New York, 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [https://www.makerbot.com/support/new/3D\\_Printing/Knowledge\\_Base/File\\_Types](https://www.makerbot.com/support/new/3D_Printing/Knowledge_Base/File_Types)
- [26] Krokový motor - princip. *MyLMS* [online]. ©LMSSoftware2006-2016 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.mylms.cz/text-krokovy-motor-princip/>
- [27] *Print Settings: MakerBot Desktop (Software)* [online]. USA, 2016 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <https://support.makerbot.com/learn/makerbot-desktop-software/print-settings>
- [28] *Simplify3D: Print Quality Troubleshooting Guide* [online]. 2016 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#not-extruding-at-start-of-print>

## 16 Seznam obrázků

Obrázek 1: Zjednodušený popis procesu 3D tisku.....	13
Obrázek 2: Princip SLA technologie. Převzato a upraveno z [1] .....	15
Obrázek 3: DLP technologie. Převzato a upraveno z [1].....	16
Obrázek 4: SLS technologie. Převzato a upraveno z [1] .....	18
Obrázek 5: FDM technologie. Převzato a upraveno z [1].....	20
Obrázek 6: Binder Jetting technologie. Převzato a upraveno z [1].....	21
Obrázek 7: Inkjet Material Jetting technologie. Převzato a upraveno z [1].....	22
Obrázek 8: Laminated Object Manufacture technologie. Převzato a upraveno z [10] .....	23
Obrázek 9: EBM technologie. Převzato a upraveno z [1].....	25
Obrázek 10: Čelní pohled MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20].....	30
Obrázek 11: Boční pohled MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20].....	30
Obrázek 12: Čelní pohled na extruder. Převzato a upraveno z [20] .....	31
Obrázek 13: Pravoúhlý pohled na extruder. Převzato a upraveno z [20].....	31
Obrázek 14: Nákres portálové konstrukce 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X.....	32
Obrázek 15: Nákres zjednodušeného extruderu MakerBot Desktop 2X .....	34
Obrázek 16: Nákres nosného rámu 3D tiskárny s vyhřívanou stavěcí platformou.....	36
Obrázek 17: Snímek chladné vyhřívané stavěcí platformy.....	37
Obrázek 18: Snímek s měnicí se teplotou vyhřívané stavěcí platformy .....	37
Obrázek 19: Snímek ohřáté plošiny na 120° C .....	37
Obrázek 20: Zadní pohled na tiskárnu MakerBot Replicator 2X. Převzato a upraveno z [20] .....	39
Obrázek 21: Zjednodušený princip krokového motoru. Převzato a upraveno z [26] .....	40
Obrázek 22: Nákres 3D tiskárny se zaměřením na krokové motory a řemenice pohonu ....	41
Obrázek 23: Zobrazení LCD panelu a ovládacích tlačítek. Převzato a upraveno z [20] .....	42
Obrázek 24: Zobrazení 3D objektu pomocí STL formátu. Převzato a upraveno z [23] .....	45
Obrázek 25: Zobrazení 3D objektu pomocí OBJ formátu. Převzato a upraveno z [23] .....	46
Obrázek 26: Základní pracovní MENU programu MakerBot Desktop .....	47
Obrázek 27: Zjednodušené nastavení parametrů tisku.....	48
Obrázek 28: Dialogové okno pokročilého nastavení tisku s jednotlivými záložkami .....	50
Obrázek 29: Software MakerBot Desktop pro řízení parametrů 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X .....	51
Obrázek 30: Nastavení parametrů při vytlačování filamentu z extruderu pro 3D tiskárnu .52	
Obrázek 31: Softwarová regulace parametrů ovlivňující výplň objektu .....	54

Obrázek 32: Dialogové okno upravující možnosti nastavení výplně objektu.....	55
Obrázek 33: MakerBot Desktop upravující parametry tisku pro dvojici rozdílných materiálu nebo barev .....	56
Obrázek 34: Optimalizace základny modelu .....	57
Obrázek 35: Dialogové okno zobrazující nastavení pomocných konstrukcí .....	59
Obrázek 36: Software MakerBot Desktop – záložka pro nastavení parametrů pravého extruderu (analogie s levým extruderem) .....	61
Obrázek 37: Pracovní plocha programu OpenSCAD .....	63
Obrázek 38: Program Google SketchUp.....	64
Obrázek 39: Pracovní plocha DesingSpark Mechanical .....	65
Obrázek 40: Program SolidWorks - tvorba modelu, objektu.....	66
Obrázek 41: SolidWorks - uložit jako.....	67
Obrázek 42: Dialogové okno s možností volby formátu .....	67
Obrázek 43: Dialogové okno umožňující nastavení voleb pro formát STL .....	68
Obrázek 44: Optimalizace formátu STL v programu SolidWorks .....	69
Obrázek 45: Okno programu Autodesk 123 Design .....	70
Obrázek 46: Plocha pro výběr činnosti v programu Autodesk 123Catch.....	71
Obrázek 47: Snímek průběhu procesu vytváří elektronického modelu – Autodesk 123 Catch .....	72
Obrázek 48: Chyba vyskytující se ve všech mnou zkoušených případech.....	72
Obrázek 49: Nákres minimálních rozměrů detailů pro kvalitní 3D tisk .....	74
Obrázek 50: Doporučené minimální rozměry tenkostěnných modelů.....	75
Obrázek 51: Objekt se zkosenými a oblými hranami .....	76
Obrázek 52: Eliminace otřepu u koule na vyhřívané podložce a následné spojení koule ...	76
Obrázek 53: Eliminace otřepu u válcové součásti .....	76
Obrázek 54: Předmět na vyhřívané podložce.....	77
Obrázek 55: Nevhodná orientace modelu v prostoru tiskárny v důsledku výstavby většího množství podpurných konstrukcí, doby tisku a menší tuhosti základny modelu v závislosti na podporách.....	79
Obrázek 56: Správná orientace modelu – odstranění vyjmenovaných nedostatků v obrázku 55.....	79
Obrázek 57: Nevhodná orientace estetického modelu - nízká kvalita pohledové strany....	80
Obrázek 58: Správná orientace estetického modelu - vyšší kvalita pohledové strany .....	80
Obrázek 59: Pohled na očištěnou stavěcí platformu 3D tiskárny MakerBot Replicator 2X82	
Obrázek 60: Nanesená čistá kaptonová fólie .....	82

Obrázek 61: Koncentrovaný roztok acetonu a filamentu ABS.....	83
Obrázek 62: Nákres postupu - umístění objektu v acetonové lázni na vyhřívané podložce	88
Obrázek 63: Rovnoramenné váhy.....	110
Obrázek 64: Model hydraulického rýpadla.....	111
Obrázek 65: Fotografie Tantalova poháru .....	112
Obrázek 66: Miniaturní verze camery obscury .....	113
Obrázek 67: Fotografie Černá věž .....	114
Obrázek 68: Fotografie modelu ozubené převodovky.....	115

## 17 Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiál ABS .....	28
Tabulka 2: Materiál PLA .....	29
Tabulka 3: Parametry rovníramenných vah .....	110
Tabulka 4: Parametry modelu hydraulického jeřábu .....	111
Tabulka 5: Parametry modelu Tantalova poháru .....	112
Tabulka 6: Parametry modelu camera obscura .....	113
Tabulka 7: Parametry modelu Černé věže .....	114
Tabulka 8: Parametry modelu ozubeného soukolí .....	115
Tabulka 9: Náklady modelů tištěných pro DP .....	117

## 18 Seznam rovnic

Rovnice (1.1): Výpočet nákladů na materiál.....	116
Rovnice (1.2): Výpočet nákladů na spotřebu elektrické energie .....	117