

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO–TECHNOLOGICKÁ

Katedra polygrafie a fotofyziky

Příprava tiskových módů na tiskárně Rebel II

Štěpánka Kosová

Bakalářská práce

2017

UNIVERSITY OF PARDUBICE

FACULTY OF CHEMICAL–TECHNOLOGY

Department of Graphic Arts and Photophysics

Preparing print modes on the Rebel II printer

Štěpánka Kosová

Bachelor thesis

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Štěpánka Kosová**
Osobní číslo: **C13512**
Studijní program: **B3441 Polygrafie**
Studijní obor: **Polygrafie**
Název tématu: **Příprava tiskových módů na tiskárně Rebel II**
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Z dostupné literatury nastudujte, jaké technologie se využívají pro 3D tisk. Podrobně popište technologii založenou na termálním extruderu, jaké jsou požadavky na datové soubory a jak se tyto soubory zpracují pro tisk. Rovněž popište nejvyužívanější materiály a jejich vlastnosti s ohledem na tiskový proces.
- 2) Pro vybrané možnosti rozlišení a druhy tisknutelných objektů modifikujte a optimalizujte nastavení tiskárny tak, aby se dosáhla co nejlepší kvality vzorků.
- 3) Finální nastavení demonstруйте na konkrétních objektech.
- 4) Získané výsledky přehledně zpracujte ve formě závěrečné práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Panák, Ph.D.

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **29. února 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. července 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2017

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 4. 7. 2017

Štěpánka Kosová

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Ondreji Panákovi Ph.D., za odborné vedení, trpělivost a ochotu při zpracování této bakalářské práce.

Anotace

Cílem práce bylo vyhotovit tisková nastavení pro vybraná rozlišení na 3D tiskárně Rebel II. Tisk byl optimalizovaný pro dva standardní materiály, kterými jsou ABS a PLA. Pro testování byly využity základní geometrické tvary a nastavení ověřeno na reálném objektu. Dále práce popisuje vybrané technologie 3D tisku jako SLA, SLS, LOM a podrobněji se věnuje FFF. Rovněž informuje o projektu RepRap.

Klíčová slova: 3D tisk, RepRap, Rebel II, FDM, FFF, tiskové parametry

Anotation

The aim of the work was to make print setting for selected resolutions using 3D printer Rebel II. Print setting was optimized for standard materials such as ABS and PLA. For testing, basics geometric shapes were used and the final setting was verified on a real object. Furthermore, the thesis describes selected 3D printing technologies such as SLA, SLS, LOM and in detail describes FFF technology. Also informs about RepRap project.

Key words: 3D print, RepRap, Rebel II, FDM, printing settings

Obsah

1	Úvod.....	13
2	Teoretická část	14
2.1	3D tisk obecně	14
2.2	Stručná historie	14
2.3	Software a příprava dat	15
2.4	Technologická část	18
2.4.1	Fotopolymerizace.....	18
2.4.2	Spékání práškové vrstvy	21
2.4.3	Laminace archů.....	22
2.5	Extruze materiálu	25
2.5.1	Fused filament fabrication	25
3	Experimentální část.....	31
3.1	Materiálové vybavení	31
3.2	Přístrojové vybavení	31
3.3	Programové vybavení	33
3.4	Experimentální postup	34
3.4.1	Testovací modely.....	34
3.4.2	Tiskový proces.....	36
4	Výsledky a diskuse	52
5	Závěr	71

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Shrnutí vlastností využitých materiálů (38) (39) (40)</i>	29
<i>Tabulka 2 Shrnutí parametrů tiskárny Rebel II</i>	33
<i>Tabulka 3 Konkrétní laborované parametry tisku v programu Slic3r</i>	37
<i>Tabulka 4 Parametry, které byly fixní jak pro ABS tak i pro PLA a zároveň pro všechny rychlosti tisku.</i>	38
<i>Tabulka 5 Výsledné nastavení rozlišení tiskových parametrů pro tisk materiálem PLA</i>	52
<i>Tabulka 6 Výsledné nastavení tiskových parametrů pro tisk materiálem ABS</i>	53
<i>Tabulka 7 Fixní parametry, které byly konstantní během tiskového procesu pro oba materiály a zároveň pro všechny tiskové rychlosti.</i>	54
<i>Tabulka 8 Porovnání časové složky při tisku finálního objektu z obrázku 14. Doba tisku pro nastavené rozlišení vychází ze zjištěných a nastavených finálních parametrů, uvedených v tabulkách 5, 6 a 7</i>	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Časová osa patentů a významných událostí</i>	15
<i>Obrázek 2 Workflow od nápadu po tisk</i>	16
<i>Obrázek 3 Znárodnění trojúhelníkové sítě Stl formátu (9)</i>	17
<i>Obrázek 4 Schéma SLA tiskárny (20)</i>	20
<i>Obrázek 5 Schéma SLS procesu (21)</i>	22
<i>Obrázek 6 Schéma LOM procesu bond then cut (21)</i>	23
<i>Obrázek 7 Decubing – proces odstraňování zbylého materiálu z okolí prototypu (24)</i>	23
<i>Obrázek 8 Schéma cut then bond metody zvané také Ennex offset Fabbing proces (21)</i>	24
<i>Obrázek 9 Strukturní vzorec monomeru - styrenu, akrylonitrilu a butadienu</i>	27
<i>Obrázek 10 Strukturní vzorec výchozího laktidu kyseliny mléčné a produktu, kyseliny polymléčné</i>	28
<i>Obrázek 11 Grafické zobrazení vlastností materiálů PLA a ABS (37)</i>	30
<i>Obrázek 12 RepRap tiskárna Rebel II s přiloženým větrákem.</i>	32
<i>Obrázek 13 Schéma podávání a tavení materiálu pro FFF tisk (43).</i>	32
<i>Obrázek 14 Tvary testovacích objektů znázorněné na obrázcích A–F a finální testovací komplex – G</i>	35

<i>Obrázek 15 Reálný objekt prověřující testované parametry</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 16 Ukázka rozlišení tisku formou schodového efektu na objektu</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 17 Znázornění defektu „Elephant foot“ jako výsledek nesprávného nastavení teploty platformy (45)</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 18 Znázornění nesprávného nastavení pozice osy Z horkého konce trysky. Vlevo vrchní část objektu, vpravo plocha přiléhající ke sklu</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 19 Znázornění funkce perimetrů. Vlevo nastaveny 2 perimetry, vpravo 5 perimetrů Úhel stoupání: 13°; Výška vrstvy: 0,2 mm (46).....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 20 Praktické znázornění perimetrů. Vlevo rychlý tisk (výška vrstvy 0,3 mm) a 2 perimetry, vpravo kvalitní tisk (vrstva 0,2 mm) a 3 perimetry</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 21 Praktické znázornění perimetrů na rychlém tisku – vrstva 0,3 mm. Počet perimetrů vlevo 3, vpravo 2</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 22 Znázornění nízkého počtu vrchních vrstev. Tisk ABS středním rozlišením. Zvyšující se počet vrstev, zleva 3, 4, 5 a 6.</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 23 Vzory výplně dostupné v programu Slic3r. Vzorky o velikosti 20×20 mm s výplní 20 % (48).....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 24 Znázornění příliš rychlého tisku externích perimetrů, kdy docházelo k přerušování vrstev. Tištěno ABS výškou vrstvy 0,25 mm. Vzorek vlevo rychlostí 50 mm/s, vpravo snížena rychlost na 35 mm/s</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 25 Mezery mezi výplní a perimetry</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 26 Znázornění švu při nastavení pozice švu jako „nejbližší“</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 27 Nastavení retrakce materiálu v extruderu. Vlevo bez retrakce, uprostřed s retrakcí 0,5 mm, vpravo s retrakcí 0,9 mm</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 28 Separace vrstev ABS vznikající intenzivním chlazením.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 29 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 30 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex, detail</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 31 Rychlý mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 32 Rychlý mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 33 Střední mód materiálem ABS, testovací komplex.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 34 Střední mód materiálem ABS, testovací komplex, detail.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 35 Střední mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora</i>	<i>59</i>

<i>Obrázek 36 Střední mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev</i>	60
<i>Obrázek 37 Kvalitní mód materiálem ABS, testovací komplex</i>	60
<i>Obrázek 38 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex, detail</i>	61
<i>Obrázek 39 Kvalitní mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora</i>	61
<i>Obrázek 40 Kvalitní mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev</i>	62
<i>Obrázek 41 Porovnání testovacích komplexů. Zleva rychlostní mód, uprostřed střední mód, vpravo kvalitní mód</i>	62
<i>Obrázek 42 Porovnání reálných objektů tištěných materiálem ABS. Vlevo kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód</i>	63
<i>Obrázek 43 Rychlý mód materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora</i>	63
<i>Obrázek 44 Rychlý mód materiálem PLA, testovací komplex, detail</i>	64
<i>Obrázek 45 Rychlý mód materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora</i>	64
<i>Obrázek 46 Rychlý mód materiálem PLA, reálný objekt, detail vrstev</i>	65
<i>Obrázek 47 Střední mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora</i>	65
<i>Obrázek 48 Střední mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, detail</i>	66
<i>Obrázek 49 Střední mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora.</i>	66
<i>Obrázek 50 Střední mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt, detail</i>	67
<i>Obrázek 51 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora</i>	67
<i>Obrázek 52 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, detail</i>	68
<i>Obrázek 53 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora</i>	68
<i>Obrázek 54 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt, detail</i>	69
<i>Obrázek 55 Porovnání testovacích komplexů tištěných materiálem PLA. Zleva kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód</i>	69
<i>Obrázek 56 Porovnání reálných objektů tištěných materiálem PLA. Zleva kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód</i>	70

SEZNAM ZKRATEK

RP	Rapid prototyping
AM	Additive manufacturing
SLA	Stereolitography
LOM	Laminated object manufacturing
SLS	Selective laser sintering
FDM	Fused deposition modeling
DMLS	Direct metal laser sintering
SLM	Selective laser melting
CAD	Computer aided design
STL	Standard triangle language
CAM	Computer aided modeling
USB	Universal serial bus
SD	Secure digital
DLP	Digital light processing
Al	Hliník
PVC	Polyvinylchlorid
SiC	Karbid křemíku
CES	Consumer technology association
PJP	Plastic jet printing
FFM	Fused filament melting
FFF	Fused filament fabrication
RepRap	Replicating rapid prototyper
ABS	Akrylonitrilbutadienastyren
PLA	Kyselina polymléčná
PC	Polykarbonát
PETP	Polyethylentereftalát
HIPS	High impact polystyren

1 Úvod

3D tisk je progresivní metoda výroby, zdokonalující se každým rokem, zvláště metoda založená na extruzi materiálu, vytvořená pod hlavičkou RepRap. Na vývoji RepRap tiskáren se může podílet v podstatě kdokoliv vlastníci jednu z mnoha druhů těchto tiskáren.

Práce v teoretické části vysvětluje pojem 3D tisku, uvádí historický vývoj následovaný popisem významných technologií 3D tisku. Podrobněji popisuje technologii založenou na extruzi materiálu, do které je řazena využitá tiskárna Rebel II. Tato tiskárna patří do projektu RepRap, o kterém je v práci také zmínka.

Praktická část pojednává o využitém materiálovém, přístrojovém a programovém vybavení. Dále popisuje kalibraci tiskárny Rebel II, zabývá se optimalizací tiskových parametrů pro vysoké, střední a nízké rozlišení tisku. Optimalizované parametry tisku poslouží studentům či zaměstnancům katedry, kteří mohou přednastavené parametry využít. 3D tisk je poměrně časově náročná technologie a použití přednastavených parametrů s doporučeními, vede ke zkrácení doby přípravy tiskárny a k dosažení požadované kvality tisku. Nedochozí tak ke zbytečnému plýtvání materiálů a tím i tiskových nákladů.

2 Teoretická část

2.1 3D tisk obecně

3D tisk je forma aditivní produkce, kdy z digitální předlohy vzniká fyzický trojrozměrný objekt nanášením tenkých vrstev materiálu přes sebe. Mezi odvětví, kde technologie 3D tisku nacházejí uplatnění lze jmenovat malosériové produkce, fyzické objekty sloužící jako makety pro budoucí velkovýrobu či jiné unikátní tisky [1]. K důvodům využívání 3D tisku patří zrychlení a efektivita vývoje designu, ergonomie, rychlé ověření funkčnosti výrobku či snížení předvýrobních nákladů. Mimo zmíněné aspekty, rozšíření přispívá také fakt, že tyto technologie umožňují výběr tiskových materiálů s různými charakteristikami. Ať už je záměr tisku jakýkoliv, 3D tiskové technologie umožňují tvorbu objektů v krátkém čase a nejvyšší kvalitě.

2.2 Stručná historie

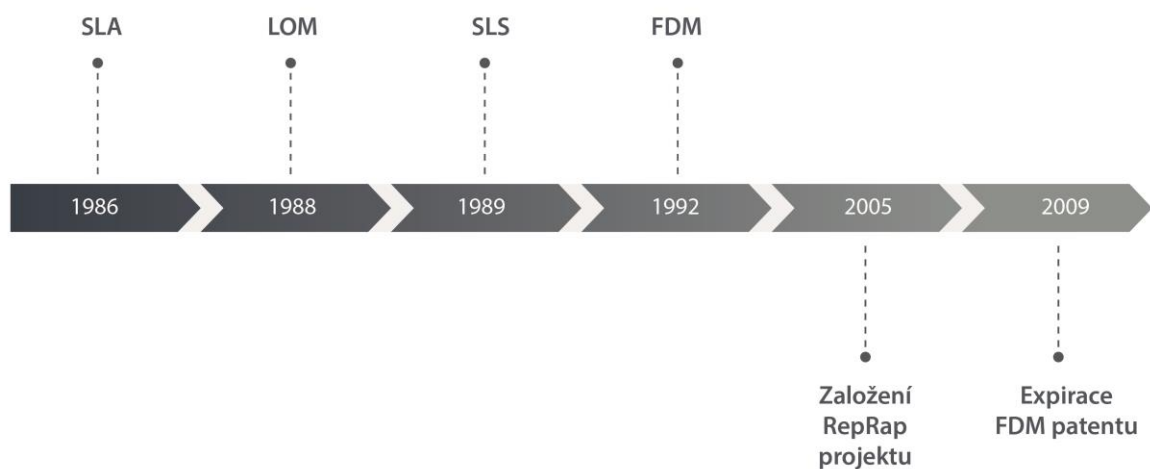
Technologie 3D tisku je stará teprve třicet let, v dnešní době však není novinkou. Původně byla označována jako tzv. Rapid Prototyping (RP), což doslova znamená „rychlá výroba prototypů“. Technologie 3D tisku byly tedy primárně určeny k výrobě prototypů v industriálním prostředí [1].

Za průkopníka je považován Charles W. Hull, který v roce 1986 získal vůbec první patent pro technologii 3D tisku [2]. Tento patent náleží Stereolitografii (SLA), což je metoda využívající UV laser pro vytvrzení tekutého fotopolymeru. Hull je rovněž spoluzakladatelem společnosti 3D Systems, která patří v současnosti k největším výrobcům 3D tiskáren.

V osmdesátých letech je rovněž udělen patent technologii Laminated Object Manufacturing (LOM), konkrétně roku 1988 [3]. LOM využívá laser, či jiný řezací nástroj, na řezání kontur materiálu. Materiál je opatřen adhezivní vrstvou, která po kontaktu s vyhřívaným válcem přilne k vrstvě předchozí. Další patentovanou technologií, vynikající hlavně pevností objektů, je Selective Laser Sintering (SLS), patentována roku 1989 Carlem Deckhardem [4]. SLS využívá laser k selektivnímu spékání práškového materiálu. Téhož roku požádal o patent Scott Crump, spoluzakladatel Stratasys Inc., pro technologii Fused Deposition Modeling (FDM), která však byla schválena až v roce 1992 [5]. Po expiraci FDM patentu v roce 2009, došlo ke značné expanzi této technologie, především díky RepRap projektu. Více o projektu RepRap v kapitole 2.5.1.1. Navíc stále stoupající konkurence

zajistila větší dostupnost a nižší ceny 3D tiskáren [6]. Časovou posloupnost vyjmenovaných technologií znázorňuje obrázek 1.

Na základních principech raných tiskových technologií, vznikly příbuzné technologie. Kupříkladu tisk využívající kovový prášek Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Selective laser Melting (SLM) se výrazně podobají SLS [7]. K mladším technologiím patří PolyJet, vycházející z inkjetového tisku. Principem je selektivní tryskání fotopolymerního materiálu, čímž vzniká velmi precizně vytištěný objekt [8].



Obrázek 1 Časová osa patentů a významných událostí

2.3 Software a příprava dat

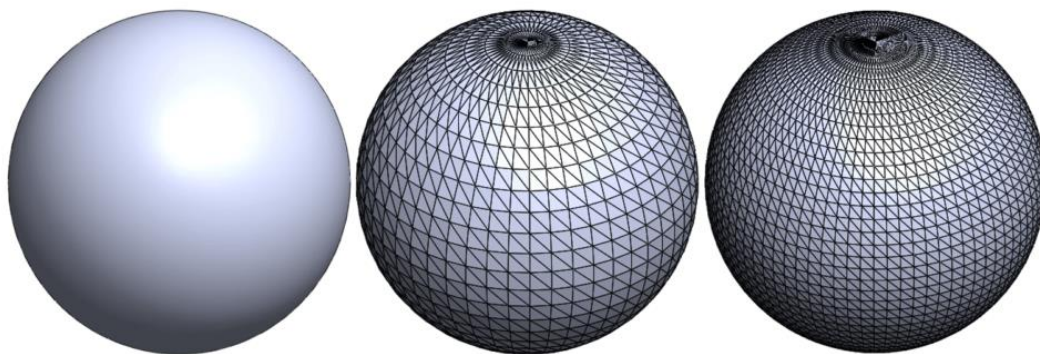
K tomu, aby byla tiskárna schopná produkce, je zapotřebí hned několik softwarů. V první řadě software pro tvorbu 3D modelu, dále software pro rozdělení modelu na jednotlivé tiskové vrstvy a nakonec tiskový ovládací software. Dnešní nabídka softwarů je široká od profesionálních programů přes uživatelsky jednodušší, z nichž některé jsou dostupné zdarma. Workflow tiskového procesu znázorňuje obrázek 2.



Obrázek 2 Workflow od nápadu po tisk

CAD Software

První skupinou softwarů pro tvorbu 3D modelu jsou softwary zvané Computer Aided Design (CAD), kam jsou řazeny například programy Autodesk 123D, SketchUp dále TinkerCad, který je dostupný online na webu nebo i uživatelsky složitější 3ds Max či Blender. Tyto programy využívají trojrozměrný prostor X, Y, Z souřadnic a zároveň umožňují export modelu do STL formátu, který reprezentuje tisková data pro 3D tisk. Zkratka STL má dva významy, buď „Standard Triangle Language“ anebo význam vychází z technologie tisku „STereoLitography“. STL formát popisuje geometrii 3D modelu pomocí normálových vektorů a polygonů, jejichž frekvence určuje rozlišení modelu [9, 10]. Model popsáný trojúhelníkovými vektory zobrazuje obrázek 3. Rozlišení přímo souvisí s objemem dat, proto je nutné zohlednit i tento faktor, protože ovlivňuje dobu exportu modelu.



Obrázek 3 Znáznornění trojúhelníkové sítě Stl formátu (9)

Nutno poznamenat, že CAD je softwarem zbytným. Důvodem je existující databáze již vytvořených 3D modelů a rovněž STL formátů ke stažení, ať už zdarma či za poplatek. V případě stažení cizího 3D modelu je vhodné zkontrolovat jeho validitu, neboť tyto podklady nemusí být správně připraveny pro technologii 3D tisku. Analýzu modelu a případnou opravu defektů je možné provést například v programech Netfabb či MeshMixer.

Každá tisková technika má pro přípravu dat svá specifika a není tomu jinak ani u 3D tisku. Již při tvorbě modelu v CAD softwaru je vhodné vytvářet objekt jako „vodotěsný“, což znamená, že plocha je zcela uzavřená, bez průniků a chybějících polygonů. Přestože tento krok není zcela stěžejní, neboť existují programy, které dokáží uzavřít povrch modelu a připravit jej tak pro tisk, bývá vysoce doporučovaný. Automatická oprava modelu je komplikovaný proces, jehož výsledný produkt může obsahovat chyby. Dalším aspektem při tvorbě modelu je tloušťka jeho stěn. Stěny modelu nemohou mít nižší, než kritickou tloušťku, kterou určuje výrobce tiskárny [1, 11]. Následuje export CAD modelu do STL formátu, který, pokud tak ještě nebylo učiněno, je vhodné zkontrolovat ve zmíněném programu Netfabb. Pokud Netfabb identifikuje chybu, upozorní na ní uživatele a nabídne její automatickou opravu. Informace o dalším zpracování tiskových dat následuje v odstavci počítačový CAM software.

CAM Software - software pro řízení procesu tisku

Dále se do předtiskové přípravy řadí Computer Aided Modeling (CAM) software, hovorově slicer, který je v kontrastu se softwarem pro 3D modelování nezbytný. Důvodem je jeho schopnost rozdělit geometrii modelu, popsanou STL formátem, na horizontální 2D

vrstvy, zahrnout charakteristiku konkrétní tiskárny, tiskových materiálů a navíc požadavky uživatele na průběh tisku. Zároveň umožňuje vygenerování pomocného materiálu, tzv. podpory, pro modely obsahující převisy. Podpory jsou nezbytné, pokud převisy svírají úhel větší než 45°. Jsou tisknuty stejným materiálem jako celý objekt, nebo i jiným materiálem pokud je na to tiskárna přizpůsobená. Především je však CAM schopen ze všech uvedených informací vygenerovat „G-kód“, který je prostředníkem udávajícím pokyny tiskárně [10]. Pokud jde o konkrétní příklady těchto softwarů, lze jmenovat MatterSlice, Skeinforge, Cura, či Slic3r.

Ovládací software tiskárny

Vyjmenovanou posloupnost softwarů uzavírá software, respektive firmware, samotné tiskárny. Jedná se o software, který zpracovává příkazy obsažené v G-kódu, na jejichž základě udává pokyny tiskárně [12]. G-kód je zasíláný z kontrolního počítače do tiskárny přes USB port, alternativou je předání informací prostřednictvím SD karty. V případě USB propojení kontrolního počítače s tiskárnou je uživateli umožněno sledovat aktuální plněné příkazů tisku.

2.4 Technologická část

Jednotlivé 3D tiskové technologie je možné rozčlenit dle používaných materiálů, kvality tisku, oblasti využití a podobně. Hlavní diferencí je však samotný princip tisku, který rozděluje norma ISO/ASTM 52900:2015 do sedmi kategorií, kterými jsou:

- *Fotopolymerizace* (Vat Photopolymerization)
- *Spékání práškové vrstvy* (Powder Bed Fusion)
- *Laminace archů* (Sheet Lamination)
- *Extruze materiálu* (Material Extrusion)
- *Tryskání pojiva* (Binder Jetting)
- *Nanášení materiálu tryskáním* (Material Jetting)
- *Přímé energetické nanášení* (Directed Energy Deposition) (13).

Další subkapitoly pojednávají o nejvýznamnějších zástupcích ze zmíněných kategorií.

2.4.1 Fotopolymerizace

Do kategorie 3D tiskových technologií využívající fotopolymer patří nejen SLA, ale i technologie využívající digitální projektor (DLP). Rozdíl mezi těmito technologiemi je

v procesu vytvrzování, kdy u DLP nejsou jednotlivé vrstvy vytvrzovány laserem postupně, nýbrž osvětlovány plošně [14]. V subkapitole je popsána Stereolitografie, jakožto významnější technologie.

2.4.1.1 Stereolitography (Stereolitografie)

Jak už bylo zmíněno v kapitole shrnující historii technik, SLA je nejstarší a stále velmi využívaná tisková aditivní technologie. Její princip tkví v postupném vytvrzování tenkých vrstev fotopolymerního materiálu UV laserem.

Stereolitografické tiskárny jsou složeny z řídicí jednotky, opticko-elektrického systému a pracovní komory. Řídicí jednotkou celého tiskového procesu je počítač, který odesílá požadavky na proces tisku. Laserový paprsek, emitovaný plynovým laserem v UV oblasti, je na požadovaná místa vychylován opticko-elektrickým systémem, zahrnující soustavu čoček a zrcadel. Paprsek je tedy fokusován do pracovní komory, skládající se z kádě naplněné fotopolymerem, v níž je pohyblivá pracovní deska (dále jen platforma) a nůž zarovnávací hladinu fotopolymeru [15]. Schéma SLA tiskárny znázorňuje obrázek 4.

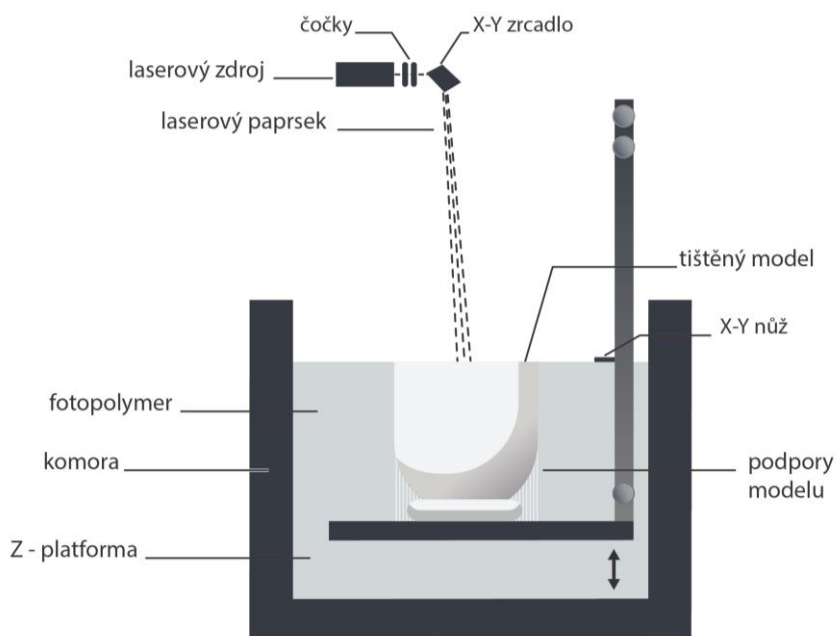
Před samotným tiskem je CAD model uložen jako STL formát, následně rozdělen na jednotlivé vrstvy a vyexportován G-kód potřebný k řízení tiskárny. Na základě těchto digitálních dat dochází k vytvrzování 2D vrstev fotopolymeru, kterým je akrylátová nebo častěji epoxidová pryskyřice. V místě interakce laserového paprsku s fotopolymerem dojde k vytvrzení tenké vrstvy a k její adhezii k vrstvě předchozí. Současně při tisku jednotlivých vrstev dochází k vytvrzování podpůrné konstrukce objektu. Po vytvrzení jedné vrstvy je platforma, jež je umístěná v kádi s fotopolymerem, posunuta dolů ve směru osy Z, právě o tloušťku vytvrzené vrstvy (standardně 0,05–0,15 mm). Před každým vytvrzením je nožem zarovnána hladina fotopolymeru pro vyhlazení nerovností na povrchu vrstvy. Tento postup je opakován pro každou vrstvu do té doby, než jsou přečtena všechna data řídicí proces tisku [15].

Jak bylo zmíněno výše, Stereolitografie patří mezi technologie, které využívají podpůrný materiál při tisku složitějších struktur. Podpory zabraňují deformaci objektu v průběhu tisku. Po vytištění jsou podpůrné struktury odstraněny nejdříve mechanicky, poté chemicky ponořením objektu do rozpouštědlové lázně na bázi alkoholu, která má za úkol odstranit nevytvrzený fotopolymer a zbylé části podpůrného materiálu. Nakonec je celý objekt dodatečně vytvrzen v UV komoře [15, 16]. Pokud jde o další závěrečné zpracování,

společnost 3D Systems informuje o možném broušení parou, pískování či elektrolytickém pokovování niklem, který zajišťuje větší odolnost, rozměrovou stálost ve vlhkém prostředí a elektrickou vodivost [17].

Co se týče předností, SLA jednoznačně vyniká kvalitou, rychlostí při zachování přesnosti tisku odhadem na 0,1 mm/100mm [15]. Přesná časová jednotka tisku je jako u všech dalších 3D technik variabilní. Tento údaj závisí na konkrétním objektu, jeho velikosti, komplexnosti a požadované přesnosti tisku. Dokončující zpracování objektu, tedy odstranění podpurného materiálu a závěrečné dotvrzení může být z časového hlediska považováno za nevýhodu, nicméně zlepšuje jak estetiku objektu, tak i jeho mechanické vlastnosti.

Nevýhodou SLA může být cena zařízení, která u jedné z nejlevnějších SLA tiskáren, XYZ Printing Nobel 1.0, začíná na 900 \$. Na úkor nízké ceny disponuje úzkým výběrem fotopolymerů a také nižším rozlišením, ve srovnání téměř s dvojnásobně dražší tiskárnou Formlabs Form 1+, která nabízí pestřejší škálu fotopolymerních materiálů a také vyšší rozlišení [18]. Co se tiskových materiálů týče, cena závisí na požadovaných vlastnostech. Obecně alternuje mezi 65 \$/kg pro standardní fotopolymer až 230 \$/kg pro speciální fotopolymer používaný ve šperkařství či zubním lékařství [19].



Obrázek 4 Schéma SLA tiskárny [20]

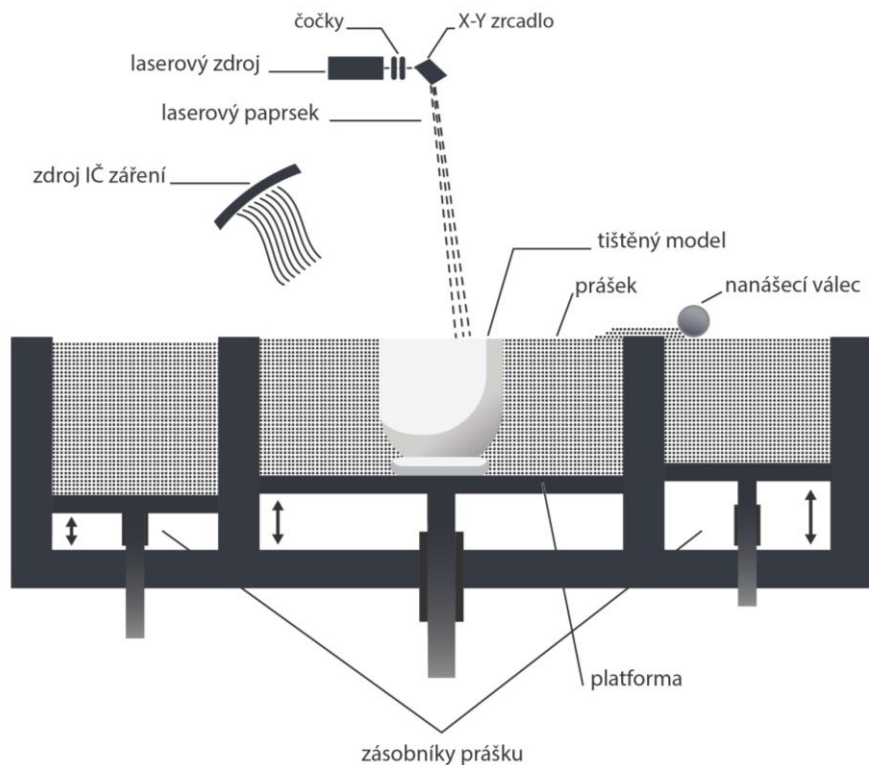
2.4.2 Spékání práškové vrstvy

2.4.2.1 Selective Laser Sintering (Selektivní spékání laserem)

Metoda selective laser sintering, řazená do kategorie spékající práškové vrstvy, využívá pro tvorbu objektu práškové termoplasty, nejčastěji nylon. Na rozdíl od příbuzné technologie, selective laser melting (SLM), nedochází u SLS k úplnému roztavení prášku, nýbrž pouze k natavení [16]. Proces začíná jako u ostatních 3D tiskových technologií a to 3D modelem, který je exportován do STL formátu a rozdělen dle požadavků na tisk do jednotlivých 2D vrstev. Po získání řídicích dat už následuje proces tisku.

Konstrukce stroje se skládá ze tří komor. Postranní komory plní funkci zásobníků materiálu, prostřední je stavební platformou. Proces začíná nanesením tenké vrstvy prášku z dávkovací komory na platformu s tím, že je přebytek prášku odveden do kolektoru [16]. Prášek je již v zásobníku a platformě předehříván infračerveným zářením na teplotu pod bod tání materiálu a to z následujících důvodů. Z technického hlediska předehřátí umožňuje využít laser s nižším výkonem. Dalším důvodem je zamezení kolísání teploty během tisku a tím smršťování či expanzi materiálu. Důležitou roli hraje také inertní atmosféra tvořená dusíkem, ve které se celý tiskový proces odehrává. Inertní plyn působí proti degradaci a možné oxidaci materiálů [21]. Jestliže je vrstva prášku nanesena, přichází na řadu CO₂ laser, který do této vrstvy vykresluje specifický tvar, určený řídicími instrukcemi. Laser nataví předehřátý prášek a vzniklá hmota adhezuje k vrstvě předešlé. Platforma je s takto slinutou vrstvou posunuta níže, ve směru osy Z. Velikost posuvu závisí na jemnosti použitého materiálu, obvykle bývá mezi 0,1–0,15 mm. Po vytvoření vrstvy je platforma zavalena novou vrstvou prášku, na které se právě popsaný proces opakuje až do vytištění celého objektu [16]. Schéma SLS tiskárny zobrazuje obrázek 5.

SLA technologie je charakteristická tím, že nevyužívá přidané konstrukce objektu. Oporou objektu je nevytvrzený prášek, který tvoří jeho nosnou konstrukci, což umožňuje tisknout komplexní struktury. Dalších podpurných konstrukcí zde není potřeba. SLS je rovněž technologií ekologickou v tom smyslu, že lze znovu zpracovat nevytvrzený prášek jak z okolí objektu, tak i z kolektoru. Navíc je možné tisknout najednou více druhů objektů [22]. Jako každá technologie také SLS disponuje nevýhodami, kterými jsou – drsnější textura a pórovitost výtisku daná použitým materiálem, delší čas potřebný pro zchladnutí vytištěného objektu před vyjmutím z komory [16].



Obrázek 5 Schéma SLS procesu [21]

2.4.3 Laminace archů

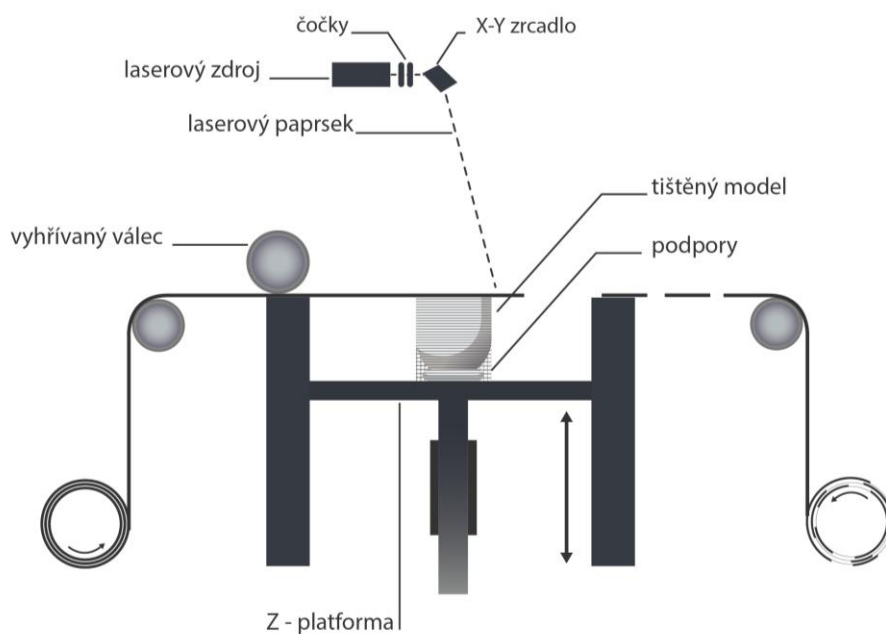
2.4.3.1 Laminated Object Manufacturing

Laminated object manufacturing, metoda, kombinující aditivní a subtraktivní výrobu patří k jednomu z prvních patentovaných AM technologií. Jak už napovídá název technologie, základní princip spočívá v laminačním spojování papíru nebo jiného materiálu do vrstev, které jsou řezány laserem nebo řezacím nástrojem a později vytvářejí 3D objekt [23].

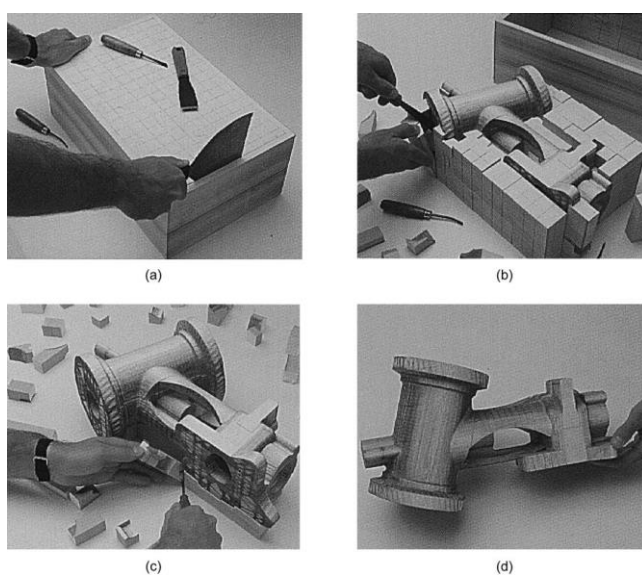
Tiskárnu tvoří jednoduchá konstrukce, skládající se z odvinu a návínu anebo podavače archů, vyhřívaného válce, stavební platformy, CO₂ laseru a zrcadel modulujících svazek. Schéma LOM tiskárny znázorňuje obrázek 6. Proces začíná jako u každé jiné aditivní technologie, a sice rozdělením CAD 3D modelu na horizontální 2D vrstvy, které poté odpovídají tloušťce tiskového materiálu a určují pozdější posuv platformy [23].

Metoda LOM vytváří objekty lepením. Nabízí dva postupy výroby, kterými jsou „bond then cut“ a „cut then bond“. V prvním případě je adhezivní materiál nejdříve umístěn na platformu a až poté co vyhřívaný válec aktivuje termoplastické lepidlo a přitlačí materiál k předchozí vrstvě, je laserem vyříznuta kontura dané vrstvy. Nevyužitý materiál není odstraněn, ba naopak je ponechán jako ochranná a podpurná konstrukce vytvářeného objektu.

Aby nakonec bylo možné prototyp z konstrukce vyjmout, musí být již v průběhu tisku zbylý materiál řezán do tvaru mřížky. Jestliže je takto zpracovaná jedna vrstva, platforma je posunuta po ose Z o tloušťku jedné materiálové vrstvy. Po zpracování posledních řídicích dat je tisk ukončen. V dokončující části je prototyp vyjmut z konstrukce postupem zvaným „decubing“, který znázorňuje obrázek 7. Ze schémat nemusi být zřejmé, že je proces decubing časově náročný a může trvat i několik hodin v závislosti na složitosti prototypu [24].

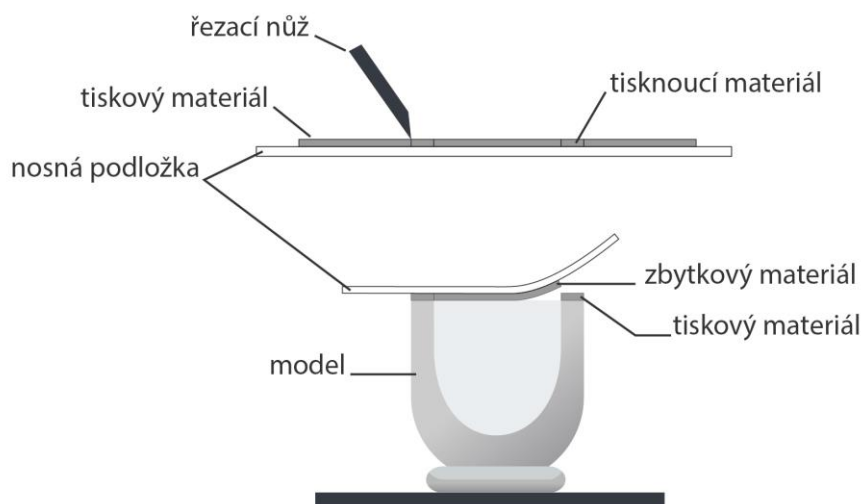


Obrázek 6 Schéma LOM procesu bond then cut [24]



Obrázek 7 Decubing – proces odstraňování zbylého materiálu z okolí prototypu [24]

Druhý, méně využívaný způsob výroby, cut then bond, označovaný také jako „Offset Fabbing“ patentovaný Ennex Corp., využívá následující princip. Kontura dané vrstvy je vyříznuta nožem na podložce, která poté transportuje materiál na stavební platformu a přitlačí adhezivní stranu materiálu na vrstvu předchozí, jak znázorňuje následující obrázek. Benefitem je, že objekt nezůstává uvězněn v konstrukci, tím odpadá časově náročné dokončující zpracování. Naopak absence podpurné konstrukce vede k méně přesným prototypům [21].



Obrázek 8 Schéma cut then bond metody zvané také Ennex offset Fabbing proces [21]

Pokud jde o materiály, převládajícím a vlastně původním materiálem pro LOM je papír opatřený adhezivní vrstvou. Prakticky jsou však využívány i jiné archové materiály třeba z kovu (Al), plastu (PVC) nebo keramiky (SiC). Základní myšlenka zůstává stejná, tedy vyříznutí kontury způsobem „cut then bond“ nebo „bond than cut“, nicméně mechanismus provedení je pro tyto specifické materiály odlišný. Na závěr lze prototyp zušlechtit ochrannými laky nebo upravit broušením, soustružením a podobně [21].

Silnými stránkami LOM jsou především rychlost výroby a ekonomická dostupnost základních materiálů. Výše popsané parametry jsou důvodem, proč je tato technologie využívána pro výrobu jednoduchých velkoformátových prototypů. Na druhou stranu vlastní technologický postup neumožňuje výrobu dutých objektů a současně plýtvá materiálem, který nelze znovu použít [24].

Co se týče technologického progresu, novinkou roku 2016 s oceněním Consumer Technology Association (CES) se stala tiskárna Mcor Arke. Tato tiskárna, řazená

k technologiím pracujícím na principu laminace archů, z angl. sheet lamination, dostala ocenění za nejlepší inovaci v kategorii 3D tisku. Pro tvorbu 3D modelu využívá běžně dostupný materiál, tedy papír a v kombinaci s již dávno vynalezeným digitálním tiskem inkjetem, vytváří plnobarevné 3D objekty. Tato technologie pochází z Irska, výrobcem je Mcor Technologies [25].

2.5 Extruze materiálu

2.5.1 Fused filament fabrication

Mezi metodami založenými na extruzi materiálu je nejznámější FDM, jež je současně jednou z nejvyužívanějších technologií na poli komerčních 3D tiskáren vůbec. FDM je běžně užívané synonymum pro tisk 3D objektu založeném na principu vytlačování materiálu. Právně je však pojem FDM opatřen ochrannou známou společností Stratasys Inc., z toho důvodu vznikly akronymy jako Plastic Jet Printing (PJP), Fused Filament Melling (FFM) a rovněž Fused Filament Fabrication (FFF). Poslední zmíněný akronym patří projektu RepRap, který je diskutován v následující kapitole. V podstatě však všechny zmíněné technologie fungují na principu extruze nataveného termoplastického materiálu, který je planárně pokládán na platformu a před ztuhnutím se váže k vrstvě předchozí [26]. Na zmíněném principu tisku funguje také 3D tiskárna Rebel II, použitá pro tuto bakalářskou práci, proto je metoda extruze materiálu popsána v následujících subkapitolách podrobněji.

2.5.1.1 RepRap projekt

RepRap (replicating rapid prototyper) projekt, založený roku 2005 Adrianem Bowyerem se zabývá tiskárnami, jež jsou schopny vytisknout vlastní konstrukční části [27]. Jak Bowyer uvádí, dosavadní 3D tiskárny se mu zdály příliš drahé, proto ho ihned napadla myšlenka replikující se 3D tiskárny, což byl impuls k vytvoření projektu RepRap. První RepRap tiskárnu schopnu sebereplikace, RepRap Darwin, zkonstruoval v roce 2007. Tyto tiskárny dokážou obecně replikovat až 50 % vlastních plastových konstrukčních částí. Elektronické komponenty a pohony je nutné dokoupit [28]. RepRap tiskárny jsou takzvané open-source, což znamená, že zdrojový kód softwaru tiskáren je k dispozici ke stažení na internetu, stejně jako návod na sestavení. Open-source software a open-hardware tiskáren RepRap umožnil expanzi 3D tiskáren po celém světě. Staly se oblíbené mezi konstruktéry, kterým bylo umožněno upravovat a vylepšovat jak hardware, tak i software, což pomohlo dále rozvíjet komunitu RepRap. Bowyerův nápad rapidně snížil cenu 3D tiskáren a zvýšil tak jejich

dostupnost po celém světě [29]. Nyní je souprava dílů pro stavbu RepRap tiskárny dostupná na Amazonu od 230 \$, dražší modely pak vycházejí nanejvýše na 1 200 \$.

2.5.1.2 Princip tisku

Stejně jako ostatní 3D technologie, rovněž FFF tiskárny využívají STL formát, popisující 3D model, který je zpracován v CAM softwaru na jednotlivé tiskové vrstvy.

Proces tisku začíná ohřevem platformy a tiskové hlavy, respektive její horké části, do které je struna podávána vodicími kolečky, hnanými krokovým motorem. Nastavení teploty tiskové hlavy a platformy závisí na použitém materiálu, konkrétně na jeho teplotě tání. Jakmile jsou obě části dostatečně zahřáté, tiskárna začne vykonávat tiskový proces. Tisková hlava vychází z pozice „home“ a pohybuje se po osách X a Z. Vyhřívaná podložka se pohybuje po ose Y. V okamžiku, kdy se tisková hlava posune do pozice, kde má být objekt tisknut, extruduje viskózně-kapalný materiál na platformu. Extruzi způsobuje tlak nově přiváděného materiálu. V závislosti na uživatelském nastavení je nejprve vytisknut okraj okolo objektu, který má zajistit konstantní průtok materiálu a až poté vlastní podpory, kontura a výplň objektu. Jakmile je materiál extrudován na platformu, chladne a postupně přechází přes kaučukovitý stav do sklovitého. Následně se tisková hlava posune o tloušťku vrstvy nahoru, ve směru osy Z a pokračuje tiskem další vrstvy, která je vázána na předchozí vytištěnou vrstvu. Uvedený proces probíhá do vytištění polední vrstvy [21].

2.5.1.3 Materiály

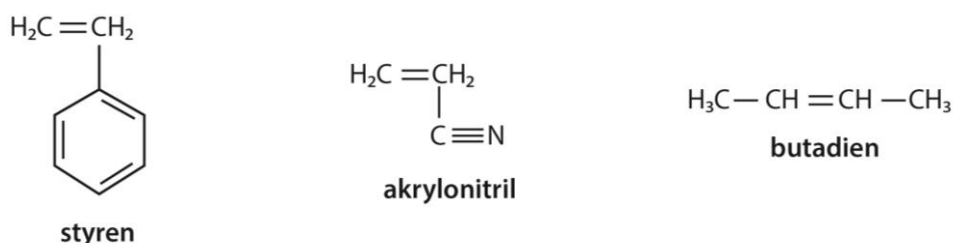
Fused filament fabrication technologie, vyžaduje materiály dodávané v podobě struny neboli filamentu, navinuté na špulce, o typickém průměru 1,75 mm nebo 3 mm. Nespornou výhodou FFF je fakt, že kromě nepsaných standardů, za které jsou považovány polymery akrylonitril butadien styren (ABS) a kyselina polyléčná (PLA), podporuje širokou škálu dalších materiálů jako nylon, polykarbonát (PC), polyethyltereftalát (PETP) či houževnatý polystyren (HIPS) [30]. Uvedené materiály jsou vyráběny také v různých modifikacích, což poskytuje ještě větší nabídku napříč mechanickými, chemickými, fyzikálními, ale i estetickými vlastnostmi. Nabídka materiálů je tedy poměrně široká, ale i tak je možné výtisk vylepšit nátěrem, vyhladit jeho povrch například acetonem nebo jej jakkoliv mechanicky opracovat.

Nejvhodnějšími materiály pro technologii založenou na extruzi materiálu jsou termoplasty, z toho důvodu, že mají schopnost opakovaně měnit skupenství v závislosti na teplotě charakteristické pro daný plast. V této bakalářské práci byly využity ABS a PLA termoplasty, proto jsou v následujících kapitolách popsány podrobněji.

2.5.1.3.1 Akrylonitril butadien styren

Nabídka materiálů co se vlastností, ale i barevnosti týče, je poměrně široká. Sortiment společnosti Stratasys zahrnuje standardní materiál ABSplus a jeho modifikace, třeba průsvitný ABSi, mechanicky odolný ABS-M30, biokompatibilní ABS-M30i využívaný například v lékařství či ABS-ESD7 zabraňující akumulaci statického náboje [31].

ABS je amorfní kopolymer vyráběný nejčastěji emulzní polymerací tří složek monomerů – akrylonitrilu a styrenu v přítomnosti kaučuku, čili polybutadienu. Akrylonitrilová složka zajišťuje tuhost, tepelnou a chemickou odolnost, butadienová houževnatost, zatímco styren zaručuje dobrou zpracovatelnost. Poměrem jednotlivých složek monomerů lze vlastnosti ABS upravovat [32]. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo 105 °C, přičemž teplotní rozmezí extruderu začíná na 210 °C do přibližně 250 °C [30]. Josef Průša uvádí teplotu extruderu až 285 °C, nicméně nastavení významně závisí na konstrukci extruderu, výrobci struny anebo klimatických podmínkách v okolí tiskárny [33].



Obrázek 9 Strukturální vzorec monomeru - styrenu, akrylonitrilu a butadienu

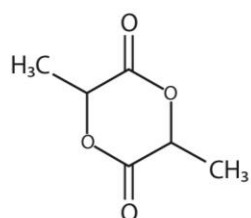
Co se tiskových záležitostí týče, ABS vyžaduje vyhřívanou platformu okolo 80–110 °C. Obdobně jako u extruderu, i zde záleží na typu platformy a teplotě okolí. Zahřátí platformy zabraňuje skokovému chladnutí materiálu a tím pomáhá předejít pnutí a následnému smršťování modelu. Tištěné objekty z ABS mají tendenci separace od skleněné desky, z toho důvodu je před tiskem upravována některým z následujících postupů. Jedním z nich je příprava skla pomocí běžného kancelářského lepidla a roztoku ABS v acetonu. Na sklo se aplikuje lepidlo v jedné vrstvě a přetře se roztokem ABS v acetonu, v praxi zvaném ABS

džus. Zmíněná úprava skla byla využívána v této bakalářské práci dle návodu Josefa Průši, který uvádí poměr 20 cm filamentu o tloušťce 3 mm ku 30 ml acetonu [33]. Dalšími možnými přípravami jsou aplikace plastové samolepicí folie BuildTak či kaptonové pásky.

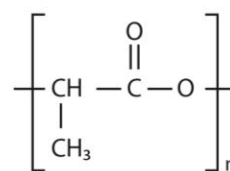
ABS nachází uplatnění především díky dobré mechanické odolnosti a rovněž v porovnání s ostatními materiály, cenové dostupnosti. ABS je odolný vůči nárazu, vyniká pevností či chemickou odolností vůči kyselinám, louhům a olejům. Navíc lze vytisknuté části slepit v celek rozpouštědlovými nebo akrylátovými lepidly [34]. ABS jako takový je zdravotně nezávadný materiál, nicméně při jeho zahřátí na tiskovou teplotu vzniká zápach, který lze redukovat odvětrávanou místností.

2.5.1.3.2 Kyselina polymléčná

Stejně jako ABS je i PLA frekventovaným materiálem, z důvodu snadné tisknutelnosti a poskytnutí dobré vizuální kvality. Polyester PLA je za určitých podmínek biologicky odbouratelný, proto nepředstavuje ekologickou zátěž jako většina plastů vyráběných z ropy, včetně ABS. Tento polyester je vyráběný otevřením kruhu laktidu kyseliny mléčné. Pro výrobu jsou používány suroviny z obnovitelných zdrojů, kterými jsou nejčastěji kukuřice, dále brambory cukrová třtina apod. [35]. Teplota skelného přechodu je přibližně 60 °C a tisková teplota v rozmezí 190–220 °C [36].



laktid kyseliny mléčné



kyselina polymléčná

Obrázek 10 Strukturální vzorec výchozího laktidu kyseliny mléčné a produktu, kyseliny polymléčné

Přestože PLA nevyžaduje vyhřívání platformy, protože vytištěný objekt není citlivý na změny teplot, je vyhřívání doporučováno pro dosažení lepší adheze objektu k platformě. Příprava tiskového skla je oproti přípravě skla pro ABS časově nenáročná, a sice skleněná tabulka je přetřena pouze kancelářským lepidlem. Obecně je PLA nejsnadněji tisknutelný materiál, což se projevuje především u rozměrově větších výtisků, proto se jeví jako vhodnější materiál pro začátečníky. Benefity, vzhledem tiskovému procesu, jsou tisk bez zápachu, dobrá adheze jak první vrstvy, tak i mezivrstev. PLA je možné lakovat akrylátovými

laky pro zvýšení UV odolnosti, dosažení estetičtějšího vzhledu nebo zamezení absorpce vlhkosti, kterou jinak PLA absorbuje [37]. Hlavní nevýhodou je, že PLA disponuje realitně nízkou teplotu skelného přechodu, proto je nevhodné jej vystavovat vyšším teplotám.

2.5.1.3.3 Srovnání materiálů ABS a PLA

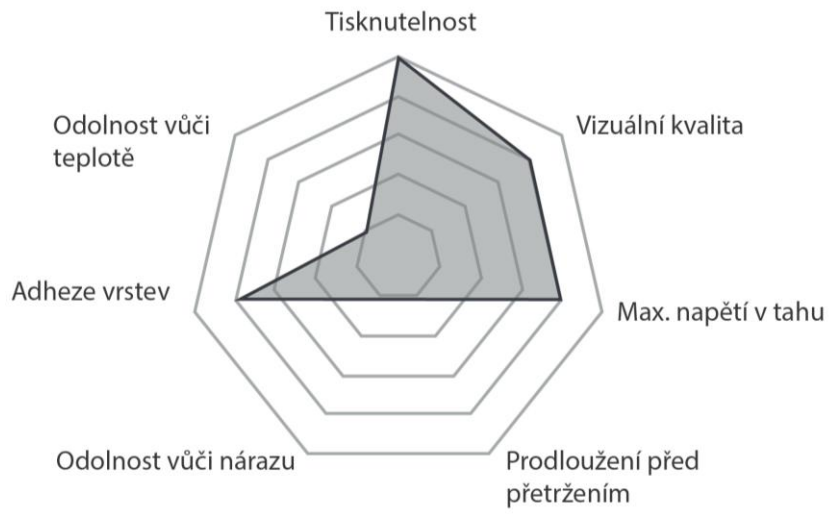
Nelze jednoznačně říci, který ze zmiňovaných plastů je obecně lepší či horší, oba materiály mají svá omezení a naopak své výhody, které je odlišují a upřednostňují v různých oblastech. ABS je v porovnání s PLA materiálem odolnější co se mechanických a teplotních vlastností týče. Konkrétně vůči vyšším teplotám, nicméně je choulostivý na změny teplot během tisku, proto vyžaduje vyhřívanou platformu, aby se zamezilo deformaci objektu. Na druhou stranu původ ABS a vyšší tisková teplota zapříčiňují nežádoucí výpary, které je nutné ventilovat, což při tisku PLA nehrozí. Ve výsledku je obtížnější tisk ABS materiálem, který je díky svým vlastnostem vhodnější pro mechanicky namáhané objekty, zatímco PLA výtisky se jeví jako jemnější, lesklejší a vizuálně kvalitnější [37]. Konkrétní vlastnosti materiálů shrnuje tabulka 1, grafické porovnání vlastností materiálů zobrazuje obrázek 11.

Tabulka 1 Shrnutí vlastností využitých materiálů [38, 39, 40]

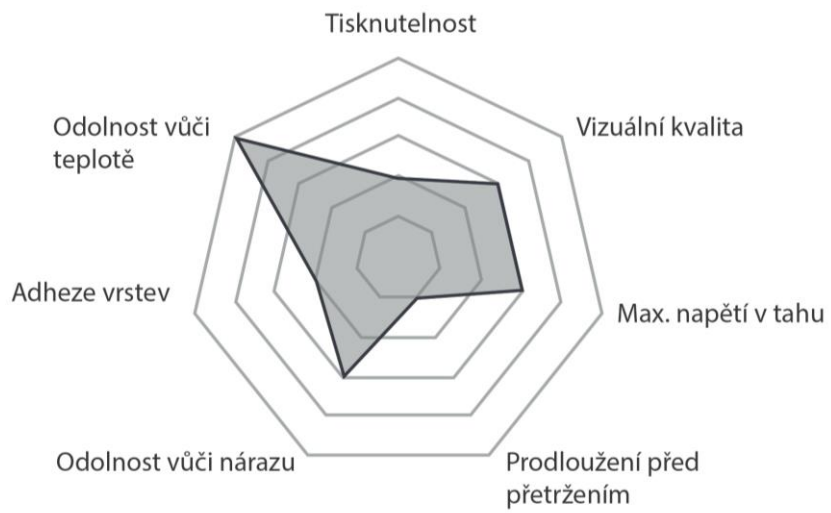
Specifikace	ABS	PLA
Teplota skelného přechodu	105 °C	60-65 °C
Teplota tání	110-125 °C	70-80 °C
Tisková teplota	235 °C	185 °C
Teplota platformy	80 – 90 °C	40 – 50 °C (není potřeba)
Pevnost v tahu *	27 MPa	37 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,1 – 7,6 GPa	4 GPa
Biodegradabilita	Ne	Ano (za určitých podmínek)
Cena cívky za kg (1,75 mm, černá)	\$USD 21.99	\$USD 22.99
Rozměrová tolerance	+/- 0,05mm	+/- 0,05mm
Doporučená max. velikost objektu	80 mm	Bez limitu

* Vzorek byl tisknut 100 % výplní lineárním vzorem, tloušťkou 0,2 mm

PLA



ABS



Obrázek 11 Grafické zobrazení vlastností materiálů PLA a ABS [37]

3 Experimentální část

3.1 Materiálové vybavení

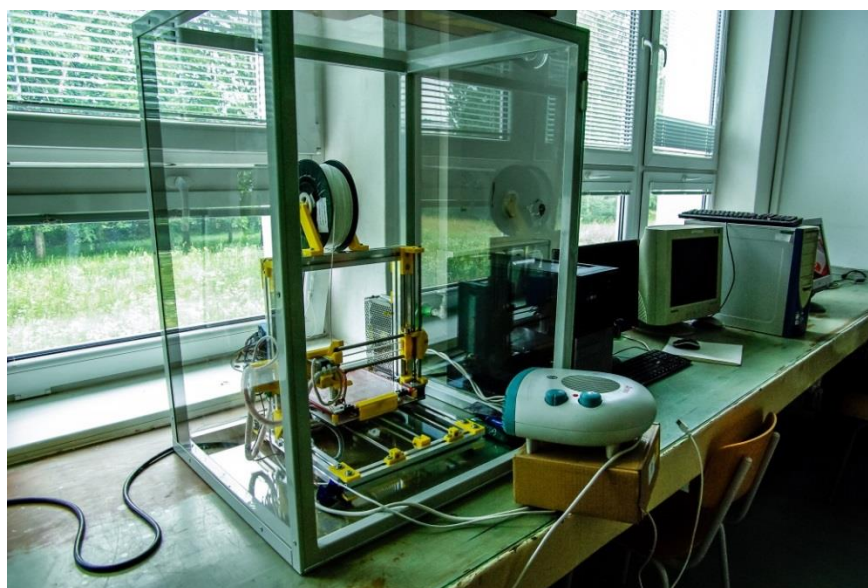
Co se týče materiálového vybavení, byly používány materiály ABS zelené barvy, konkrétně traffic green Ral 6024 a PLA stejné barvy, oboje značky 3D Factories. Vlastnosti materiálů byly podrobněji diskutovány v kapitole 2.5.1.3. Další důležité informace o vybavení materiálovém, přístrojovém i programovém shrnuje tabulka 2 na straně 33.

3.2 Přístrojové vybavení

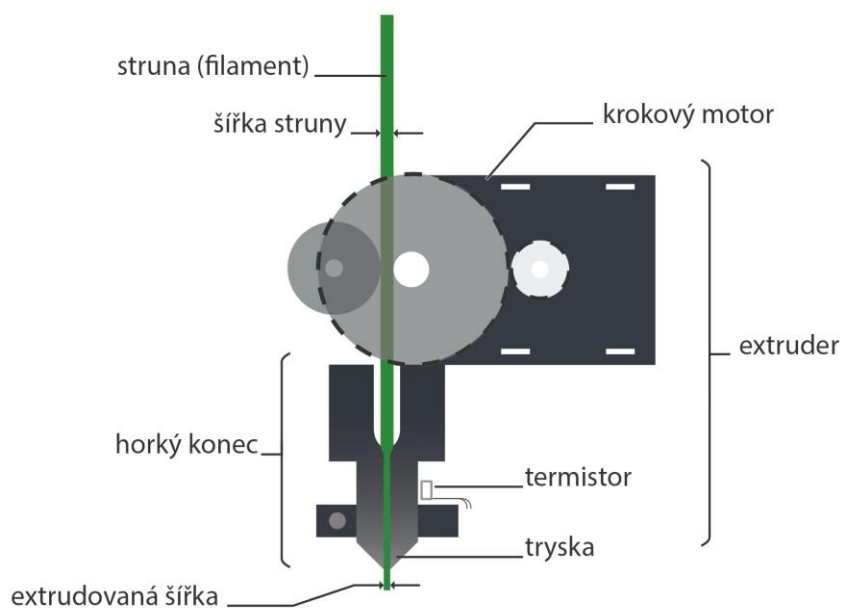
Pro praktickou část byla použita běžná open-source tiskárna Rebel II, spadající pod projekt RepRap. Konstrukce tiskárny Rebel II zahrnuje několik charakteristických částí pro technologii FFF, kterými jsou tisková hlava, topné tělíska, krokové motory, větrák a nakonec platforma. Tiskárny RepRap, tedy i Rebel II, disponují jednoduchou konstrukcí složenou z plastových ABS částí, vytištěných na jiné RepRap tiskárně, běžně dostupných hliníkových profilů a základní elektroniky. Využitou tiskárnu Rebel II znázorňuje obrázek 12.

Elektronická část tiskárny zahrnuje zdroj, krokové motory propojené ovladači k řídicí desce Cheaptronic. Tento komplex s nakonfigurovaným programovým vybavením, o kterém se píše v následující kapitole, umožňuje řídit veškerou elektroniku 3D tiskárny [41]. Neméně důležitou ovladatelnou částí je vyhřívaná platforma, kde je teplota sledována termistorem. Platforma je podkladem pro sklo, na které se po jeho povrchu úpravě povrchu tiskne. Velikost platformy tiskárny Rebel II činí 200×200 mm. Pravděpodobně nejdůležitější komponentou tiskárny je tisková hlava (extruder), schématicky znázorněná na obrázku 13. Skládá se ze dvou částí – studené „cold end“ a horké „hot end“ jehož koncová část má v průměru 4 mm. Průměr trysky určuje průměr použité struny. Do studené části trysky je struna zasouvána vodícími kolečky poháněnými krokovým motorem. Úkolem je rovnoměrné zasouvání struny do horké části, kde dochází k tavení materiálu pomocí rezistoru. Teplotu kontroluje termistor zapojený na koncové části trysky. Užitečnou součástí je větrák, který slouží pro chlazení jak extruderu, tak i nově vytištěné vrtvy materiálu. Větrák se však nepodařilo na zprovoznit, byl proto využit externí ventilátor s vyšším výkonem. Před tiskem vychází tryska z počáteční pozice zvané „home“, která je nastavena na hodnotu X0, Y0, Z0. Počáteční a koncovou pozici ve všech osách kartézského systému vymezuje součástka zvaná koncový spínač [42].

Tiskárna byla umístěna v boxu, z jedné strany otevřeném, který přispívá k reprodukovatelnosti podmínek tisku. Jak bylo zmíněno, výjimku oproti běžné konstrukci tiskáren Rebel II tvořil větrák. Nepodařilo se zapojit běžně používaný větrák pro FFF tisk, z toho důvodu bylo využito alternativní řešení, čímž byl externí ventilátor, který měl mnohem vyšší výkon a tak ovlivňoval výsledné kvality tisku. Vzhledem ke konstrukci trysky byl externí ventilátor nezbytný, bez něj docházelo k zaseknutí materiálu v trysce a k jejímu ucpávání.



Obrázek 12 RepRap tiskárna Rebel II s přiloženým větrákem.



Obrázek 13 Schéma podávání a tavení materiálu pro FFF tisk [43]

3.3 Programové vybavení

Programy, kterými disponuje tiskárna Rebel II, jsou open-source firmware Repetier nakonfigurovaný na desce Cheaptronic, který komunikuje USB propojením s ovládacím programem Repetier-Host. Ten obsahuje integrované CAM programy. V nabídce jsou Cura a Slic3r, z nichž byl využitý Slic3r kvůli jeho přehlednému, uživatelsky přívětivému ovládnutí a rychlému zpracování STL souboru na příčné řezy a generování G kódu. Pro tvorbu 3D modelů byla užívána online aplikace Thinkercad, která jednoduchým způsobem, skládáním a vylučováním stavebních bloků, umožňuje tvorbu modelu a zároveň export do STL formátu. Současně byl využíván webový server Thingiverse, který nabízí stažení hotových modelů rovněž v STL formátu.

Tabulka 2 Shrnutí parametrů tiskárny Rebel II

HARDWARE	
Rozměr tiskárny	420 × 420 × 600 mm
Pracovní plocha	max. 200 × 200 × 180 mm
Rám	Hliníkové profily a ABS díly
Platforma	Vyhřívaná
Ventilátor Ardes 450 A	2000 W / 50 Hz / 220–240V
TISK	
Povrch tiskové plochy	Sklo o tloušťce 3 mm
Materiály	ABS, PLA Ral 6024 Traffic Green
Průměr struny	1,75 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Max. rychlost tisku	80 mm/s
Mac. Rychlost přejezdu	130 mm/s
Max teplota trysky	290 °C
SOFTWARE	
Open-Source firmware	Repetier
Software	Repetier-Host
CAM	Slic3r

3.4 Experimentální postup

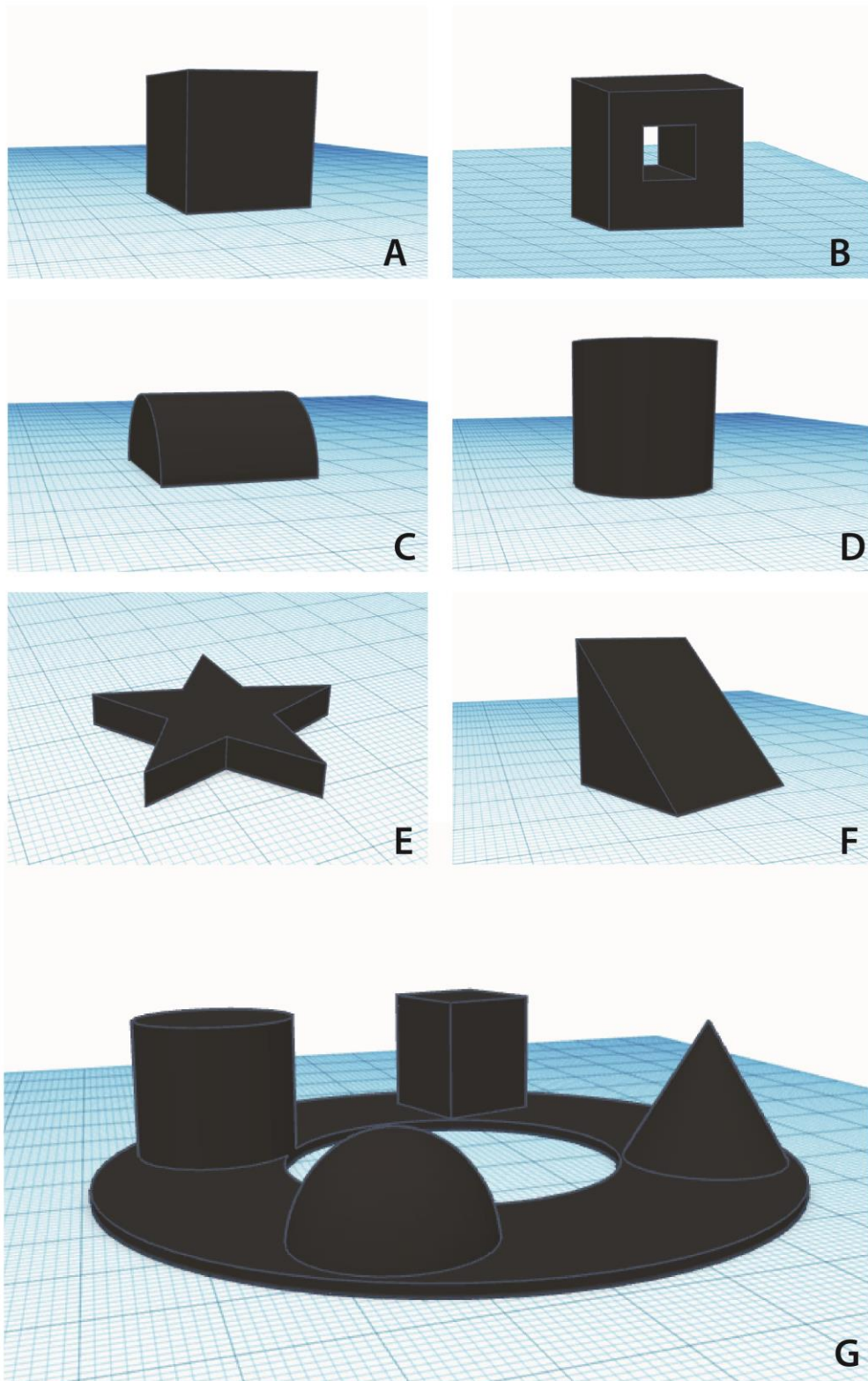
První testovací výtisky byly provedeny ABS materiálem. Vhodnější by bylo začít s laborováním PLA, jakožto snadněji tisknutelným materiálem, nicméně v začátku testování nebyl k dispozici větrák, který je pro tisk tímto materiálem nezbytný. Větrák měl být zařazen do provozu později. Po vyladění nastavení pro ABS, byl při běžné údržbě poškozen extruder. Byl tedy nahrazen extruderem novým, s rozdílným typem horkého konce. Nový horký konec, kterým byla později tištěna celá experimentální část, disponuje delší komorou tavení materiálu, která se bez větracího zařízení ucpávala. Ve výsledku tak bez větráku nebylo možné tisknout ani ABS materiálem. Běžné větrací zařízení pro FFF tisk, s výkonem cca 2 W, se nepovedlo naprogramovat ani později. Byl tedy využit externí větrák s výkonem 2 000 W, který výrazně ovlivňoval kvalitu výtisků.

3.4.1 Testovací modely

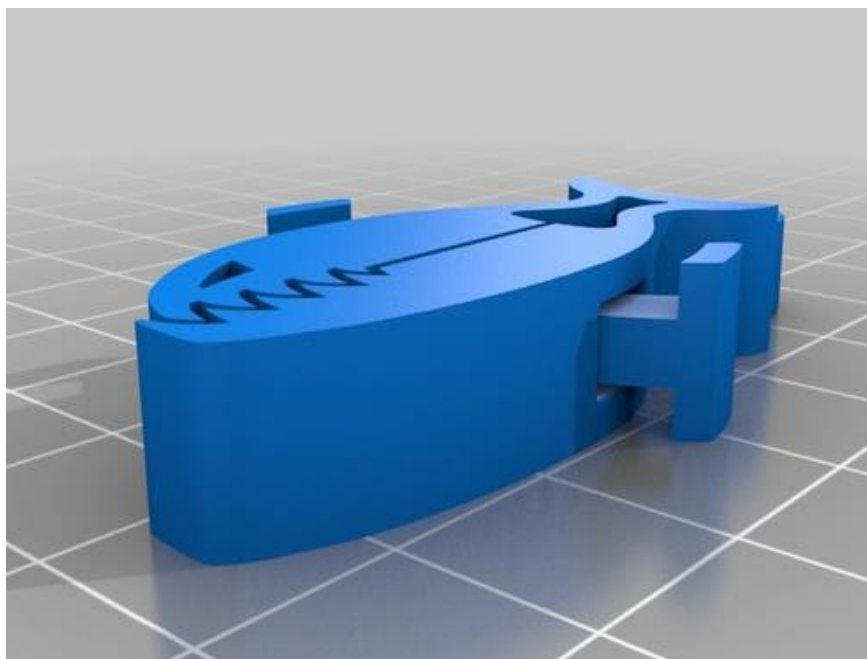
Vybrané testovací modely jsou reprezentovány jednoduchými tvary, které byly zvoleny tak, aby vyladily časté komplikace, charakteristické pro FFF/FDM. Zároveň simulují části reálných objektů. Tyto modely byly nejdříve prověřovány tiskem jako jednotlivé objekty (obrázek 14, A–F) a následně byl vytištěný komplex objektů (obrázek 14, G). Nakonec, pro ověření kvality laborovaných parametrů, byl vytištěn reálný objekt (obrázek 15), o rozměrech $6,5 \times 4,5 \times 1,5$ cm, který svým tvarem a funkcí (princip svorky) prověřuje ostré hrany, kolmé a zaoblené části, negativní prostor, výplň a dokonce i tisk malého mostu.

Testovací model (A) – dutá krychle o velikosti 2×2 cm z obrázku 14, se zaměřuje na tři parametry. Za prvé na rozměrovou přesnost tisku, o které rozhoduje kalibrace os tiskárny. Případná změna rozměru může také poukazovat na nesprávné nastavení teploty platformy, změna rozměru by se projevila roztažením či smrštěním materiálu. Za druhé na tisk mostů, které ovlivňuje množství extrudovaného plastu „bridge flow ratio“ a chlazení ventilátorem. Třetím zkoumaným parametrem je tisk tenkých stěn. Dalším tištěným modelem je krychle s otvorem (B) se stejnými rozměry. Zaměřuje se rovněž na rozměrovou přesnost, tisk malého mostu a navíc na tisk výplně. Modely (C) a (F) jsou zaměřeny na tisk perimetrů a zároveň na správný výtisk hrany, horizontální vrstvy, kterou má model C zaoblenou a model F ostrou. Sklon úhlu u modelu F je 45° . Válec (D) sloužil k testování kruhových objektů a hvězda (E), k testování ostrých vertikálních hran. Testovací komplex (G), s pozitivními geometrickými

tvary na ploše, prověřuje již zmíněné parametry. V průběhu tisku byla u každého objektu sledována kvalita poslední vytištěné vrstvy.



Obrázek 14 Tvary testovacích objektů znázorněné na obrázcích A–F a finální testovací komplex – G



Obrázek 15 Reálný objekt prověřující testované parametry

3.4.2 Tiskový proces

3.4.2.1 Laborované parametry tisku

Program Slic3r zahrnuje rozsáhlé množství parametrů, které lze upravovat. Poněvadž je tisk na 3D tiskárnách časově náročný a úprava všech parametrů v CAM programu by převyšovala rozsah této práce, byly předem vybrané korigované parametry. Byly jimi vrstvy a perimetry, výplň, rychlost tisku ve všech základních variantách, teplota extruderu a platformy. V průběhu práce však byly pro redukci některých artefaktů, vyskytujících se na testovacích objektech, přidány navíc vybrané parametry z pokročilého nastavení týkající se šířky extruze. Konkrétní parametry znázorňují tabulky 3 a 4. Přestože tisk FFF vyžaduje podpory při tisku převislých objektů, tato práce se zaměřuje pouze na tisk malých jednoduchých objektů, které nevyžadují podpůrné konstrukce. Kromě zmíněných parametrů bylo nutné tiskárnu kalibrovat, více o kalibraci v kapitole 3.4.2.2.

Tabulka 3 Konkrétní laborované parametry tisku v programu Slic3r

NASTAVENÍ TISKU
NASTAVENÍ EXTRUDERU (°C)
Teplota extruderu - první vrstva
Teplota extruderu - ostatní vrstvy
Teplota platformy - první vrstvy
Teplota platformy - ostatní vrstvy
VRSTVY A PERIMETRY
Výška vrstvy (mm)
Výška první vrstvy (mm)
Počet vertikálních perimetrů
Počet plných vrstev – vrchní část
Počet plných vrstev – podstava
Hustota výplně (%)
OKRAJE (mm)
Šířka okraje
RYCHLOST (mm/s)
Perimetry
Malé perimetry
Externí perimetry
Výplň
Plná výplň
Plná výplň vrchní vrstvy
Tisk mezer
Rychlost tisku první vrstvy
POKROČILÉ PARAMETRY
Tloušťka perimetrů (mm)
Tloušťka externích perimetrů (mm)
Tloušťka plné svrchní vrstvy (mm)
Přesah výplně/ perimetrů (%)

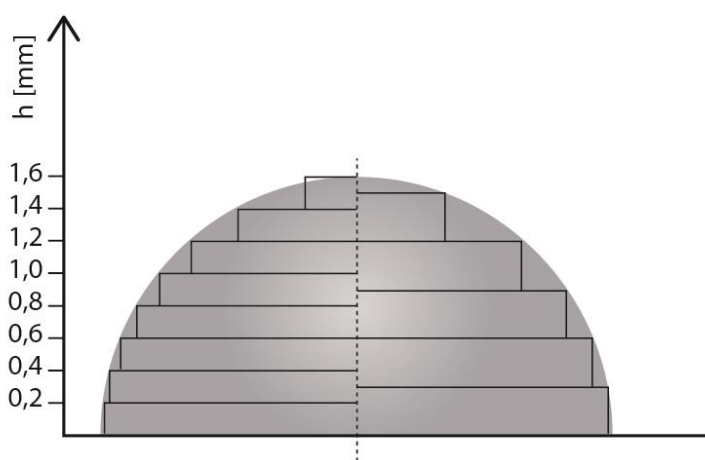
Tabulka 4 Parametry, které byly fixní jak pro ABS tak i pro PLA a zároveň pro všechny rychlosti tisku.

FIXNÍ PARAMETRY
Pozice švu
Vzor výplně
Vzor výplně – vrch/spodek
Délka retrakce v extruderu (mm)
Retrakce při změně tisku vrstvy

3.4.2.2 Kalibrace a příprava tiskárny před tiskem

Výběr výšky vrstev

Již před tiskem byl vybrán jeden z klíčových parametrů tisku a tím je výška vrstev, kterou určuje průměr trysky. Optimální výška vrstev odpovídá 80 % velikosti trysky [44]. Zde byla využita tryska o průměru 0,4 mm, proto byla nastavena maximální výška vrstvy (tj. výška první vrstvy) pro rychlý tisk na 0,32 mm. Výšky prvních vrstev pro střední a kvalitní tisk se odvíjely od maximální výšky a byly odstupňovány po 0,05 mm, tedy 0,27 mm pro střední tisk a 0,22 mm pro kvalitní tisk. Výška vrstev souvisí s rozlišením výtisku – čím je nižší, tím jsou výtisky kvalitnější, respektive vykazují nižší schodovitý efekt, který znázorňuje obrázek 16. Na kvalitu tisku se zase váže čas, potřebný k vytištění objektu, který s kvalitou úměrně narůstá. Šířku vrstvy automaticky dopočítá slicer, na základě průměru trysky, ale je jí také možné upravit v pokročilém nastavení, které zde bylo využito pro perimetry, externí perimetry a vrchní plnou vrstvu.



Obrázek 16 Ukázka rozlišení tisku formou schodového efektu na objektu

Nastavení teploty na extruderu

V první řadě bylo nutné zjistit vhodnou tiskovou teplotu extruderu pro oba využití materiály. Doporučení sice existují, nicméně jsou ovlivňovány výrobcem struny, rychlostí tisku, použitým termistorem, vzdáleností termistoru od trysky a v tomto případě teplotu ovlivňoval také výkon větráku. Nejdříve byla zjištěna teplota vhodná pro extruzi materiálu:

- Na základě doporučení výrobce materiálu byla pro ABS nastavena teplota 235°C a pro PLA 185 °C. Pro první vrstvu výrobce doporučuje teplotu o 5–10 °C vyšší, než pro tisk vrstev následujících.
- Doporučenými teplotami byla provedena extruze 50 mm filamentu.
- Vlákna šla z trysky těžce vytlačit, což značí o nízké teplotě extruderu. Vzhledem k využitému chladicímu systému se dala předpokládat vyšší teplota. Proto byla teplota dále zvyšována po 5°C, až do 260 °C pro ABS a 220 °C pro PLA.
- Tiskové teploty byly vybrány na základě optického zhodnocení extrudovaných vláken. Vybranými teplotami byly vytištěny první testovací objekty, protože však docházelo v průběhu tisku k separacím vrstev, byly teploty v průběhu tisku dále upravovány.

Kalibrace podávání filamentu

Dále bylo kalibrováno podávání filamentu resp. kroky extruderu „E-Steps“. Na struně bylo zaznačeno rozmezí 100 mm a v Repetier-Host nastavena délka extruze rovněž 100 mm. Reálná délka extrudovaného vlákna byla změřena a korekce zapsána do nastavení firmware. Tato kalibrace zajišťuje shodu délky extrudovaného filamentu s nastavenou délkou extruze a rovněž upravuje výšku a šířku vlákna.

Ošetření platformy před tiskem

Před každým tiskem bylo nutné ošetřit platformu pro tisk daným materiálem. Sklo bylo v případě tisku ABS natřeno lepidlem v jedné vrstvě a poté byl aplikován roztok ABS v acetonu. Pro tisk PLA, bylo sklo opatřeno pouze jedním nátěrem lepidla. Zmíněná příprava skla podporuje přilnutí objektu ke sklu a tím jeho neměnnou pozici během tisku.

Nastavení teploty platformy

Rovněž bylo nutné zjistit vhodné nastavení teplot pro platformu. Nesprávné nastavení doprovází specifické problémy. Příliš nízká teplota způsobuje odlupování objektu, tzv. „warping“. Naopak při vysoké teplotě se objekt ve spodní části rozšiřuje, což je označováno jako „elephant foot“ [45]. Rozšiřování podstavy objektu znázorňuje obrázek 17. Je tedy nutné nalézt teplotu pohybující se mezi zmíněnými defekty.

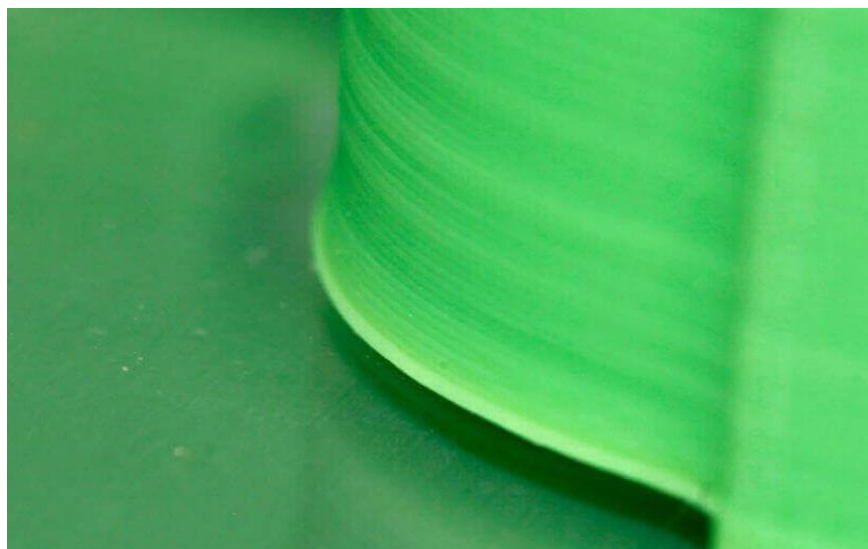
Rozšiřování podstavy objektu lze předejít dostatečným chlazením spodních vrstev objektu a snížením teploty platformy o 5–10 °C, po tisku první vrstvy. Jak už bylo zmíněno, tisk probíhal za použití ventilátoru s vyšším výkonem, což částečně předcházelo rozšiřování podstavy objektu, naopak ale způsobovalo problémy s přilnutím objektu k platformě.

Doporučovaný rozsah teplot výrobcem tiskové struny, 3D Factories činí 80–90 °C pro ABS a 40–50 °C pro PLA. První teploty byly nastaveny následovně:

- První vrstva – ABS 85 °C/ PLA 45 °C
- Ostatní vrstvy – ABS 80 °C/ PLA 40 °C

Při tomto nastavení docházelo k rozšiřování podstavy objektu, proto byly teploty v průběhu dalšího testování snižovány po 5 °C. Výsledná teplota pro PLA činila 55 °C pro první vrstvu a 50 °C pro ostatní vrstvy. Pro ABS bylo nastavení teploty složitější. Při teplotě nižší než 65 °C docházelo k odlupování objektu, při teplotě okolo 80 °C zase k rozšiřování podstavy objektu. Nastavena byla tedy teplota 70 °C pro první vrstvu a 65 °C pro ostatní vrstvy, s tím, že bylo přidáno nastavení okrajů „brim“ na 7 mm. Okraje jsou v podstatě perimetry první vrstvy. Rozšiřují styčnou plochu první vrstvy, která pak lépe přilne k platformě.

Vzhledem k výsledné teplotě na extruderu, byla rovněž předpokládaná teplota platformy vyšší, než doporučená. O 10 °C vyšší teplotu mělo jednoznačně PLA. U ABS byla naopak teplota, vzhledem k doporučení, nižší o 15 °C. Dá se však říci, že i u ABS materiálu došlo ke zvýšení teploty na platformě. V porovnání s nastavovanými teplotami, za použití původního extruderu bez chlazení, došlo ke zvýšení teploty přibližně o 10 °C. Původní teploty (bez chlazení s prvním extruderem) byly totiž nastavovány okolo 60 °C.



Obrázek 17 Znáornění defektu „Elephant foot“ jako výsledek nesprávného nastavení teploty platformy [45]

Nastavení pozice osy Z

Rovněž bylo nutné nastavit pozici osy Z, což je vzdálenost horkého konce trysky od platformy. Vzdálenost osy Z je upravována prostřednictvím platformy, kde se výška reguluje šrouby umístěnými v rozích tiskárny. Vzdálenost byla nastavována pomocí papíru s plošnou hmotností 150 g/m^2 , který byl vložen mezi trysku a platformu. Optimální výška mezi tryskou a platformou způsobí škrtnutím papíru o trysku (nesmí však držet či se naopak volně pohybovat). Tato vzdálenost byla upravována vždy před každou změnou rozlišení tisku. Obrázek 18 znázorňuje výtisk, kdy byla nastavena příliš nízká vzdálenost trysky od platformy. Tryska se brodila v extrudovaném materiálu a tisk musel být zrušen.



Obrázek 18 Znáornění nesprávného nastavení pozice osy Z horkého konce trysky. Vlevo vrchní část objektu, vpravo plocha přiléhající ke sklu

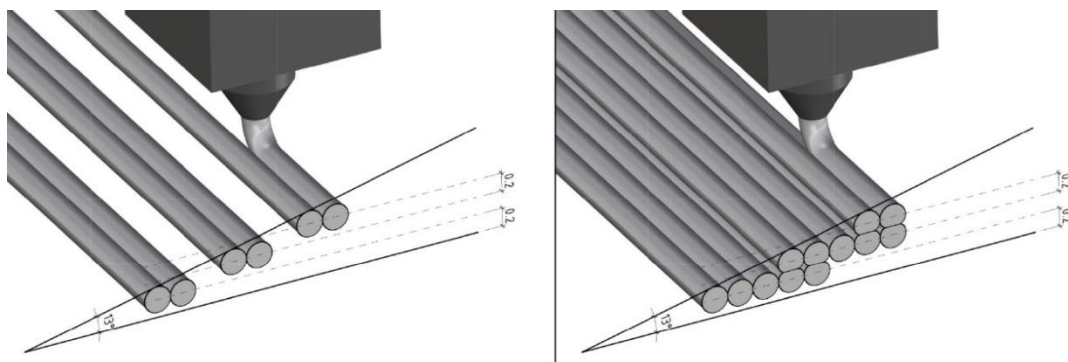
3.4.2.3 Postup tiskového procesu

Před tiskem je nejprve ošetřena platforma postupem popsaným v kapitole 2.5.1.3.1 a 2.5.1.3.2. Zároveň byla acetonem očištěna nezahřátá tryska od zbytků filamentu. Následně, po zahřátí extruderu a platformy na zvolenou teplotu, byla provedena kontrola extruze, extruzí přibližně 10 mm filamentu. Poté byl nahrán model v STL formátu. V kapitole 2.3 (Software a příprava dat), byla doporučena kontrola objektů v programu Netfabb. Tato kontrola byla provedena pouze u objektů stažených z webu Thingiverse. Dále byly v Repetier-host software upraveny rozměry, orientace a pozice modelů na platformě. Poslední částí bylo nastavování vybraných tiskových parametrů v CAM programu Slic3r.

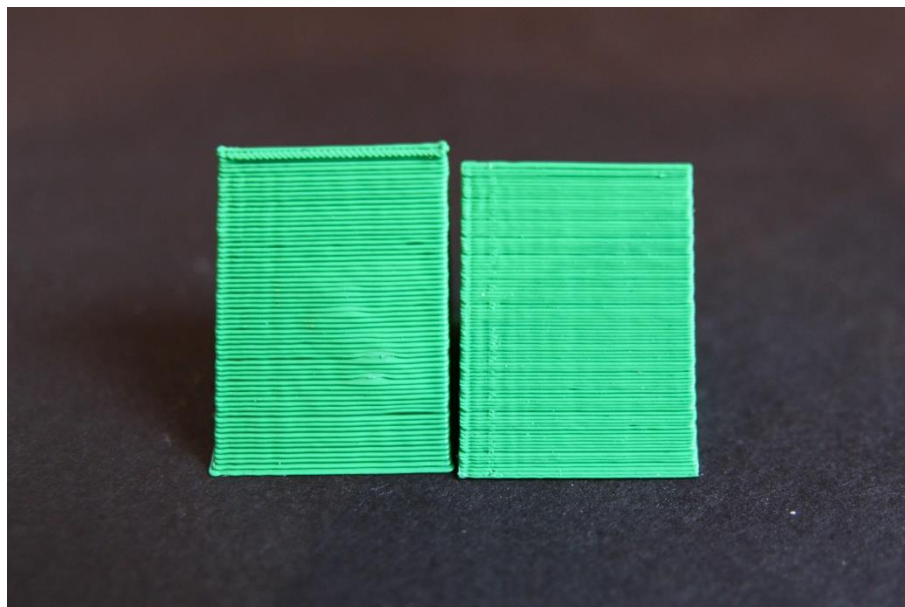
Nastavení tiskových parametrů vycházelo nejdříve z teoretické přípravy, doporučení výrobce a programu Slic3r. Poté, byly parametry ověřovány experimentálně. Sadou experimentálních testů byly zjišťovány a optimalizovány vhodné kombinace zkoumaných parametrů. Výsledné nastavení parametrů bylo ověřeno na komplexu tvarů (model G z obrázku 14). Pakliže nebyly zapotřebí korekce, bylo nastavení aplikováno na demonstrační objekt, znázorněný na obrázku 15. Následující odstavce se zabývají jednotlivými parametry.

Nastavení perimetrů

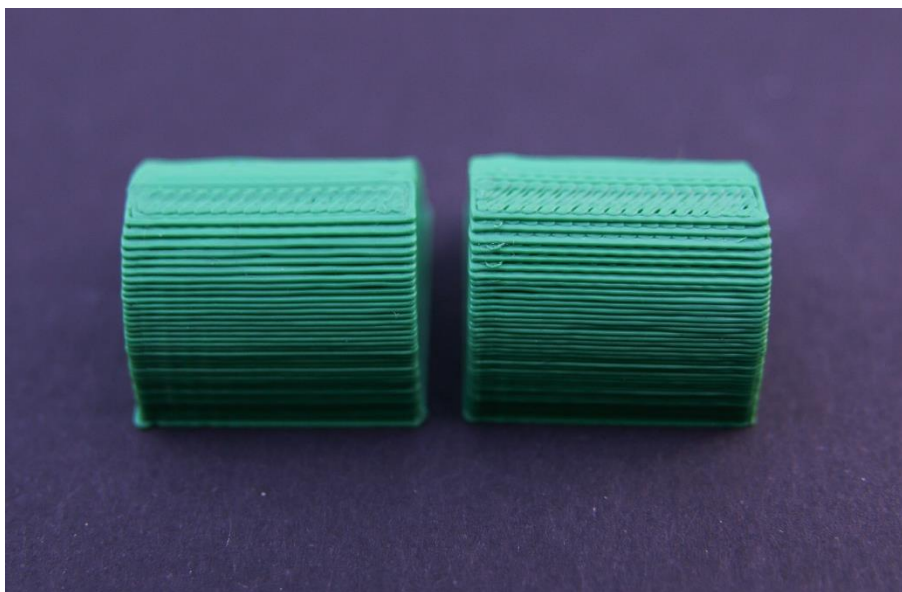
Nastavením perimetrů je definován minimální počet schránek okolo objektu. Týká se šikmých či oblých ploch, anebo objektů, kde je potřeba větší pevnosti. S přibývajícím počtem perimetrů roste doba tisku. J. Průša doporučuje 2 perimetry, při výšce vrstvy 0,2 mm [46]. Doporučené nastavení bylo tedy otestováno na testovacích modelech C a F z obrázku 14. Nastavení 2 perimetrů bylo přiřazeno rychlejšímu módu, kde bylo dostačující vzhledem k požadované kvalitě. Pro vyšší a střední rozlišení byly nastaveny 3 perimetry, které vykazovaly hladší stoupání. Ve Slic3r byla navíc zvolena možnost „extra perimetry, pokud jsou potřeba“. Princip perimetrů znázorňuje obrázek 19, náhledy vzorků obrázek 20 a 21.



Obrázek 19 Znárodnění funkce perimetrů. Vlevo nastaveny 2 perimetry, vpravo 5 perimetrů
 Úhel stoupání: 13°; Výška vrstvy: 0,2 mm [46]



Obrázek 20 Praktické znázornění perimetrů. Vlevo rychlý tisk (výška vrstvy 0,3 mm) a 2 perimetry, vpravo kvalitní tisk (vrstva 0,2 mm) a 3 perimetry



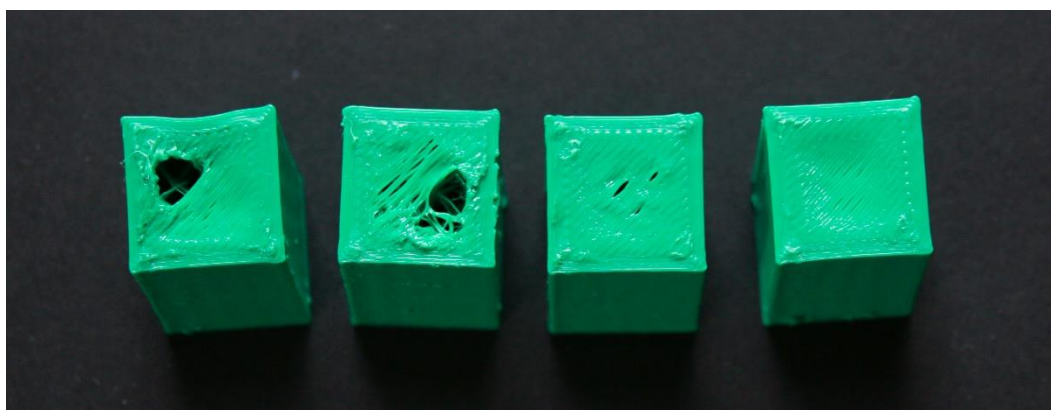
Obrázek 21 Praktické znázornění perimetrů na rychlém tisku – vrstva 0,3 mm. Počet perimetrů vlevo 3, vpravo 2

Počet plných vrstev – vrchní část a podstava

Počet vrchních vrstev spolu s počtem spodních vrstev určuje především povrchovou kvalitu, ale také pevnost objektu. S rostoucím počtem vrstev roste spotřeba materiálu a doba tisku. Zároveň však napomáhají k dosažení lepší povrchové kvality. První test probíhal ABS materiálem, středním rozlišením, tedy s výškou 0,27 mm pro první vrstvu a 0,25 mm pro ostatní vrstvy. Vycházelo se ze Slic3erem doporučených 3 vrchních vrstev, které se však dostatečně nezacelily a na povrchu se objevovaly otvory, viz obrázek 22. S tím mohlo souviset laborované nastavení počtu vrchních vrstev, procento výplně, které bylo původně nastaveno na 10 %, nesprávné chlazení, které v tomto případě nebylo možné ovlivnit, anebo rychlost tisku poslední plné vrstvy – rychlost však byla nastavena na 25 mm/s, proto nebyl důvod ji dále snižovat. Následující tisk pokoušel zvýšení procenta výplně na 60 % a zároveň byl zvýšen počet vrchních vrstev na 4. Rovněž byla změněna orientace objektu na platformě, aby bylo ověřeno, zda deformaci nezpůsobuje třeba kalibrace os tiskárny. Přestože bylo procento výplně výrazně zvýšeno, trhliny na povrchu objektu přetrvávaly. Zvýšení procenta výplně tedy nemělo výrazný vliv, stejně jako změna orientace objektu. Dále tak bylo zvyšováno jen nastavení počtu plných vrstev. Nejdříve bylo zvýšeno na 5 vrstev, kde už je znatelné zlepšení kvality, nicméně pro úplné uzavření povrchu byla ještě jedna vrstva přidána. Průběh zaznamenává obrázek 22. Po dosažení souvislé vrchní vrstvy u středního rozlišení, následovaly pokusy s rozlišením vyšším. V případě vyššího rozlišení a tedy nižší výšky vrstvy

bylo nutné počet vrstev přidat a v případě nižšího rozlišení, kde je požadovaná kratší doba tisku, byl počet vrstev snížený.

Nastavení spodních vrstev nevykazovalo žádné problémy. Klíčové bylo jen uchycení první vrstvy a správná teplota platformy. Slic3r poskytuje obecné doporučení, které činí 3 vrstvy. Pro urychlení tisku, byly pro rychlý tisk nastaveny 2 vrstvy. Pro vyšší kvality a tedy nižší výšky vrstev, byl počet spodních vrstev přidán vzestupně. Pro střední mód 3 vrstvy a kvalitní mód 4 vrstvy. Nastavení týkající se počtu vrchních a spodních vrstev bylo ověřeno také PLA materiálem, kde jsou hodnoty shodné.



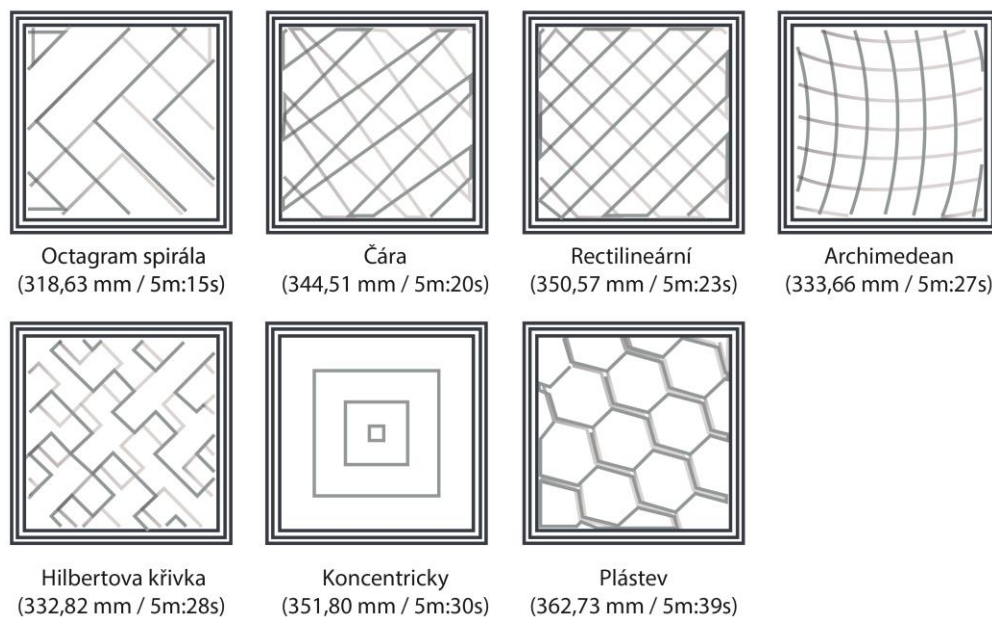
Obrázek 22 Znárodnění nízkého počtu vrchních vrstev. Tisk ABS středním rozlišením. Zvyšující se počet vrstev, zleva 3, 4, 5 a 6.

Množství a vzor výplně

Výplň je možné ovlivňovat dvěma parametry. Prvním je procento vyplňující objem objektu, kdy při 100% výplni bude objekt zcela zaplněn. Druhým parametrem je geometrie výplně, která ovlivňuje pevnost objektu.

All3DP informuje o běžných problémech 3D tisku. Jeden z nich se zabývá hustotou výplně, kde je 20% výplň doporučena jako optimální nastavení [45]. S uvedeným příkladem se shoduje také web Pinshape, kde je uváděn rozsah 10–20 % [47]. Pro střední rozlišení byla otestována výplň 20 %, která se zjištěným počtem vrchních vrstev nezpůsobovala žádné povrchové defekty. Pro cílený kvalitnější tisk byla výplň zvýšena na 25 % a pro nízké rozlišení snížena na 10 %, z důvodu dosažení co nejkratší doby tisku. Procentuální nastavení výplně je totožné pro oba materiály.

Vzor výplně záleží především na požadované pevnosti a preferenci uživatele. Složitější výplň prodlužuje dobu tisku a zvyšuje spotřebu materiálu. Pro oba materiály byl vybrán rectilineární vzor z následujících důvodů. Rectilineární vzor poskytuje pevnost v obou směrech namáhání a zároveň, jak znázorňuje obrázek 23, vykazuje nižší dobu tisku a spotřebu materiálu než je tomu u vzoru plástve, která je rovněž používaná pro mechanicky namáhané objekty.



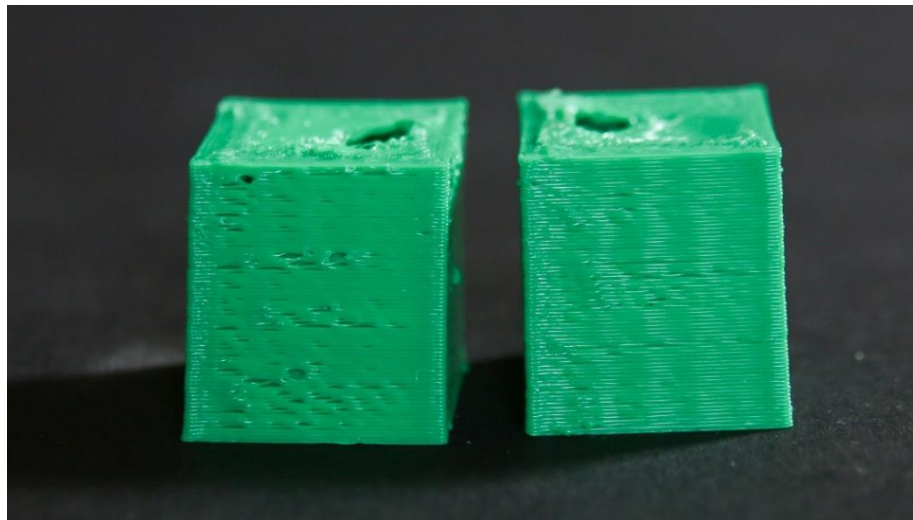
Obrázek 23 Vzory výplně dostupné v programu Slic3r. Vzorky o velikosti 20×20 mm s výplní 20 % [48]

Rychlost tisku perimetrů

Schéma perimetrů bylo znázorněno na straně 45, obrázkem 19 a funkce perimetrů byla popsána v odstavci *nastavení perimetrů*. Slic3r umožňuje nastavení rychlosti pro tři druhy perimetrů. *Perimetry*, což je vnitřní část, schovaná pod *externími perimetry*. Třetím typem jsou tzv. *malé perimetry*, které jsou využívány pro tisk malých negativních tvarů.

Ze zaměření jednotlivých druhů perimetrů vycházejí i výsledné rychlosti tisku. Rychlosti jsou rovněž přizpůsobeny požadované kvalitě tiskových módů, tedy mód s požadavkem na vyšší kvalitu, má nižší rychlost tisku perimetrů, než mód, zaměřující se na rychlou tvorbu objektu. Nejrychleji byly tištěny vnitřní *perimetry*, tedy ty, které nejdou vidět. Menší rychlost byla použita pro *externí perimetry*, u nichž lze vidět strukturu vrstev a podílejí se tak na estetické kvalitě objektu. *Malé perimetry* byly tištěny nejpomaleji, pro dosažení vyšší

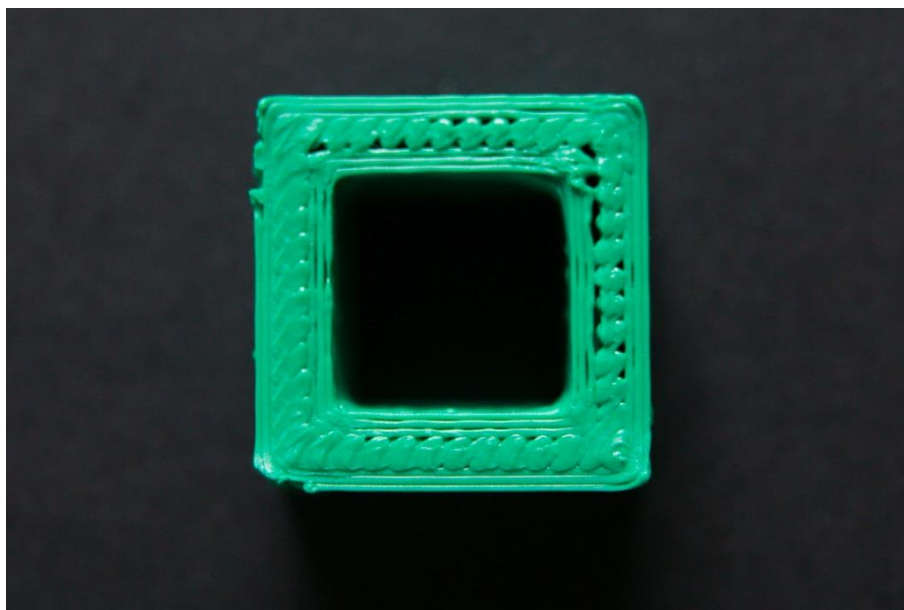
přesnosti tisku. Ukázka nastavení příliš vysoké rychlosti tisku externích perimetrů znázorňuje obrázek 24.



Obrázek 24 Znárodnění příliš rychlého tisku externích perimetrů, kdy docházelo k přerušování vrstev. Tištěno ABS výškou vrstvy 0,25 mm. Vzorek vlevo rychlostí 50 mm/s, vpravo snížena rychlost na 35 mm/s

Rychlost tisku mezer

Nastavení tisku mezer souvisí s krátkými rychlými pohyby s náhlou změnou směru, které by mohly způsobit rezonanci tiskárny. Z toho důvodu je udržována na nižších rychlostech. Parametr byl testován modelem *B* z obrázku 14, v horizontální pozici. Výchozí nastavení ve Slic3r je 20 mm/s. Nastavení bylo zprvu testováno ABS materiálem s výškou vrstvy 0,25 mm. Pro dosažení kratších doby tisku, byla rychlost zvýšena na 25 mm/s pro střední a 30 mm/s pro rychlý tisk. Pro všechny tiskové módy byla rychlost při tisku PLA vyšší o 5 mm/s, než při tisku ABS. Vyšší či naopak nižší rychlosti tisku nevedly ke zlepšení kvality objektů. Obrázek 25, znázorňuje vyskytující se defekt, v podobě mezer mezi perimetry a výplní. Tento defekt se povedlo odstranit až nastavením přesahu výplně perimetrů, které je řazeno do pokročilého nastavení.



Obrázek 25 Mezery mezi výplní a perimetry

Rychlost tisku výplně

K dispozici jsou tři druhy parametrů rychlosti tisku výplně. Jsou jimi – rychlost tisku vnitřní *výplně*, jejíž hustota se nastavuje procentuálně. Rychlost tisku *plné výplně*, pro kterou je použita vždy 100% výplň. Tato rychlost souvisí s počtem plných vrstev podstavy a vrchní části objektu, pro které je využívána. Posledním parametrem je rychlost tisku výplně *poslední vrstvy*.

Případné defekty při tisku vnitřní výplně nejsou vidět, proto je tištěna větší rychlostí než ostatní parametry. Výplň zvyšuje pevnost objektu a slouží také jako podpora vrchních vrstev. Optimální rychlost tisku výplně byla zjištěna mezi 65–70 mm/s. Vyšší rychlosti způsobovaly trhání výplně. Rychlost, která poskytovala kvalitně vytištěnou výplň, byla 65 mm/s pro kvalitní tisk a 70 mm/s pro střední a rychlý tisk. Nastavení je totožné pro oba materiály. Rychlost plné *výplně podstavy a vrchní části* objektu je o něco nižší, než tisk vnitřní výplně. V případě podstavy je potřeba dosáhnout kvalitní adheze mezivrstev a v případě tisku vrchních vrstev objektu je materiál pokládán buď na výplň, anebo do prostoru jako most, tudíž je nižší rychlost opět žádoucí. Z uvedených důvodů je u obou materiálů nastavena rychlost v rozsahu 35–50 mm/s. Výchozí rychlostí pro ABS je 45 mm/s, PLA 50 mm/s pro nastavení rychlého módu. Pro střední a kvalitní módy jsou rychlosti sníženy o 5 mm/s, respektive 10 mm/s.

Tisk poslední vrstvy objektu je nejpomalejší, protože je součástí napomáhající celkové estetické kvality výtisku. Pomalý tisk umožní spojení jednotlivých vláken tvořící povrch výtisku. Obecné doporučení v programu Slic3r činí 15 mm/s. Během testování byly vyzkoušeny rychlosti mezi 15–30 mm/s. Rychlost 15 mm/s byla vybrána pro tisk cílený na kvalitu pro ABS i PLA. Poskytovala kvalitně zacelený povrch a případné snížení rychlosti by nemělo smysl. Na úkor zvýšení doby tisku by bylo dosaženo jen malé, anebo žádné zvýšení kvality. Se zvyšující se výškou vrstvy tisku, rostlo nastavení rychlosti. Pro střední mód ABS byla rychlost nastavena na 20 mm/s, pro PLA 25 mm/s. Tyto rychlosti při tisku testovacích objektů poskytovaly dobrý poměr mezi rychlostí a kvalitou vytištěné vrstvy, stejně tak v případě rychlejšího módu, kdy pro ABS byla použita rychlost 28 mm/s a pro PLA 30 mm/s.

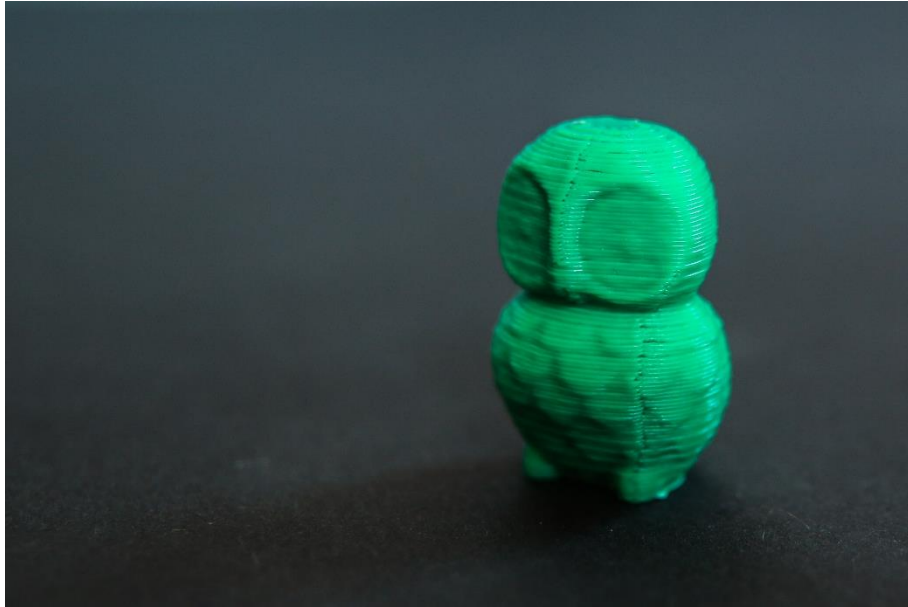
Rychlost tisku první vrstvy

Přilnutí objektu k platformě záleží na několika faktorech současně. Jde o rychlost tisku první vrstvy v kombinaci s teplotou platformy, výškou trysky od platformy, přípravou skla pro daný materiál a výškou první vrstvy – ta je zpravidla nastavována o něco vyšší, než pro ostatní vrstvy. Přilnutí první vrstvy je zcela zásadní a napomáhá tomu právě snížená rychlost, která většinou nepřesahuje 30 mm/s, proto i zde byla tato rychlost hraniční. Rychlost byla nastavena pro oba materiály stejně. Rychlosti byly nastavovány v návaznosti na výšky jednotlivých vrstev, respektive kvality módů. Pro kvalitní mód byla nastavena na 25 mm/s. Tato rychlost by byla použitelná i pro střední a kvalitní mód, nicméně s cílem o něco snížit dobu tisku, byly rychlosti pro střední a rychlý mód lehce zvýšeny. Pro střední mód na 28 mm/s a pro kvalitní na 30 mm/s. V průběhu testování se objekty z platformy nejednou odlouply, nicméně chyba pramenila z nesprávného nastavení výšky trysky od platformy. Všechny rychlosti byly tedy nastaveny v mezi kvalitní adheze první vrstvy.

Fixní parametry

Fixními parametry jsou ty, které byly neměnné po celou dobu tisku, pro oba materiály a zároveň všechny rychlosti tisku. Jde o pozici švu, která byla zvolena jako náhodná. Další možnosti nastavení pozice švu jsou – nejbližší a zarovnaná. Ty byly vyloučeny z důvodu tvorby nevzhledného švu, jak je znázorněno na obrázku 26. Následující fixní parametr, týkající se vzoru výplně, byl popsán v kapitole 3.4.2.3 v odstavci *množství a vzor výplně*. Dalším fixním parametrem je retrakce materiálu v trysce. Vlákno je motorem neustále vytlačováno, a to i v případě krátkých přejezdů. Nastavení retrakce zamezí úniku materiálu

z trysky. Retrakce byla nastavena, aby probíhala během změny hladiny vrstvy. V tom okamžiku je materiál z trysky povytáhnut o zvolenou délku, která činí 0,9 mm. Jedná se o nastavení tiskárny, které bylo zařazeno mezi laborované parametry poté, co se na objektech objevovaly malé nánosy materiálu, znázorněné na obrázku 27.



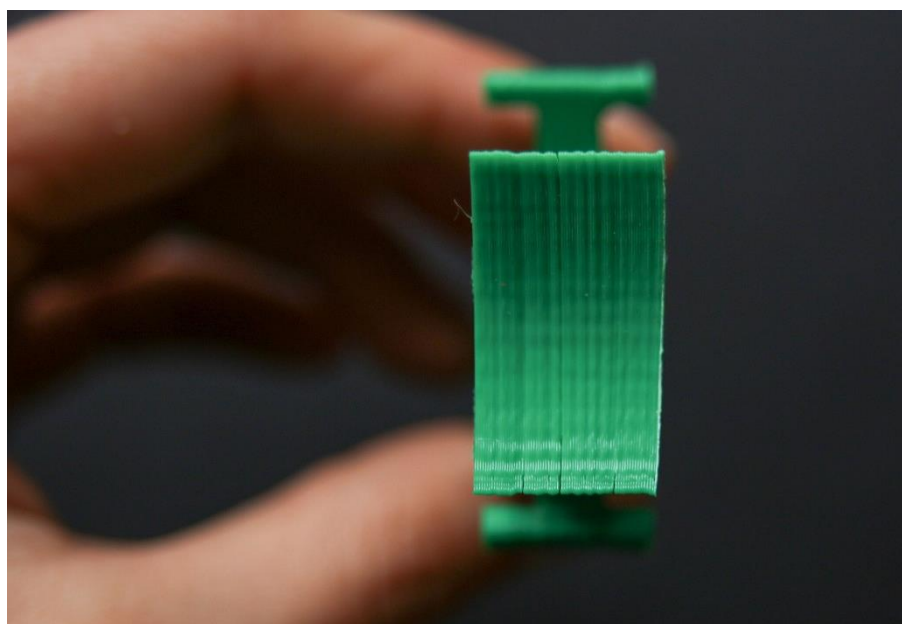
Obrázek 26 Znáznornění švu při nastavení pozice švu jako „nejbližší“



Obrázek 27 Nastavení retrakce materiálu v extruderu. Vlevo bez retrakce, uprostřed s retrakcí 0,5 mm, vpravo s retrakcí 0,9 mm

Pokročilé parametry

Intenzivní chlazení způsobovalo jak separaci vertikálních vrstev u ABS (viz obrázek 28), tak i nedokonalé zacelení vrchních horizontálních vrstev u materiálu PLA, jak je možné vidět na finálních objektech, na obrázcích 45, 49 a 53. Tyto defekty se nepodařilo odstranit v rámci základního nastavení, stejně jako mezery mezi výplní a perimetry, proto byly v průběhu testování přidány některé parametry z pokročilého nastavení. Nicméně ani pokročilé nastavení šířky perimetrů, externích perimetrů a plné svrchní vrstvy nevedlo ke zlepšení vizuální kvality objektů. Je nutné zmínit, že experimentální pokusy byly prováděny na objektech o maximální velikosti 6 cm, proto je možné, že se separace vrstev ještě více projeví při tisku větších objektů. Dále byl nastaven přesah výplně perimetrů. Z původní hodnoty 10 % uvedené ve Slic3r byl zvýšen na 25 %. Na finálních obrázcích 29–56 lze vidět, že se již mezery mezi výplní a perimetry nevyskytují. Pokročilé parametry byly nastaveny na základě defaultního nastavení programu Slic3r - Prusa Edition.



Obrázek 28 Separace vrstev ABS vznikající intenzivním chlazením

4 Výsledky a diskuse

Finální parametry tisku jsou relativní, to znamená, že pro každý unikátní objekt by mohly být vždy individuálně nastaveny. Tím by bylo dosaženo optimální kvality a času. Záměrem však byla příprava obecného tiskového nastavení, které pokryje co největší škálu tvarů, bez nutnosti nastavení upravovat. Následující tabulky 5 a 6, shrnují výsledné nastavení tisku pro PLA a ABS materiál. Modře zvýrazněné parametry jsou shodné pro oba materiály. Tabulka 7, uvádí neměnné parametry během tiskového procesu pro oba materiály a všechny tiskové rychlosti. Byla vyhotovená také tabulka 8, porovnávající doby tisku jednotlivých módů.

Tabulka 5 Výsledné nastavení rozlišení tiskových parametrů pro tisk materiálem PLA

MATERIÁL PLA			
TISKOVÝ MÓD	KVALINÍ	STŘEDNÍ	RYCHLÝ
NASTAVENÍ EXTRUDERU (°C)			
Teplota extruderu – první vrstva	215	215	218
Teplota extruderu – ostatní vrstvy	210	210	213
Teplota platformy – první vrstvy	55	55	55
Teplota platformy – ostatní vrstvy	50	50	50
VRSTVY A PERIMETRY			
Výška vrstvy (mm)	0,2	0,25	0,3
Výška první vrstvy (mm)	0,22	0,27	0,32
Počet vertikálních perimetrů	3	3	2
Horizontální počet plných vrstev – vrchní část	9	6	4
Horizontální počet plných vrstev – podstava	4	3	2
Hustota výplně (%)	25	20	10
RYCHLOST (mm/s)			
Perimetry	40	45	50
Malé perimetry	20	20	20
Externí perimetry	25	30	30
Výplň	65	70	70
Plná výplň	40	45	50
Plná výplň vrchní vrstvy	15	25	30
Tisk mezer	25	30	35
Rychlost tisku první vrstvy	25	28	30

POKROČILÉ PARAMETRY			
Šířka perimetrů (mm)	0,45	0,45	0,43
Šířka externích perimetrů (mm)	0,45	0,45	0,5
Šířka plně svrchní vrstvy (mm)	0,45	0,45	0,45
Přesah výplně/ perimetrů (%)	25	25	25

Tabulka 6 Výsledné nastavení tiskových parametrů pro tisk materiálem ABS

MATERIÁL ABS			
TISKOVÝ MÓD	KVALITNÍ	STŘEDNÍ	RYCHLÝ
NASTAVENÍ EXTRUDERU (°C)			
Teplota extruderu – první vrstva	255	255	258
Teplota extruderu – ostatní vrstvy	250	250	253
Teplota platformy – první vrstvy	70	70	70
Teplota platformy – ostatní vrstvy	65	65	65
VRSTVY A PERIMETRY			
Výška vrstvy (mm)	0,2	0,25	0,3
Výška první vrstvy (mm)	0,22	0,27	0,32
Počet vertikálních perimetrů	3	3	2
Počet plných vrstev – vrchní část	9	6	4
Počet plných vrstev – podstava	4	3	2
Hustota výplně (%)	25	20	10
OKRAJE (mm)			
Šířka okraje	7	7	7
RYCHLOST (mm/s)			
Perimetry	35	45	50
Malé perimetry	15	20	20
Externí perimetry	25	30	30
Výplň	65	70	70
Plná výplň	35	40	45
Plná výplň vrchní vrstvy	15	20	28
Tisk mezer	20	25	30
Rychlost tisku první vrstvy	25	28	30

POKROČILÉ PARAMETRY			
Šířka perimetrů (mm)	0,45	0,45	0,46
Šířka externích perimetrů (mm)	0,45	0,45	0,5
Šířka plné svrchní vrstvy (mm)	0,45	0,45	0,45
Přesah výplně/ perimetrů (%)	25	25	25

Tabulka 7 Fixní parametry, které byly konstantní během tiskového procesu pro oba materiály a zároveň pro všechny tiskové rychlosti.

FIXNÍ PARAMETRY	
Pozice švu	Náhodná
Vzor výplně	Rektilineární
Vzor výplně – vrch/ spodek	Rektilineární
Délka retrakce v extruderu (mm)	0,9
Retrakce při změně tisku vrstvy	✓

Tabulka 8 Porovnání časové složky při tisku finálního objektu z obrázku 14. Doba tisku pro nastavené rozlišení vychází ze zjištěných a nastavených finálních parametrů, uvedených v tabulkách 5, 6 a 7

	KVALITA	STŘEDNÍ	RYCHLÝ
ABS (min.)	91	62	42
PLA (min.)	81	58	39

Z tabulky 8 vyplývá následující:

- Doby tisku odpovídají jednotlivým rozlišením, a sice se zvyšujícím se rozlišením roste doba tisku.
- Materiál PLA má kratší doby tisku, což vychází z nastavených parametrů, které dobu tisku přímo ovlivňují. Jsou jimi výšky vrstev, počet perimetrů, vzor a hustota výplně, nastavení okrajů „brim“, počet plných vrstev vrchní části a podstavy, a rychlosti tisku.

Jak lze vyčíst z finálního tiskového nastavení z tabulek 5 a 6, materiál PLA byl tištěný stejnou, anebo vyšší rychlostí než ABS. Důvodem je lepší adheze vertikálních mezivrstev, kdy nedocházelo k jejich separaci a proto mohly být použity vyšší rychlosti tisku.

Výsledné parametry byly výrazně ovlivněny větracím zařízením. Například nastavení teploty extruderu a platformy bylo vyšší přibližně o 10–20 °C vzhledem k doporučením výrobce. Přestože byly zavedeny pokročilé parametry, kde byla stanovena šířka externích perimetrů, obrázek 28 znázorňuje objekt tištěný ABS, kde si lze všimnout separace mezi vrstev, jako důsledek vysoké intenzity chlazení. Separace se však neobjevovala při tisku menších objektů. Je tedy předpokladem, že se tento defekt bude vyskytovat u větších objektů výrazněji.

U PLA zase docházelo k rozdělování vláken svrchní vrstvy, jak lze vidět nejlépe na obrázcích 45, 49, 53 a 56. V literatuře [49] je uvedeno, že by mohlo jít o nesprávné nastavení počtu vrchních vrstev, procenta výplně či podextrudování. Tyto argumenty lze vyloučit, neboť by se defekt musel projevit také při tisku ABS materiálem. Minimální tloušťka vrstvy pro kvalitní tisk vrchní vrstvy je 0,5 mm, což nastavený počet splňuje [49]. Procento výplně je rovněž v doporučeném rozsahu, v případě kvalitního módu je dokonce vyšší. Nabízí se tedy podextrudování (tj. tiskárna neextruduje tolik plastu, kolik software očekává), nicméně nesprávné nastavení tohoto parametru by se rovněž projevilo při tisku ABS. Předpokladem je tedy příliš rychlé ochlazování materiálu, kdy se vlákna nestihnou spojit a vytvořit tak souvislou vrstvu na povrchu objektu.

Doporučení autora

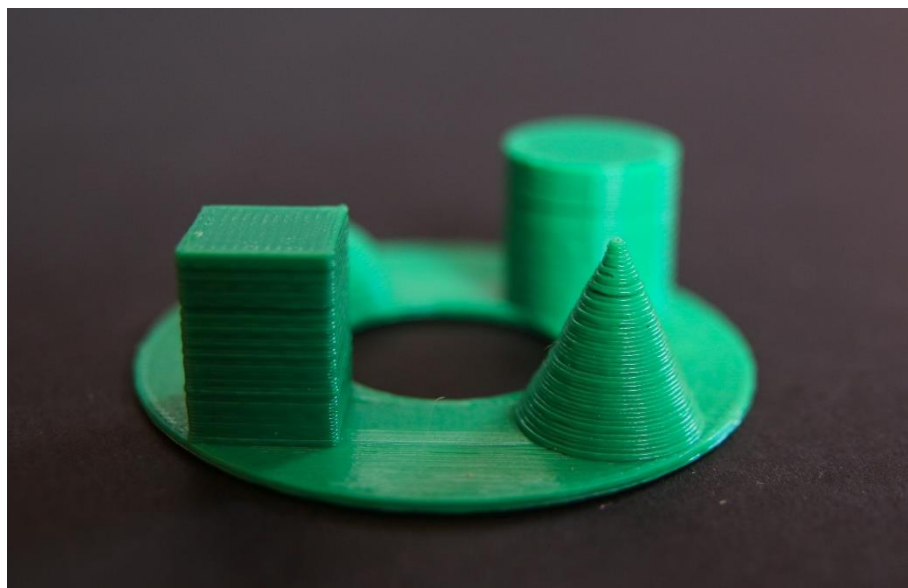
- Kromě nastavovaných parametrů existují také parametry nepřímé, které rovněž přispívají ke kvalitě objektu. Mezi tyto parametry patří orientace modelu na platformě. Příkladem může být model B z obrázku 14, jehož tisk bude snadnější s horizontální orientací na platformě. V případě vertikální orientace bude otvor tištěný jako most a vrstvy by se mohly propadat.
- Nastavení procenta výplně určuje pevnost objektu, na kterou mohou být kladeny různé požadavky. Důležité je mít na paměti, že se zvyšujícím se procentem výplně sice roste pevnost objektu, ale i doba tisku, spotřeba filamentu, tudíž i tiskové náklady.
- Nastavení perimetrů bylo testováno na velmi jednoduchých objektech. Tvarově komplexnějším objektům by bylo vhodné počet perimetrů navýšit.
- S rychlostí tisku souvisí kvalita detailů výtisku. Pokud je tištěný tvarově složitější objekt, či je cílem přesnost, je vhodné rychlost snížit.

- Okraje okolo objektu „brim“, je vhodné nastavit také pro objekty, které mají malou styčnou plochu s platformou. Tak, aby se snížila možnost špatného přilnutí.
- ABS prototypy lze povrchově upravovat broušením, slepováním anebo vyhlazovat jejich povrch acetonovými parami. Poslední metoda dokončujícího zpracování byla ověřena – po dobu 25 minut byl model vložen do acetonových par, které vyhladily nerovnosti na povrchu modelu, sjednotily jednotlivé vrstvy a model se stal lesklejším. Pokus byl proveden na modelu z obrázku 14. Nevýhodou bylo zamezení funkčnosti modelu, který po aplikaci acetonových par nebylo možné rozevřít.

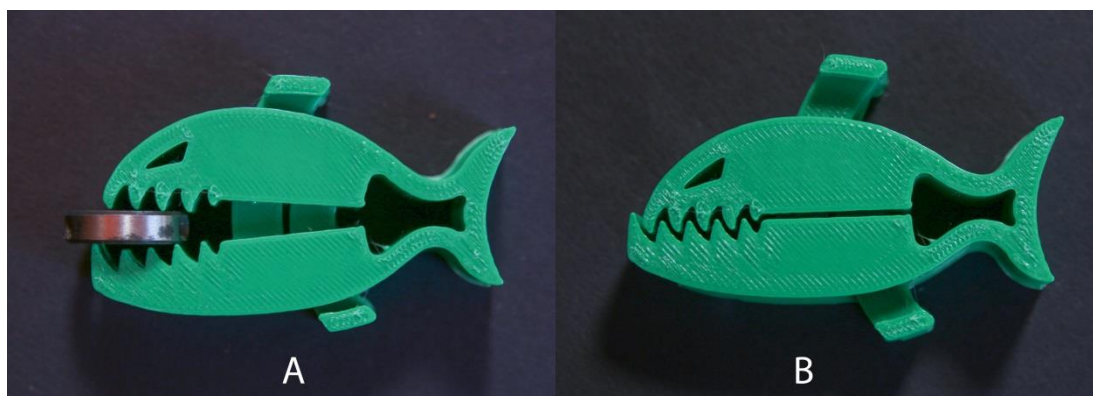
Obrázky 20–56 demonstrují finální parametry tisku vyhotovené pro materiály ABS a PLA. Na obrázcích 20–42 jsou znázorněny objekty tištěné ABS a 43–56 PLA materiálem.



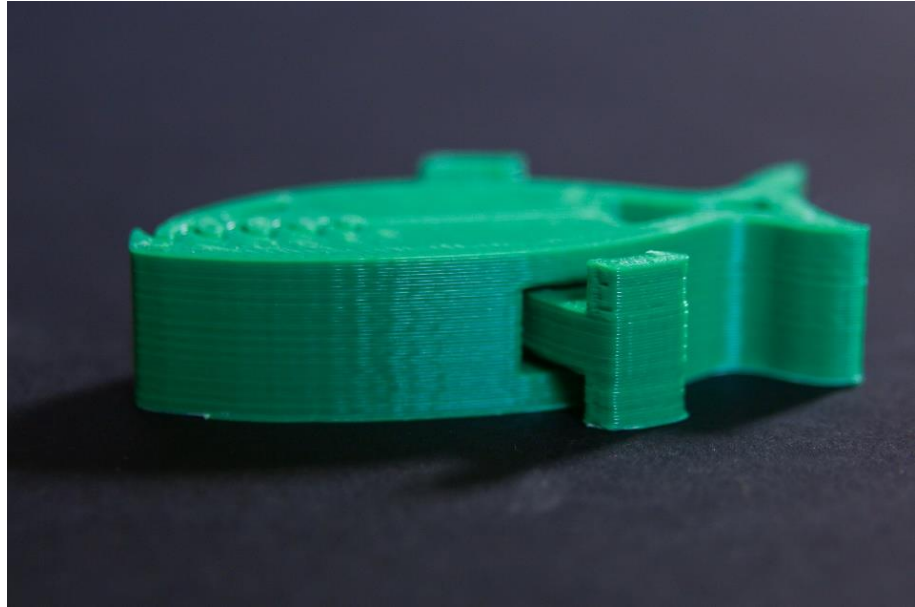
Obrázek 29 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex



Obrázek 30 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex, detail



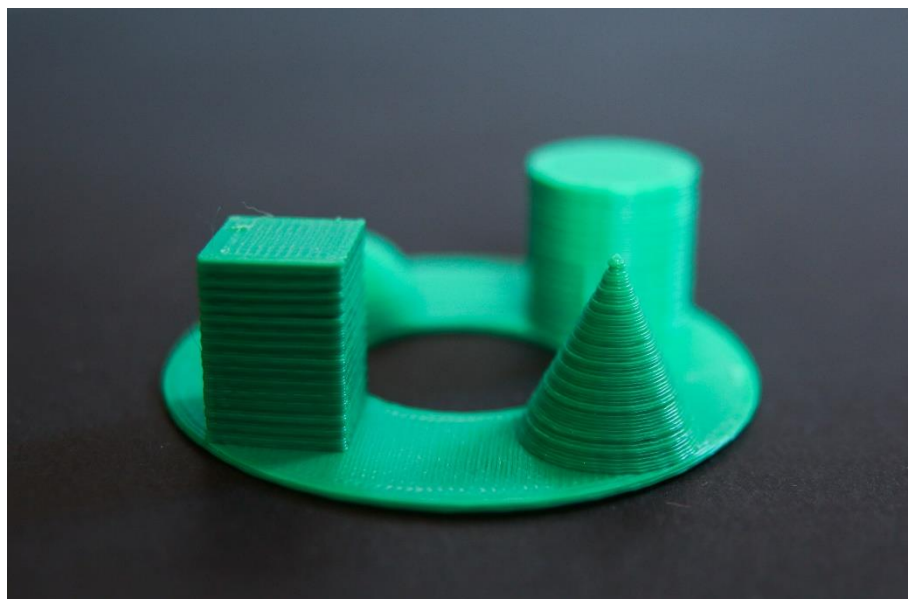
Obrázek 31 Rychlý mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora



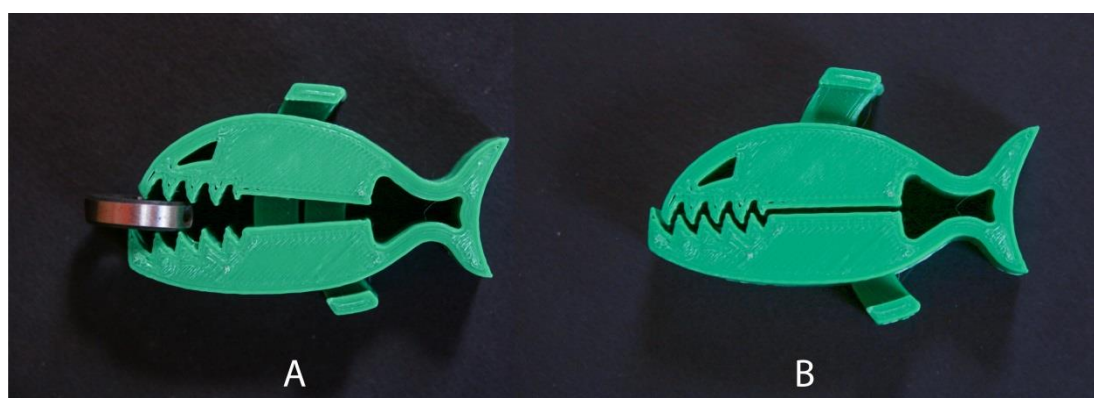
Obrázek 32 Rychlý mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev



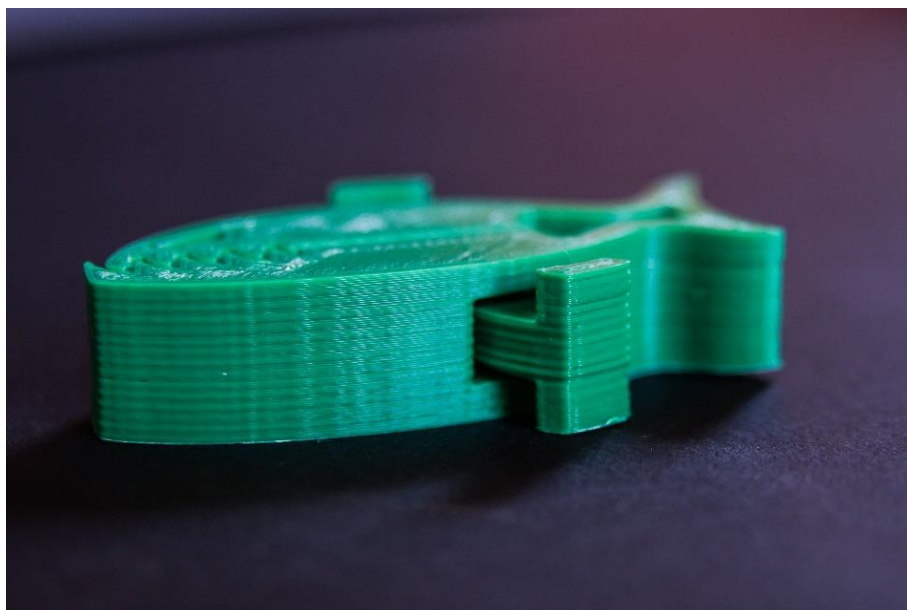
Obrázek 33 Střední mód materiálem ABS, testovací komplex



Obrázek 34 Střední mód materiálem ABS, testovací komplex, detail



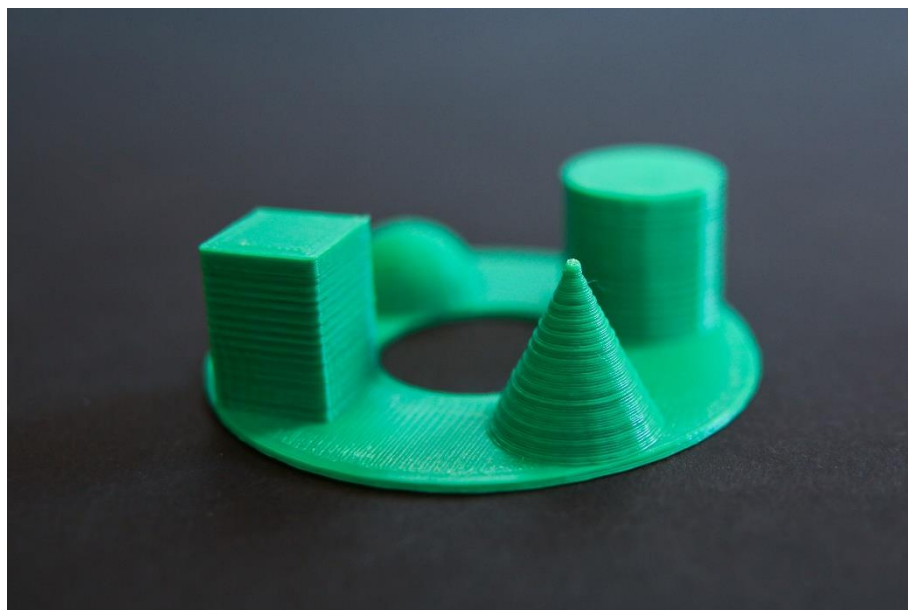
Obrázek 35 Střední mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora



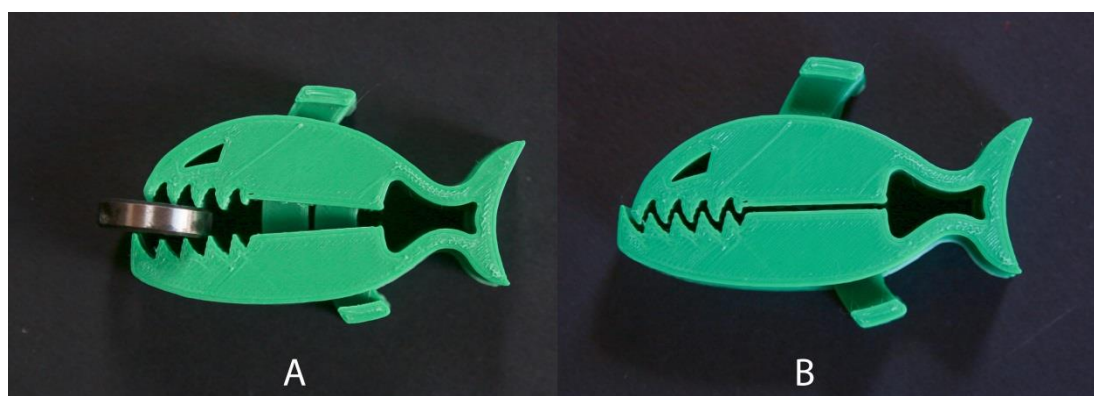
Obrázek 36 Střední mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev



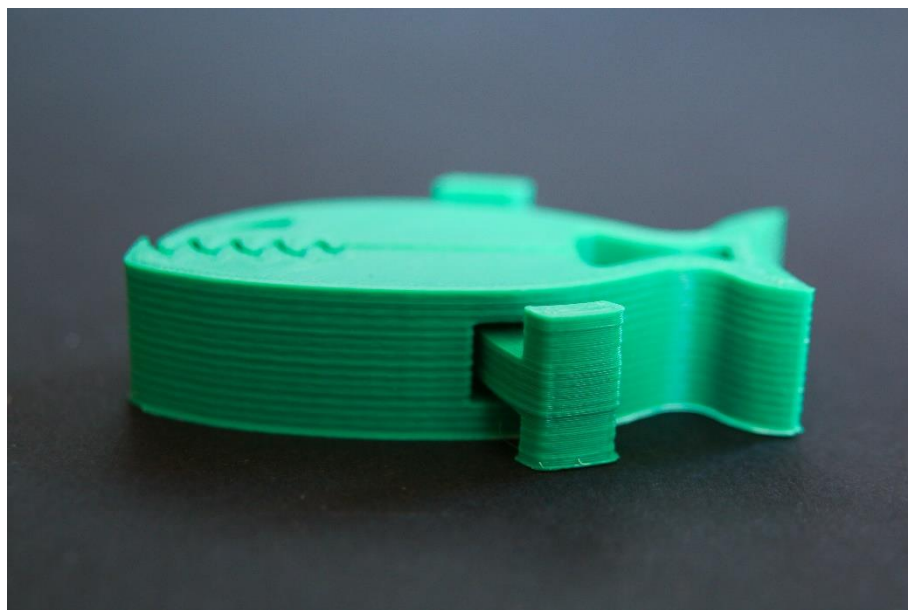
Obrázek 37 Kvalitní mód materiálem ABS, testovací komplex



Obrázek 38 Rychlý mód materiálem ABS, testovací komplex, detail



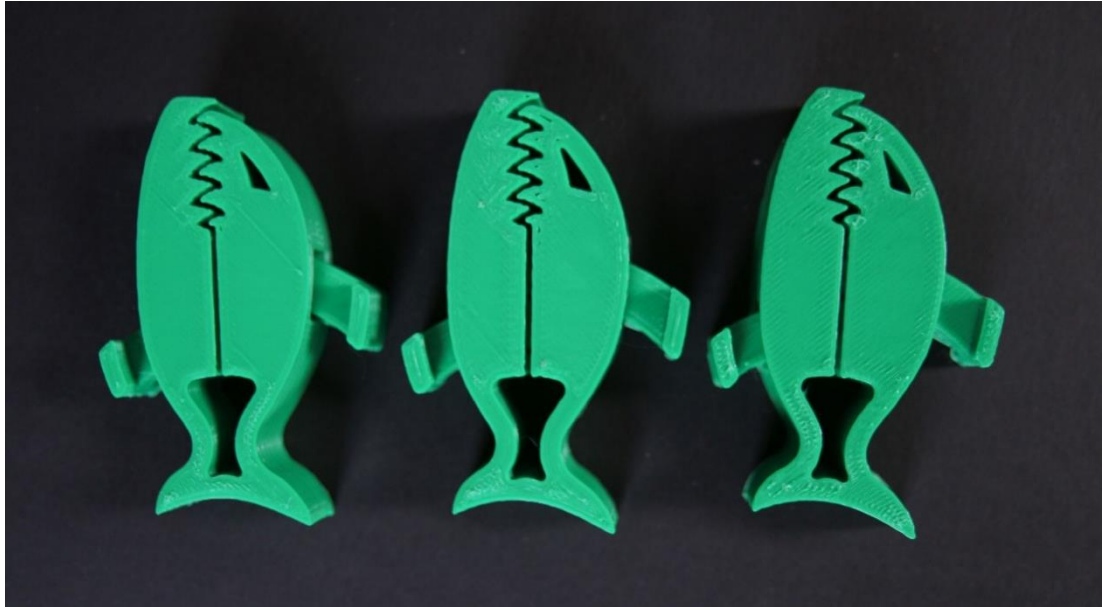
Obrázek 39 Kvalitní mód materiálem ABS, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora



Obrázek 40 Kvalitní mód materiálem ABS, reálný objekt, detail vrstev



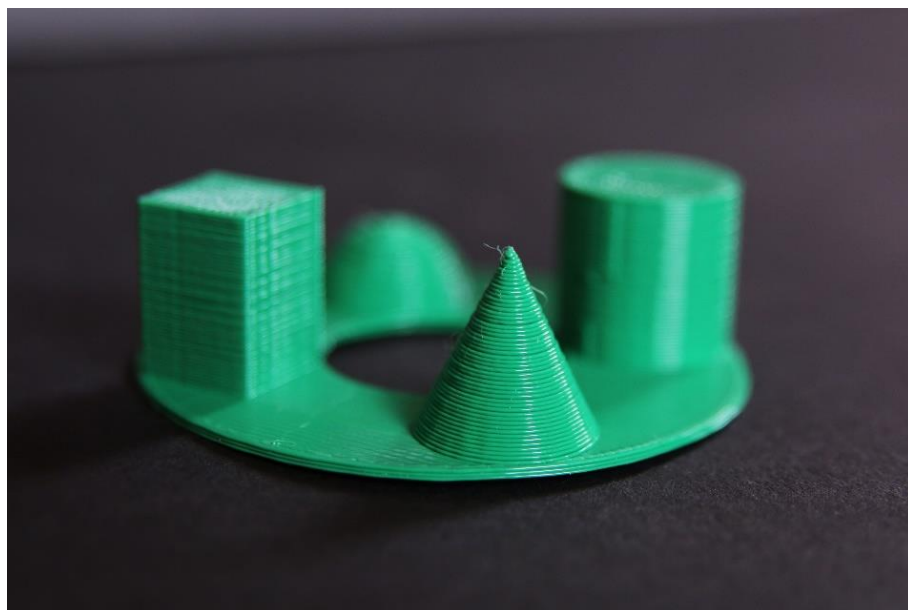
Obrázek 41 Porovnání testovacích komplexů. Zleva rychlostní mód, uprostřed střední mód, vpravo kvalitní mód



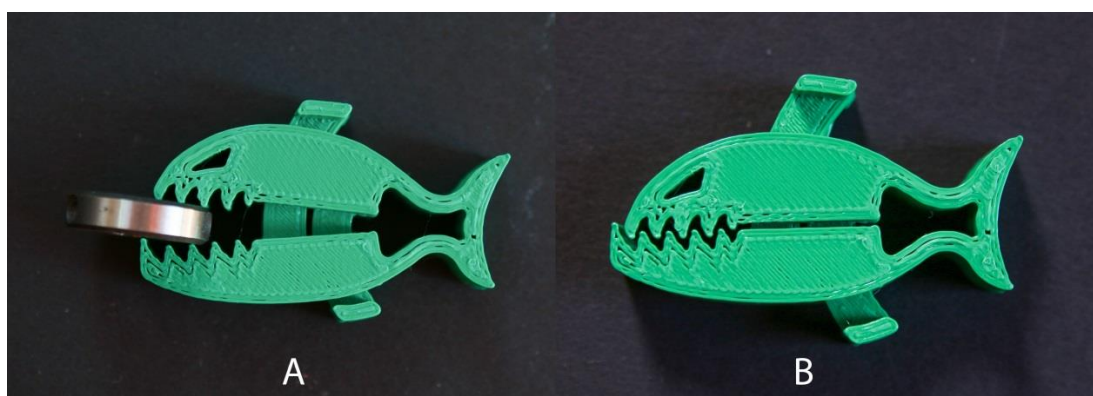
Obrázek 42 Porovnání reálných objektů tištěných materiálem ABS. Vlevo kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód



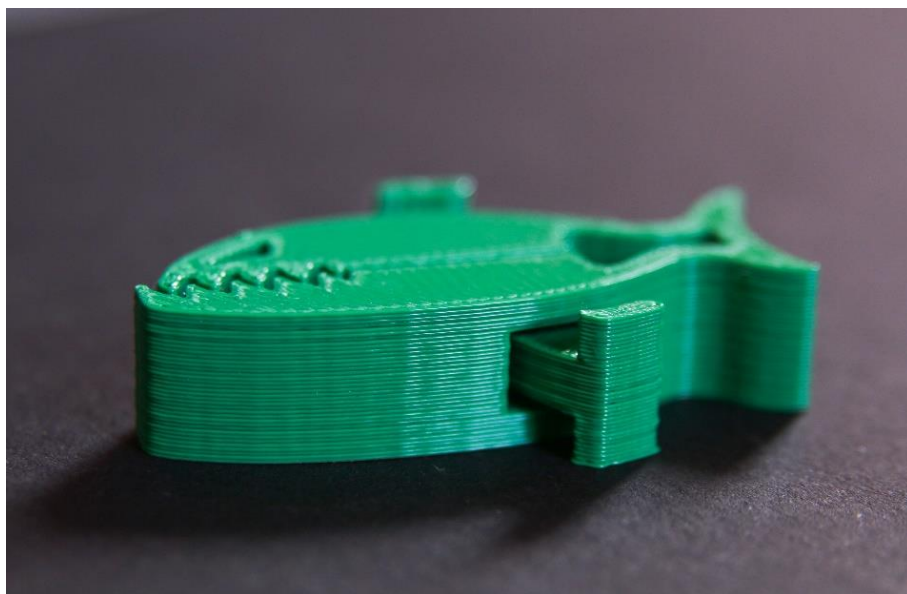
Obrázek 43 Rychlý mód materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora



Obrázek 44 Rychlý mód materiálem PLA, testovací komplex, detail



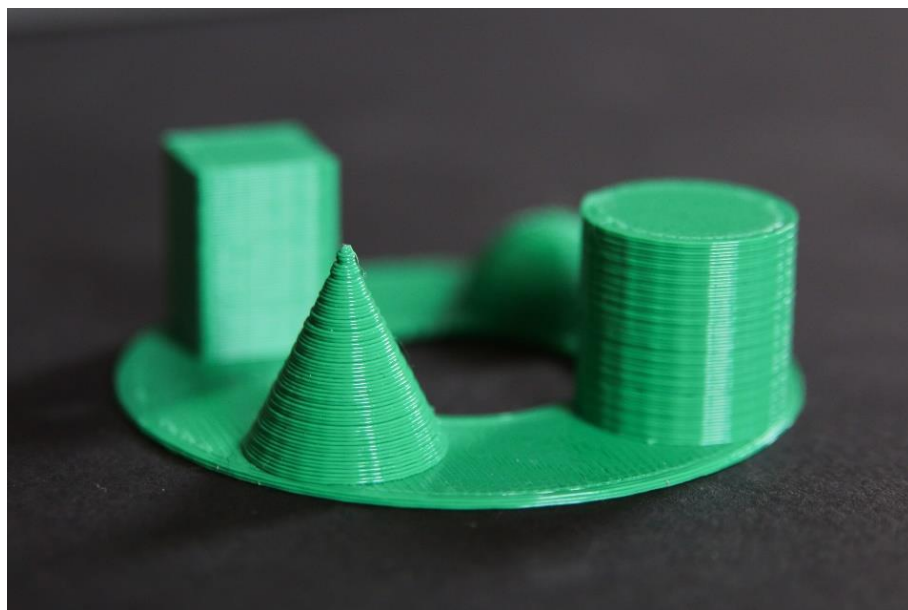
Obrázek 45 Rychlý mód materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora



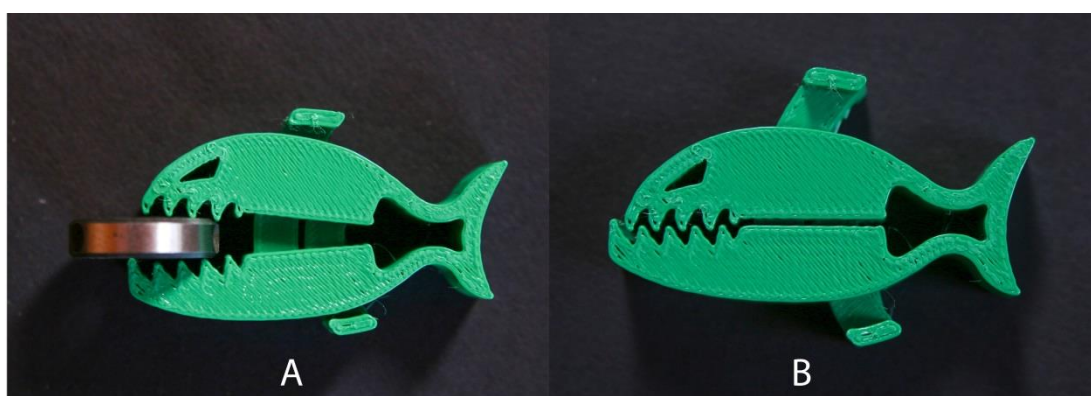
Obrázek 46 Rychlý mód materiálem PLA, reálný objekt, detail vrstev



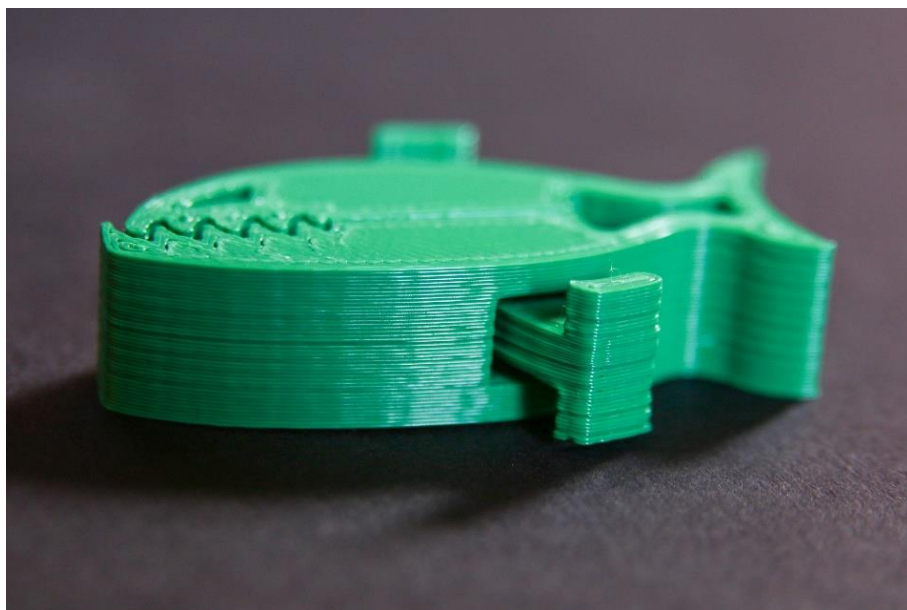
Obrázek 47 Střední mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora



Obrázek 48 Střední mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, detail



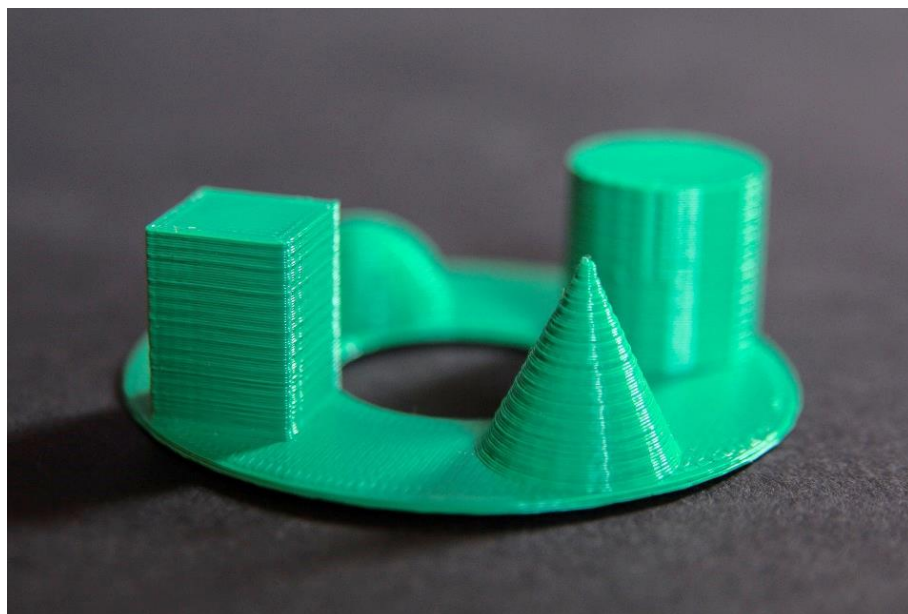
Obrázek 49 Střední mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora.



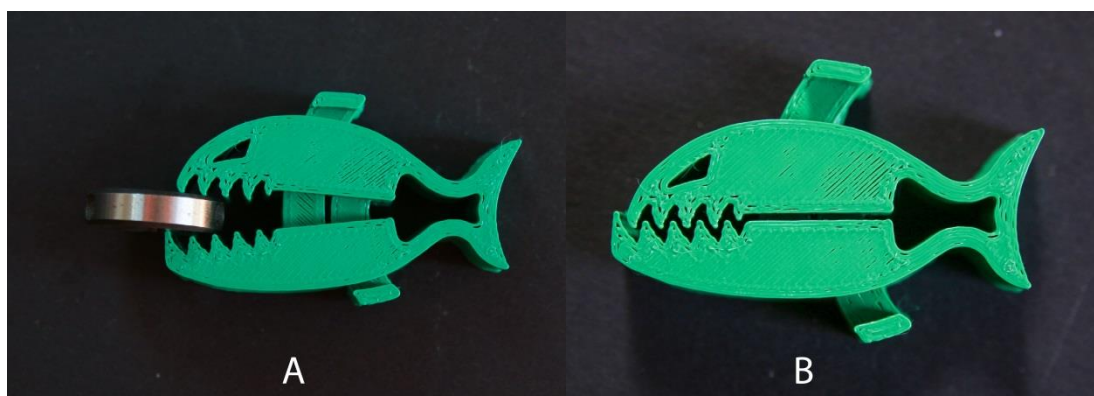
Obrázek 50 Střední mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt, detail



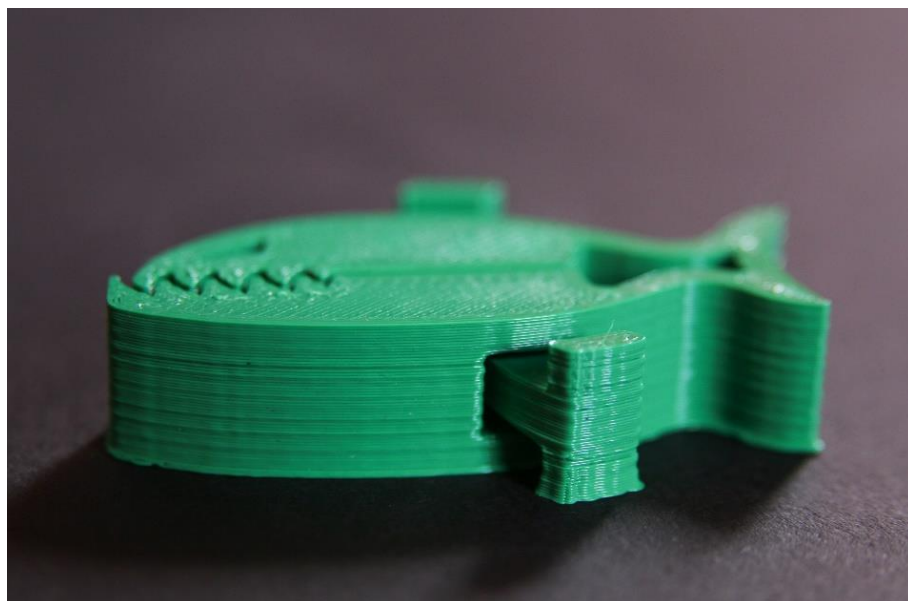
Obrázek 51 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, pohled shora



Obrázek 52 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, testovací komplex, detail



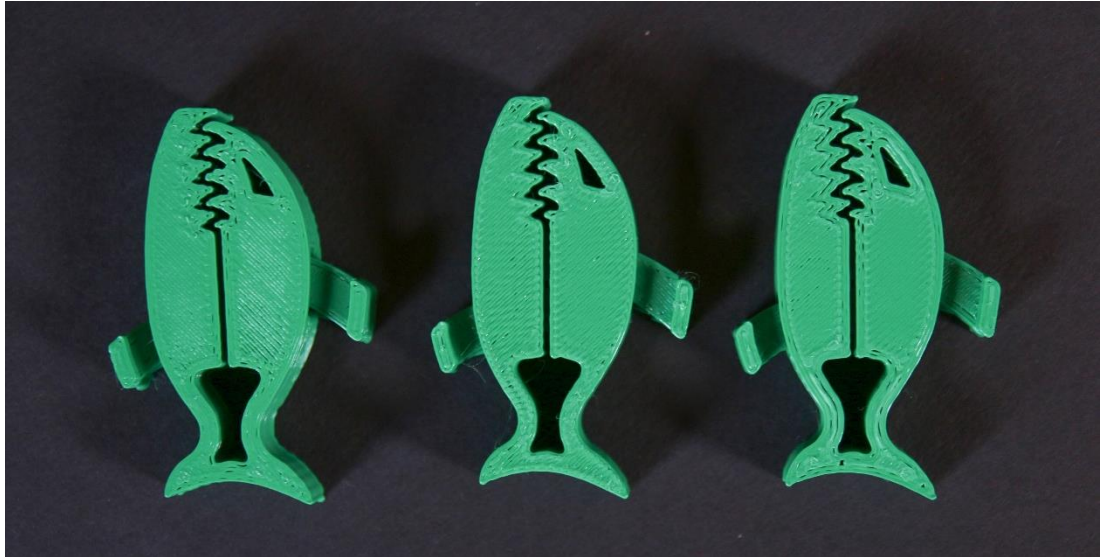
Obrázek 53 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt. A ukázka funkčnosti, B pohled shora



Obrázek 54 Kvalitní mód tištěný materiálem PLA, reálný objekt, detail



Obrázek 55 Porovnání testovacích komplexů tištěných materiálem PLA. Zleva kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód



Obrázek 56 Porovnání reálných objektů tištěných materiálem PLA. Zleva kvalitní mód, uprostřed střední mód, vpravo rychlý mód

5 Závěr

V rešeršní části práce byla popsána technologie založená na termálním extruderu a rovněž používané materiály pro tuto technologii. Dále pak požadavky na datové soubory a jejich zpracování pro 3D tisk. Experimentální část této práce je zaměřena na optimalizaci tiskárny, která navíc zahrnovala kalibraci tiskárny. Optimalizace probíhala formou testování geometrických objektů a testovacího komplexu vybranými parametry tisku. Na závěr byly vyhotoveny reálné objekty, demonstrující finální parametry tisku. Srovnáváním vizuální kvality objektů, bylo vyhotoveno tiskové nastavení pro materiály ABS a PLA. Pro každý materiál byly vyhotoveny 3 tiskové módy:

- Mód pro rychlý tisk – odpovídá mu nižší kvalita v podobě nižšího rozlišení, zato nejkratší doba tisku. Tento mód je cílený na rychlou tvorbu prototypů, vhodný pro ověření základního tvaru.
- Střední mód – představuje vyvážené nastavení mezi kvalitou a dobou tisku. Vyšší rozlišení tisku, než u módu cíleného na rychlost, umožňuje tisk většího množství detailů. Rozlišení je přímo úměrné době tisku. Rozdíl mezi rychlým a středním módem při tisku finálního objektu z obrázku 15, byl přibližně 20 minut.
- Mód pro kvalitní tisk – mód cílený na kvalitu, má nejvyšší rozlišení z připravovaných nastavení, tomu však odpovídá doba tisku, která exponenciálně narůstá. Časový rozdíl mezi středním a kvalitním módem byl v případě tisku PLA 22 minut, s ABS 29 minut.

Během testování se potvrdily předpoklady PLA materiálu, kdy byl deklarován jako méně problémový materiál pro 3D tisk, než je tomu při tisku ABS. U PLA nedocházelo k separaci vertikálních vrstev a zároveň objekt dobře adheroval k platformě. Výjimku snadné tisknutelnosti tvořil nedostatek v podobě rozdělování vláken svrchní vrstvy objektu. Vada byla přisouzena intenzivnímu chlazení objektu v průběhu tisku. Tisk ABS byl celkově problémovější. Během testování se objevovaly problémy s adhezí objektu k platformě a také mírná separace vertikálních vrstev, což jsou rovněž důsledky intenzivního chlazení.

Reference

- [1] Kniha základy 3D tisku od Josefa Průši. *PRUSA RESEARCH*. [Online] 2014. [Citace: 8. Březen 2017.] <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>.
- [2] HULL, Charles W. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US4575330 A Spojené Státy Americké, 11. březen 1986. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US4575330>.
- [3] FEYGIN, Michael. *Apparatus and method for forming an integral object form laminations*. US4752352 A Spojené Státy Americké, 21. červen 1988. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/US4752352>.
- [4] DECKHARD, Carl R. *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. US4863538 A Spojené Státy Americké, 5. Zář 1989. Dostupné také z: <https://www.google.com/patents/US4863538>.
- [5] CRUMP, Scott S. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. US5121329 A Spojené Státy Americké, 9. červen 1992. Dostupné také z: <https://www.google.com/patents/US5121329>.
- [6] Riley, John. Open Mindsets Link 3D Printing & Internet of Things. *COMPUTERWORLDUK*. [Online] 14. Březen 2013. [Citace: 9. Březen 2017.] <http://www.computerworlduk.com/it-business/open-mindsets-link-3d-printing--internet-of-things-3571147/>.
- [7] *A Review on Powder Bed Fusion Technology of*. Valmik Bhavar, Prakash Kattire, Vinaykumar Patil, Shreyans Khot#, Kiran Gujar, Rajkumar Singh. Bangalore : autor neznámý, 2014. 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/285982651>.
- [8] PolyJet. *Stratasys Direct Manufacturing*. [Online] [Citace: 9. Března 2017.] Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/solutions/polyjet/>.
- [9] STL File Format for 3D Printing. *All 3DP*. [Online] 2016. [Citace: 10. Březen 2017.] <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>.

- [10] Grip, Björn. *3D printing - The basics and beyond*. Bergvik Publishing, 2015. ASIN: B00RPCJ9WG.
- [11] Vít, Tomáš. Netfabb 7: Příprava modelů na 3D tisk pro náročné uživatele (recenze). *3D tisk aditivní výroba a rapid prototyping*. [Online] 22. Březen 2016. [Citace: 24. Květen 2017.] <http://www.3d-tisk.cz/netfabb-7-priprava-modelu-na-3d-tisk-pro-narocne-uzivatele-recenze/>.
- [12] HORVATH, Joan. a Rich. CAMERON. *3D printing with MatterControl*. APRESS, 2015. ISBN 978-1-4842-1056-7.
- [13] ISO/ASTM 52900:2015. *International Organization for Standardization*. [Online] 2015. [Citace: 20. Březen 2017.] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>.
- [14] 3D Printing Processes. *3D Printing Industry*. [Online] [Citace: 19. Březen 2017.] Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>.
- [15] Technologie Rapid Prototypingu. *Průmyslové spektrum*. [Online] 2002. [Citace: 7. Březen 2017.] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu.html>.
- [16] Prasad, Dr Danesha M. S. *Rapid Prototyping and Allied Manufacturing Technologies*. Airwalk Publications, 2016. stránky 24-34. ISBN 978-93-84893-69-9.
- [17] What is Stereolithography (SLA)? *3D SYSTEMS*. [Online] [Citace: 7. Březen 2017.] <http://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>.
- [18] 12 Best Resin (DLP/SLA) 3D Printers in Spring 2017. *All about 3D printing*. [Online] 2017. [Citace: 17. Březen 2017.] Dostupné z: <https://all3dp.com/best-resin-dlp-sla-3d-printer-stereolithography/#xyznobel>.
- [19] 3D printer resin. *iMakr*. [Online] [Citace: 17. Březen 2017.] Dostupné z: https://www.imakr.com/us/en/20-resin?orderby=price&orderway=asc&id_category=20&n=36.
- [20] Polymeric-Based 3D Printing for Tissue Engineering. *Open Access Biomedical Image Search Engine*. [Online] 2015. [Citace: 23. Červen 2017.] Adoptované z:

https://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=PMC4491116_40846_2015_38_Fig3_HTML&req=4.

[21] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second Edition. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.

[22] France, Anna Kaziunas. *Make: 3D Printing*. Maker Media, 2013. ISBN 978-1457182938.

[23] Kumar, Mathan. *3D Printing(Addictive) System*. Ashok Vijay Studios, 2017. ASIN: B01NAXNS47.

[24] KARUNAKARAN, K.P., Shivamurthy DIBBI, P.Vivekananda SHANMUGANATHAN, D.Satyanarayana RAJU a Srinivasarao KAKARAPARTI. Efficient stock cutting for laminated manufacturing. [Online] 2002. [Citace: 26. Březen 2017.] Dostupné z: https://www.imakr.com/us/en/20-resin?orderby=price&orderway=asc&id_category=20&n=36<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448501000872>. DOI: 10.1016/S0010-4485(01)00087-2. ISSN 00104485.

[25] Sher, Davide. Mcor's New \$5,995 ARKe 3D Printer Ushers in Full-Color Desktop 3D Printing for All. *3D Printing Industry*. [Online] 2016. [Citace: 28. Březen 2017.] Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/64028-64028/>.

[26] Fused Deposition Modeling. *3D tisk Aditivní výroba a Rapid prototyping*. [Online] [Citace: 31. Březen 2017.] Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>.

[27] Průša, Josef. Co je RepRap? *Josef Průša*. [Online] [Citace: 21. Duben 2017.] <http://josefprusa.cz/co-je-reprap/>.

[28] Sasson, Gal. RepRap Project – interview with Adrian Bowyer. [Online] 2013. [Citace: 22. Duben 2017.] Dostupné z: <https://itp.nyu.edu/classes/datmm-spring2013/reprap-project-interview-with-adrian-bowyer/>.

[29] The Official History of the RepRap Project. *All3DP*. [Online] 2016. [Citace: 24. Duben 2017.] Dostupné z: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>.

- [30] 3D Printer Filament Types Overview. *3D Printing from scratch*. [Online] [Citace: 19. Květen 2017.] Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printer-filament-types-overview/>.
- [31] FDM Thermoplastics. *Stratasys*. [Online] [Citace: 9. Duben 2017.] Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>.
- [32] ABS - akrylonitril-butadién-styrén. *Resinex*. [Online] [Citace: 21. Květen 2017.] Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html>.
- [33] Průša, Josef. Příručka 3D tiskaře. *Prusa Research*. [Online] 2015. [Citace: 21. Květen 2017.] Dostupné z: <http://www.prusa3d.com/downloads/manual/Prusa-i3-manual-2.85-cz.pdf>.
- [34] ABS. *3d-tisk aditivní výroba a rapid prototyping*. [Online] [Citace: 21. Květen 2017.] Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/abs/>.
- [35] Petruš, Josef. Kyselina polymléčná nejen jako biodegradabilní polymer. *CHEMPOINT, vědci pro průmysl a praxi*. [Online] 2. Prosinec 2011. [Citace: 22. Květen 2017.] Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>.
- [36] Grieser, Franz. PLA vs ABS: Filaments for 3D Printing Explained & Compared. *All3DP*. [Online] 2016. [Citace: 7. Červen 2017.] Dostupné z: <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/>.
- [37] FDM 3D Printing Materials Compared. *3D HUBS*. [Online] [Citace: 7. Červen 2017.] Adoptované z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared#introduction>.
- [38] Giang, Ken. PLA vs. ABS: What's the difference? *3D HUBS*. [Online] [Citace: 7. Červen 2017.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>.
- [39] ABS PrintPlus. *3DFactories*. [Online] [Citace: 19. Červen 2017.] [http://www.3dfactories.cz/en/filaments/abs-printplus#lightbox\[square1\]/3/](http://www.3dfactories.cz/en/filaments/abs-printplus#lightbox[square1]/3/).
- [40] PLA PrintPlus. *3DFactories*. [Online] [Citace: 19. Červen 2017.] [http://www.3dfactories.cz/en/filaments/pla-printplus#lightbox\[square1\]/6/](http://www.3dfactories.cz/en/filaments/pla-printplus#lightbox[square1]/6/).

- [41] RepRap konstrukce. *RepRap*. [Online] [Citace: 13. Květen 2017.] Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#RAMPS>.
- [42] RepRap Options. *RepRap*. [Online] [Citace: 8. Květen 2017.] Dostupné z: http://www.reprap.org/wiki/RepRap_Options#Print_Bed.
- [43] A., Nikhil. 3D Printing Processes - Material Extrusion (Part 2/8). *Engineers Garage*. [Online] [Citace: 2. Duben 2017.] <https://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing-processes-material-extrusion>.
- [44] Triffid Hunter's Calibration Guide. *RepRap*. [Online] [Citace: 13. Červen 2017.] Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter%27s_Calibration_Guide#Slicer_settings.
- [45] Jennings, Alastair. Troubleshooting Guide to 26 Common 3D Printing Problems. *All3DP*. [Online] 29. Květen 2017. [Citace: 19. Červen 2017.] Dostupné z: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>.
- [46] Prusa, Josef. K čemu slouží nastavení perimeters? *Josef Prusa*. [Online] 18. Prosinec 2015. [Citace: 20. Červen 2017.] Dostupné z: <http://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>.
- [47] 3D Slicer Settings for Beginners – 8 Things You Need to Know. *Pinshape*. [Online] 12. Říjen 2015. [Citace: 22. Červen 2017.] Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/3d-slicer-settings-5-things-you-need-to-know-about-3d-printing-software/>.
- [48] Hodgson, Gary. Infill Patterns and Density. *Slic3r manual*. [Online] [Citace: 20. Červen 2017.] Adoptované z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill#fn1>.
- [49] Print Quality Troubleshooting Guide. *Simplify 3D*. [Online] [Citace: 18. Červen 2017.] Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting>.