



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Návrh zkušebního artefaktu pro zjišťování vlastností
FDM tiskáren**

**Proposal of the test artifact to determine the properties
of FDM printing machines**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Autor práce: Jan Kahoun

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kahoun** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459877**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh zkušebního artefaktu pro zjišťování vlastností FDM tiskáren

Název bakalářské práce anglicky:

Proposal of the test artifact to determine the properties of FDM printing machines

Pokyny pro vypracování:

1. 3D tisk - principy, technologie
2. FDM technologie
3. Technologičnost konstrukce

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce



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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27. 4. 2018

Datum převzetí zadání




Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29.7.2018.....


.....

Podpis

Poděkování:

Za pomoc v této práci bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Janu Šimotovi. Jeho součinnost mi umožnila vyzkoušet mnou navržené objekty na další 3D FDM tiskárně a také za připomínky, které mou práci obohatily.

Anotace

Obsahem této bakalářské práce je popis aditivní technologie výroby, detailněji se věnuje konkrétně 3D FDM tisku. Obsahem teoretické části práce je obecný popis 3D tiskáren a detailněji je zde popsána technologie FDM. Cílem této práce je vytvořit testovací artefakt vhodný pro porovnání tiskáren tohoto druhu. Před samotnou tvorbou testovacího artefaktu je zde popsáno, jaké nároky jsou na tiskárnu kladeny. Pro názorné ukázání je v poslední kapitole popsáno a provedeno porovnání 3 tiskáren.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní technologie, FDM, porovnání

Annotation

The content of this bachelor thesis is description of additive technology, more specifically it deals with 3D FDM printing. The content of the theoretical part of the thesis is a general description of 3D printers and FDM technology is described here in more details. The aim of this work is to create a test artifact suitable for comparison of 3D FDM printers. Prior to the creation of the test artifact, the requirements for the printer are described. For illustration, the last chapter describes and compares 3 printers.

Keywords: 3D printing, additive technology, FDM, comparison

Obsah

1	Úvod	8
2	Princip tisku na 3D tiskárnách.....	10
3	Metody 3D tisku	13
3.1	FDM (Fused Deposition Modeling).....	13
3.2	SLS (Selective Laser Sintering).....	13
3.3	SLA (Stereolitography).....	14
3.4	DLP (Digital Light Processing)	15
3.5	LOM (Laminated Object Manufacturing).....	15
3.6	DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	16
4	Metoda tisku FDM	17
4.1	Kinematika FDM tiskáren.....	18
4.2	Pohon a ovládání pohonu	20
4.2.1	Krokové motory.....	21
4.2.2	Řídicí elektronika.....	22
4.3	Tiskové hlavy	23
4.4	Tiskové podložky	25
4.5	Materiály	26
4.6	Zdravotní závadnost materiálů.....	29
4.7	Vícebarevný a vícemateriálový FDM tisk	30
4.8	Slicovací software (CAM)	33
5	Kvalitativní parametry tiskáren	34
6	Návrh artefaktů.....	36
6.1	Společná pravidla pro tisk artefaktů.....	36
6.2	Artefakt 1 – přemostění a tolerance	37
6.3	Artefakt 2 – chlazení velkého objemu materiálu	39
6.4	Artefakt 3 – tisk převisů.....	39

6.5	Artefakt 4 – tvoření otřepů při tisku.....	40
6.6	Artefakt 5 – rozměrové tolerance.....	41
6.7	Artefakt 6 – test adheze.....	43
7	Ukázka použití testovacích artefaktů.....	45
7.1	Ultimaker 3.....	45
7.1.1	Parametry tiskárny	46
7.1.2	Výsledky testů.....	46
7.2	P802M.....	50
7.2.1	Parametry tiskárny	50
7.2.2	Výsledky testů.....	50
7.3	Zortrax M200	53
7.3.1	Parametry tiskárny	54
7.3.2	Výsledky testů.....	54
7.4	Vyhodnocení porovnání tiskáren	57
8	Závěr.....	59
	Seznam použité literatury	60
	Seznam obrázků	63
	Zdroje obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam příloh.....	66

1 Úvod

3D tisk je moderní aditivní výrobní metoda, při tomto druhu výroby vzniká fyzický objekt v 3-rozměrném prostoru.

V současné době je 3D tisk užíván pro výrobu prototypů, malosériovou výrobu dílů, výrobu náhradních dílů a umělecké účely. Nemalou částí využití 3D tisku je také například oblast modelářství a celkově hobby sféra. Výhodou výroby produktů tímto způsobem je možnost vytvoření vnitřní struktury, vnitřních jinak neobrobitelných prostor a v neposlední řadě také rychlost produkce – prototypy (zde se často užívá pojmu rapid prototyping) mohou být zhotoveny v řádu minut, a to bez nutnosti výroby forem a pouze s minimem potřebných dokončovacích operací. [1,2]

Pro výrobu prototypů jsou využívány převážně tiskárny s možností tisku plastu, tato technologie je nejlevnější a dostupná i pro domácí uživatele. Tiskárnu pro domácí užití je možno pořídit již za jednotky tisícikorun. Ceny tiskáren pro tisk průmyslových plastových prototypů se pohybují v cenové hladině okolo sto tisíc korun. [3]

Mezistupněm mezi tiskárnami využívajícími plasty a kovy je tisk plastů s příměsí vláken (skelná, dřevěná, kovová), tato technologie je s omezeními dosažitelná i na levnějších tiskárnách pro domácí uživatele, snižuje však jejich životnost a zvyšuje náročnost tisku.

V sériové výrobě se s 3D tiskem můžeme setkat například v odvětví lékařství (výroba zakázkových implantátů, zubních rovátek, levných protéz), výrobě tvarově složitých dílů (například turbín v letectví), při nutnosti vytvoření vnitřní struktury materiálu a mnoho další. S výtisky se ve výrobě setkáme také nepřímo, často jsou využívány na výrobních linkách ve formě přípravků usnadňujících lidem práci, nebo také například jako adaptabilní rozhraní mezi vyráběným produktem a robotem. Lze totiž velmi levně a rychle produkovat díly na míru přizpůsobené tvarům nových produktů. [4,5]



Obrázek 1: Ukázka užití v letectví



Obrázek 2: ukázka užití v lékařství



Obrázek 3: ukázka užití pro výrobu forem

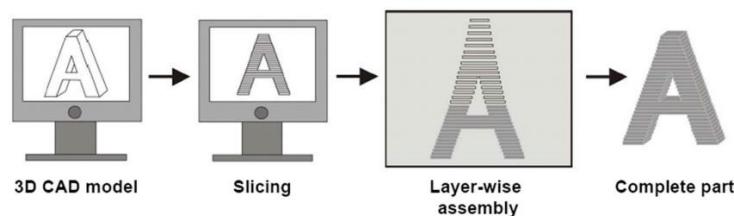


Obrázek 4: ukázka užití ve výrobním procesu ABB

Mým cílem je vytvořit testovací objekt vhodný pro porovnání vlastností FDM 3D tiskáren. Artefakt by měl být schopen porovnat mechanické vlastnosti, schopnosti řídicí elektroniky a ovládací (slicovací) software tiskáren pokud je tento software dodáván výrobcem a není možné zvolit jiný.

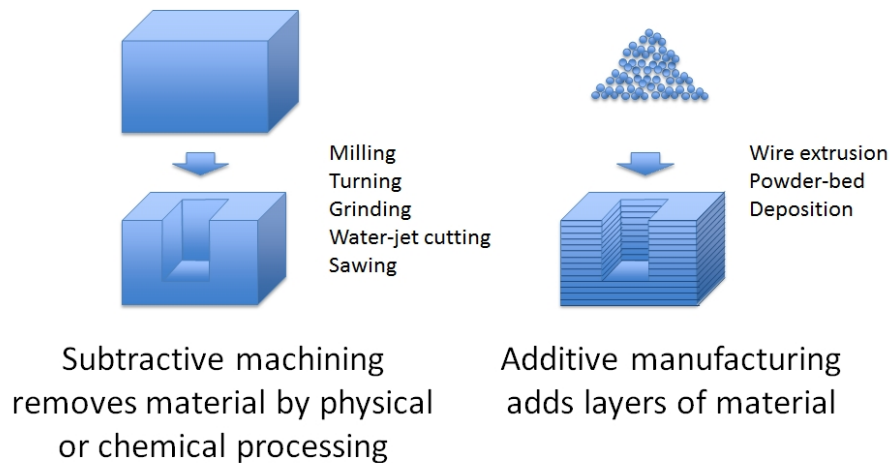
2 Princip tisku na 3D tiskárnách

Cílem tvorby na 3D tiskárně je získat fyzický objekt vytvořený podle počítačové předlohy. Pracovní postup je podobný jako při výrobě na CNC obráběcích strojích – nejprve vytvoříme samotný model požadovaného objektu v CAD softwaru, následně tento objekt převedeme do slicovacího softwaru (CAM software určený pro tvorbu strojového kódu pro 3D tiskárny) a následně vyexportujeme a přeneseme strojový kód do samotné tiskárny. Pro přenos dat se v dnešní době nejčastěji používá sériová komunikace, přenos souboru přes paměťovou kartu či nahrání dat přímo do úložiště tiskárny přes síťové rozhraní. Zde je často výhodnější přenést data přímo do tiskárny, během tisku následně nemusí být zapnutý ovládací počítač, a navíc při ztrátě spojení nedochází k přerušení tisku. [6,7]



Obrázek 5: proces 3D tisku

Samotný princip tisku na 3D tiskárně spočívá v přidávání (adici, odtud pochází pojem aditivní výroba) materiálu vrstvením na sebe, tento proces je opakován dokud nevznikne žádaný objekt. Proces musí být v naprosté většině případů tisku plastu kontinuální, nesmí docházet k jeho dlouhodobému přerušení z důvodu velmi obtížného navazování tisku. Tato vlastnost je dána především teplotní roztažností plastů, objekty jsou během tisku zahřívány a když dojde k jejich zchladnutí (a následnému smrštění) nemusí být tiskárna schopna pokračovat v tisku. Pokud bude přeci jen navázání tisku dosaženo, na součásti bude velmi pravděpodobně viditelné rozhraní a také slabé místo v tomto přerušení.



Obrázek 6: porovnání rozdílů výroby

Vstupním materiálem pro tento proces mohou být plasty, kovy, betonové směsi, skla, fotopolymery, vosky a mnoho dalších materiálů. Samotná forma vstupního materiálu je závislá na konkrétní tiskárně, z nejběžnějších možností to jsou plastové struny, granulát, prášek, tekutina či folie nebo deskový materiál.



Obrázek 7: ukázka vytištěných modelů

Tiskárny, pro které bude vytvořen testovací objekt v této práci užívají jako vstupní materiál plastový filament (strunu), eventuálně granulát. Ten však není tak hojně používaný a jeho užití je většinou potřebné pouze u velkých tiskáren s velkou tryskou, a tedy i velkou spotřebou materiálu.

Objekt je po dobu tisku podepřen buď sama sebou, nebo přídavnými částmi materiálu (supporty), které se odstraňují po dokončení tisku. K odstranění dochází buď mechanicky (odlamování, ofukování u práškových tiskáren) nebo chemicky (rozpuštěním podpůrného materiálu, tento materiál musí být rozpustný v jiném rozpouštědle než základní materiál).

Pro následné využití objektů je často nezbytná také povrchová úprava. Po předchozím kroku, a i kvůli samotnému principu 3D tisku nebývá povrch hladký, je tedy žádoucí povrch opracovat. K opracování povrchu lze využít více způsobů:

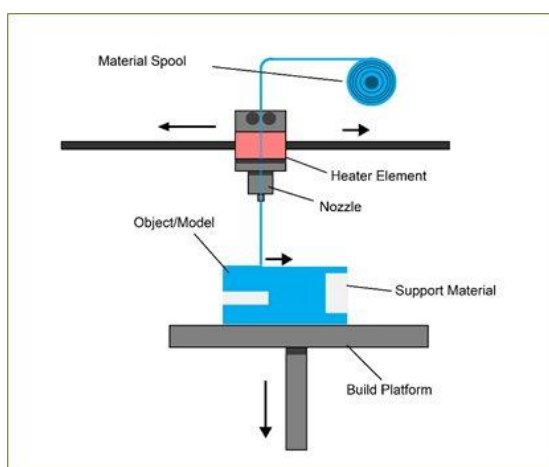
- 1.) Odebíráním tenkých vrstev materiálu pomocí brusného nástroje
- 2.) Chemická cesta, naleptání objektu přičemž dochází k slití jednotlivých vrstev a jejich vyhlazení. K tomuto opracování se využívají komory s výpary nebo lázně.

Za zmínku také stojí možnost vyhlazování vrchních vrstev již při samotném tisku, tato možnost je dostupná u FDM tisku a dochází k ní tak, že v malé vzdálenosti nad vrchní vrstvou přejíždí rozžhavená tryska dávkující pouze malé množství materiálu. Dochází tak k zaplnění malých nerovností a „vyžehlení“ celého povrchu. Tato metoda je bohužel možná pouze u ploch rovnoběžných se základní podložkou, pro vyhlazování ostatních ploch by bylo zapotřebí víceosého stroje (aby tryska mohla být vždy tečně k povrchu již vytištěného objektu). [8]

3 Metody 3D tisku

3.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

Tato metoda využívá k vytváření produktu postupné nanášení plastu rozžhavenou tryskou, materiál je do trysky přiváděn ve formě plastové struny nebo granulátu. Granulát je však použit jen u tiskáren velkých rozměrů a není běžně užíván pro svoji náročnější dávkovatelnost a manipulaci. Pro plochy tisknuté do prostoru jsou předem vytištěny oddělitelné podpory.



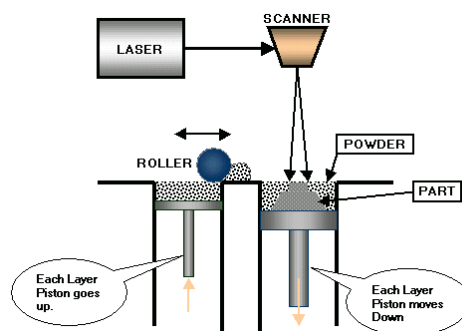
Obrázek 8: metoda tisku FDM

Klady: cena tiskáren a materiálu, open source projekty

Zápory: menší přesnost, horší kvalita povrchu

3.2 SLS (Selective Laser Sintering)

Základním materiálem pro výrobu je prášek (plast, kov, sklo a další). V případě kovů je zdrojem prášek a pojivo, které je vytvrzovaným produktem. K dalšímu zpevnění a slnutí kovových částic na finální pevnost dochází až následným procesem. Jednotlivé řezy modelu jsou vypáleny výkonným laserovým paprskem do tenké vrstvy prášku, v následujícím kroku je nahrnuta další vrstva a dochází k opakování procesu. Pro tento druh výroby není potřeba vytvářet tiskové podpory, vrstvy materiálu pod aktuálně tisknutou vrstvou působí jako přirozená podpora.



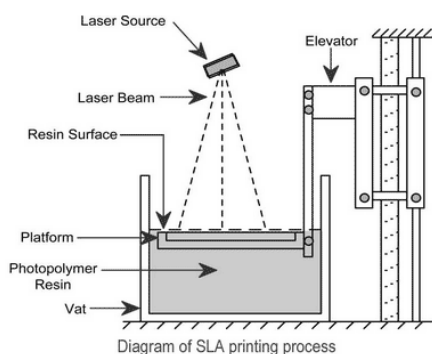
Obrázek 9: metoda tisku SLS

Klady: rozměrová přesnost, absence pevných podpor

Zápory: cena zařízení a materiálů

3.3 SLA (Stereolithography)

Pro tuto metodu je vstupním produktem tekutý polymer. K jeho zpevnování dochází vytvrzením polymeru bodovým zdrojem (laser) UV záření o konkrétní vlnové délce. Vrstva je opakovaně vykreslena, než se přechází na další. Podpory pro vrchní vrstvy jsou zde tisknuty s modelem a následně odlomeny. Po dokončení tisku je produkt dotvrzován působením UV světla o stejné vlnové délce jako při procesu tisku. Tato technologie dosahuje ze zde uvedených nejlepší kvality povrchu.



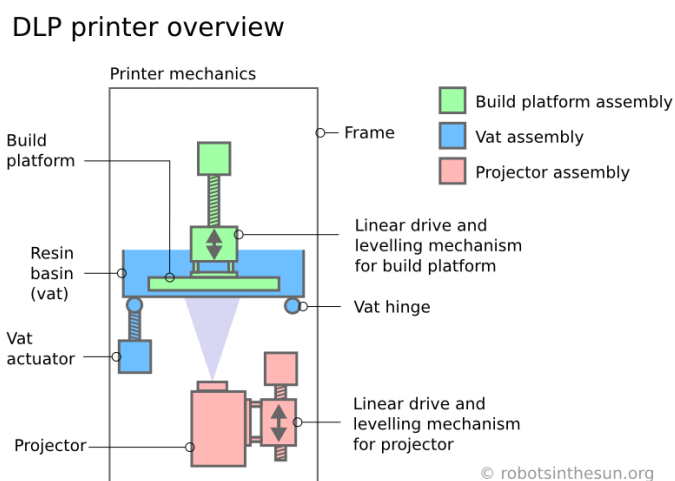
Obrázek 10: metoda tisku SLA

Klady: rozměrová přesnost, kvalita povrchu, tisk průhledných dílů

Zápory: cena zařízení a materiálů, dostupnost materiálů, obtížné zacházení s materiály

3.4 DLP (Digital Light Processing)

Technologie velmi podobná předchozí metodě, pouze s tím rozdílem, že pro vytvrzení není použit soustředěný paprsek ale plošný zdroj světla (displej, projektor) o viditelné vlnové délce. Model je vytvářen expozicí celé vrstvy najednou, je tedy lehce rychlejší než předchozí metoda a výsledné modely mají lépe přilnuté vrstvy k sobě.



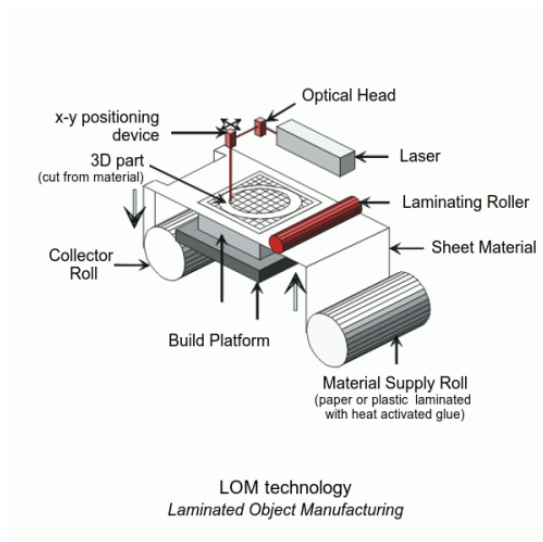
Obrázek 11: metoda tisku DLP

Klady: rozměrová přesnost, kvalita povrchu, tisk průhledných dílů, oproti SLA levnější

Zápory: cena a dostupnost materiálů, obtížné zacházení s materiály

3.5 LOM (Laminated Object Manufacturing)

Tato technologie tisku používá na vstupu materiál navinutý na roli. Jednotlivé vrstvy jsou automaticky vyříznuty a následně slepeny. Vrstvy mohou být plastové, kovové nebo papírové. U papíru je přidánou možností i barevný potisk před vyříznutím vrstev a následné získání barevného modelu.



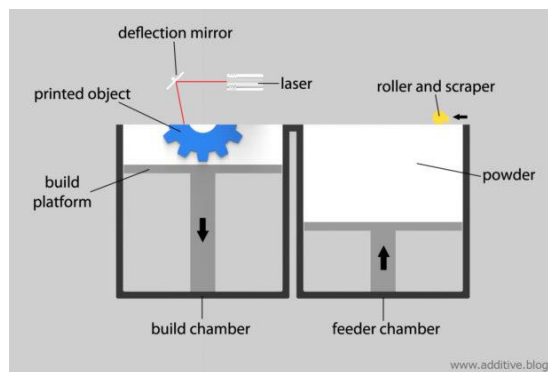
Obrázek 12: metoda tisku LOM

Klady: absence tiskových podpor

Zápory: velké množství odpadního materiálu při tisku

3.6 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Technologie příbuzná SLS, konkrétně tedy tisk kovových dílů – rozdílem mezi SLS a DMLS je rozdílný výkon bodového zdroje energie, zde je výkon dostačující pro přímé roztavení kovu.



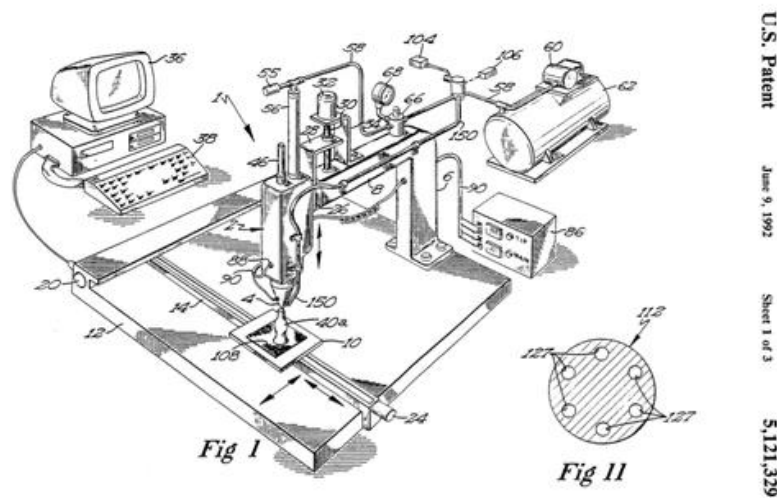
Obrázek 13: metoda tisku DMLS

Klady: absence tiskových podpor, hotový produkt z kovu bez následného procesu tvrzení

Zápory: cena zařízení a materiálů, spotřeba el. energie [9,10,11,12]

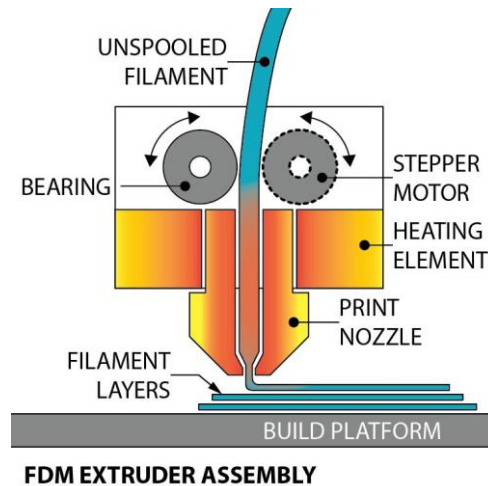
4 Metoda tisku FDM

Počátky této metody jsou již v 80 letech minulého století, navržena byla S. Scott Crumpem pod jeho vlastní firmou Stratasys. Rozšíření této technologie umožnilo až vypršení patentu v roce 2009 (a tedy i přístup k této technologii pro další společnosti a open source komunitu), zdokonalení elektroniky potřebné k ovládání a její zlevnění. [13, 14, 15, 16]



Obrázek 14: patent společnosti Stratasys

K vytváření modelu dochází nanášením materiálu za pomoci trysky o malém průměru (nejpoužívanější průměr trysky je 0.4mm), materiál je zde roztaven a nanesen vrstvu po vrstvě. Tento nanášený materiál přilne k již natištěným vrstvám pod sebou a vedle sebe. Pro zlepšení adheze vrstev a rozměrové stálosti během tisku je možnost vyhřívat tiskovou plochu, případně i uzavřenou tiskovou komoru – teplota a nutnost vyhřívání závisí na použitém materiálu a také na samotném tištěném objektu. Obecně platí, že pro tisk větších objektů je vyhřívání vhodné. [17]



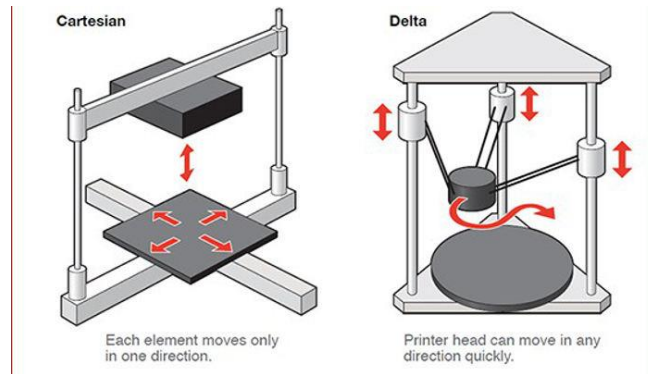
Obrázek 15: skládání objektu po vrstvách

4.1 Kinematika FDM tiskáren

Tiskárny na bázi FDM se rozdělují do několika hlavních konstrukčních řešení: kartézská, delta, polární a robotické ruky. Toto rozdělení je odvozeno od toho, jakým způsobem je skládán pohyb tiskové hlavy vůči tištěnému objektu v 3-rozměrném prostoru. [18, 19]

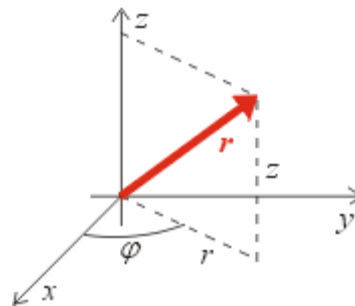
Při kartézském uspořádání tiskárny se hlava a tisková plocha pohybují v navzájem kolmých směrech X, Y, Z. Všechny tyto pohyby může vykonávat hlava, podložka anebo kombinace. Nejčastější provedení jsou takové, že tisková hlava se pohybuje ve dvou osách (Y, Z) a tisková plocha v ose třetí (X). Toto uspořádání je nevýhodné v tom, že výtisk se musí pohybovat spolu s tiskovou plochou rychle, u drobnějších a vyšších tisknutých objektů je to méně výhodné. Další častou variantou je, že se tisková hlava pohybuje v osách X, Y a tisková plocha sjíždí směrem od tiskové hlavy v ose Z. Na rozdíl od předchozího uspořádání se tisknutý objekt nemusí pohybovat rychle a toto uspořádání je tedy výhodnější pro tisk vyšších objektů. Toto provedení je dražší a to z důvodu vyššího počtu pojezdových podpor pro tiskovou hlavu.

Delta tiskárny jsou charakteristické skládáním pohybu pomocí tří kolejnic a spojovacích tyčí. Při tomto provedení tiskárny nedochází k pohybu tištěného objektu, tisková hlava se tedy může pohybovat velmi rychle. Kalibrace těchto tiskáren je složitější než v případě kartézských strojů. Výpočet (a s tím spojené i řízení) strojového kódu je složitější, tato překážka byla v minulosti hlavním důvodem menšího výskytu těchto tiskáren. V nynější době již pro dostatečně výkonné řídicí elektroniky není tato vlastnost překážkou.



Obrázek 16: rozdílné uspořádání - kartézské, delta

Předposlední možností jsou polární tiskárny, tento druh je velmi málo rozšířen. Tisková hlava je poháněna ve dvou osách: R a Z, přičemž R je vzdálenost od poloměru otáčení. Tisková podložka se otáčí (φ) a složením těchto cylindrických souřadnic je uskutečněn pohyb v prostoru.



Obrázek 17: polární souřadnicový systém

Robotické ruky, označované také jako scara, jsou nejméně častým a nejsložitějším provedením tiskárny. Pohyb tiskové hlavy (nebo tištěného objektu) je prováděn pohybem robotické ruky v prostoru. Tento způsob byl použit například pro výrobu konceptu kovového mostu. Tisk byl prováděn svářecím zařízením a nanášením kovového materiálu.



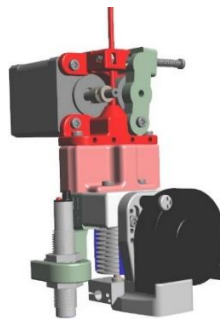
Obrázek 18: využití robotické ruky v 3D tisku

4.2 Pohon a ovládání pohonu

Bez ohledu na konstrukci a koncepci rámu tiskárny je pohon zajištěn elektromotory. V naprosté většině případů se jedná o krokové motory, důvodem jejich použití je možnost řízení pozice motoru. Pokud není použito krokového motoru, u kterého řídicí elektronika určuje polohu počítáním kroků, je nutné použití senzoru (IRC, laserové měřiče vzdálenosti atd.) pro určení aktuální polohy. V extrémních případech je užitá kombinace krokového motoru a senzoru polohy pro zlepšení přesnosti a spolehlivosti.

Z motorů je pohyb přenášen těmito způsoby:

1. Přímo, tento způsob se používá pouze pro pohon extruderu.



Obrázek 19: přímý pohon

2. Zubovým řemenem, využito na osách, které se pohybují větší rychlostí.



Obrázek 20: pohon zubovým řemenem

3. Závitovou tyčí, pro osy, které se nepohybují velkou rychlostí (převážně osa Z). Závit bývá použit trapézový, výjimkou ale není ani použití metrických závitů v hobby konstrukcích.



Obrázek 21: pohon závitovou tyčí

Pohon řemeny zde může být použit z toho důvodu, že pro tisk není potřebná vysoká tuhost konstrukce (neodebíráme zde materiál a na tiskovou hlavu nepůsobí žádné, nebo pouze velmi malé radiální síly). Pro kvalitní tisk je však nutno dodržet tuhost samotného rámu, ve kterém je zařízení uloženo – při velkých akceleracích tiskové hlavy nesmí docházet k velkému pohybu a vibracím rámu.

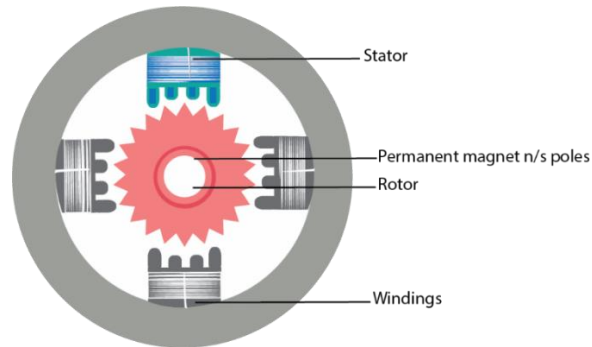
Jednotlivé osy bývají uloženy na pojezdových tyčích nebo lineárních pojezdových kolejnicích, u delta tiskáren je běžné i přímé použití hliníkových profilů v kombinaci s kolečkami (nejčastěji plastovými) pro vytvoření uložení osy. Pro zajištění hladkého pohybu jsou pojezdy vybaveny kuličkovými ložisky, v poslední době je také časté užití kluzných plastových ložisek (v komunitě 3D tisku často označováno jako „IGUS“, toto chybné označení je odvozeno od světového výrobce plastových dílů, který tato ložiska dodává).

4.2.1 Krokové motory

Krokový motor slouží k elektronickému řízení pohybu. Jedná se o vícefázový elektronicky řízený motor s možností přesného řízení polohy natočení. Rotor je realizován permanentními magnety. Natočení motoru je možno řídit po jednotlivých krocích, nejedná se tedy o dokonale plynulou regulaci. Jeden krok pro běžné krokové motory odpovídá $1,8^\circ$ natočení, pro jedno celé otočení je potřeba 200 kroků. Tento údaj je dále zlepšován „mikrokrokováním“, při kterém řídíme cívky statoru i poměrově a dochází tedy k natočení v rámci jednoho kroku. Použitím mikrokrokování se více přibližujeme k sinusovému průběhu otáčení. Údaje o poloze jsou zde relativní, tedy při počátku tisku je nutné zjistit absolutní polohu.

Výhodou krokových motorů je relativně velký krouticí moment (u menších motorů NEMA 17 řádově 0,3Nm až 0,5Nm) a možnost uzamčení polohy v jednom místě.

Pro řízení krokových motorů je zapotřebí řídicí procesor a silová spínací část. V dnešní době bývá použit 8-bitový mikroprocesor společně s driverem pro krokové motory. Procesor pouze generuje požadavky o natočení a driver převádí tyto požadavky na el. silový signál pro motor. Tyto drivery je nutno chladit a to ať už pasivně (hliníkovými chladiči na integrovaném obvodu) nebo aktivně (větráčkem). [20]



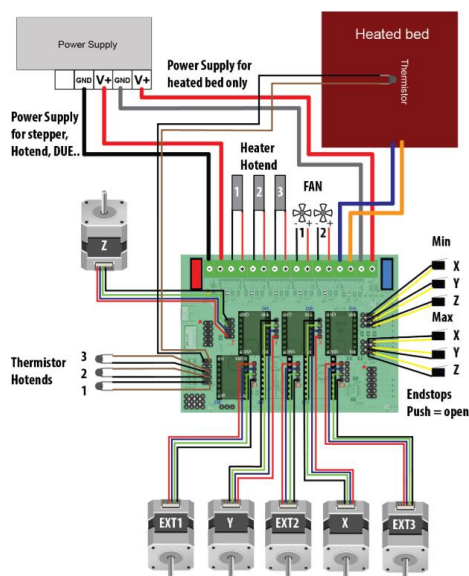
Obrázek 22: náčrt krokového motoru

4.2.2 Řídicí elektronika

Elektronika u tiskáren zajišťuje ovládání všech komponent, zdrojem pokynů pro tuto elektroniku je strojový kód. Strojový kód je ukládán do paměti tiskárny, nejčastěji ve formátu *.gcode, nebo přenášen do tiskárny přes sériové rozhraní.

Samotné řízení tiskárny se skládá z řízení teploty (tisková hlava a tisková plocha, chlazení), řízení pohybu tiskárny a v neposlední řadě dávkování materiálu.

Určení polohy při začátku tisku je realizováno koncovými spínači. Tyto spínače jsou v mechanických, optických nebo elektronických provedeních. Poloha v ose Z je často kontrolována na více bodech a následně korigována, aby tisk dobře přilnul k podložce a byl rovný. Polohy X a Y není nutno vůči tiskárně zjišťovat velmi přesně, nezáleží totiž, zda bude objekt vytištěn na přesné pozici na tiskové podložce. Přesnost v osách Z, Y je nutná pouze při navazování přerušného tisku nebo při použití více tiskových hlav, tyto vlastnosti tedy kladou vyšší nároky na tiskárnu a nejsou u levnějších hobby provedení dostupné (nebo nekvalitně implementované). [21]



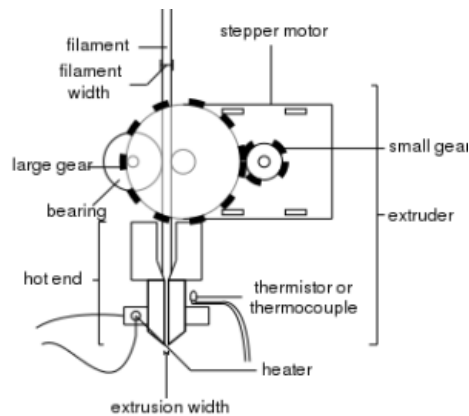
Obrázek 23: příklad zapojení řídicí elektroniky

4.3 Tiskové hlavy

Tisková hlava je část tiskárny, ve které se vstupní materiál přeměňuje na taveninu. Skládá se ze dvou částí: hot endu a extruderu. Vstupem do této tiskové hlavy je plastová struna o konstantním průměru, nejběžněji 1,75 nebo 2,90mm. Tiskárny s velkou tiskovou plochou eventuálně užívají jako vstupní surovinu přímo plastový granulát. Pro dávkování materiálu slouží krokový motor, který posouvá strunu do rozžhavené trysky. Tento motor může být umístěn přímo před tryskou nebo eventuálně na stacionárním místě tiskárny odkud poté strunu tlačí lanovodem. Pro posun materiálu je motor vybaven ozubeným kolem. Ozubené kolo se do plastové struny zakusuje a posunuje ji, pro zajištění správného přitlaku bývá tiskárna vybavena druhým hladkým kolem, to je přitlačováno pružinou. V případě použití granulátu jako vstupního materiálu obsahuje tisková hlava šnekové kolo, které granulát tlačí do trysky. Tato část je označována jako extruder. [22]

Samotná tryska je našroubována v kovovém bloku spolu s patronou zajišťující ohřívání a termistorem sledujícím teplotu. Za tímto blokem následuje tenká trubka oddělující teplou zónu od studené. Nad touto částí je chladič, který je permanentně ochlazován větráčkem. Toto oddělení je zde proto, že materiál musí být nataven pouze v krátkém úseku před tryskou. Pokud by byl nataven i výše, docházelo by k zasekávání materiálu. Toto riziko je větší u tiskových hlav s krokovým motorem přímo nad tryskou, materiál nesmí být měkký v místě, kde se do něj zakusuje ozubené kolo motoru. Nastavená teplota trysky je závislá na druhu materiálu, který je tisknut. Rozmezí této

teploty je od 180°C do 290°C. Pro označení této části tiskové hlavy je užito označení hot end.



Obrázek 24: schéma tiskové hlavy

Průměr trysek pro tisk je různý - záleží na tom, pro jakou aplikaci bude tiskárna užita. Pro tisk malých modelů s detaily se užívají trysky s malým výstupním průměrem (0,2mm). Nejběžněji používaný průměr je 0,4mm. Rozměr výstupního otvoru je omezen:

1. Výkonem ohřevné patrony
2. Silou krokového motoru na extruderu
3. Průměrem vstupní plastové struny
4. Vlastnostmi tisknutého plastu
5. Příměsí v tisknutém plastu

Největších možných průměrů trysky, jak již bylo zmíněno, dosahují tiskárny, které užívají granulátu jako vstupního materiálu. Materiálem pro výrobu trysek je mosaz, ocel, nerezová ocel a polodrahokamy (nejčastěji rubín). Polodrahokamové trysky jsou užity při tisku materiálů s příměsí (například skelná, karbonová nebo dřevěná vlákna). Tyto materiály vyžadují trysku z tvrdého materiálu, aby nedocházelo k jejímu vydírání a zvětšování průměru výstupního otvoru.



Obrázek 25: tryska s rubínovým hrotem

Dalším důležitým aspektem u tiskové hlavy je chlazení materiálu po vytlačení z trysky, materiál musí být zchlazen, aby zatuhl na místě, kde byl nanesen. Pro tento účel jsou tiskové hlavy vybaveny druhým větráčkem a tryskou, která vzduch usměrňuje na již vytištěný plast. Toto chlazení je obzvláště důležité, pokud tiskárna tiskne do vzduchu, tedy pokud pod tryskou není žádná část již vytištěného modelu nebo podložky.

4.4 Tiskové podložky

Tisková podložka je část tiskárny, na kterou se nanáší první vrstva výtisku. Tato podložka zajišťuje přilnutí materiálu k tiskárně a případně ohřev modelu během tisku. Pro výhřev podložky slouží elektrická topná tělesa realizována nejčastěji spoji na desce plošných spojů nebo výkonnými rezistory. Teploty během tisku jsou závislé na druhu tisknutého materiálu a mohou se v průběhu tisku lišit podle aktuální tisknuté vrstvy. Rozmezí teplot pro podložku se pohybuje od 45°C do 110°C. [23]



Obrázek 26: tisková podložka realizována deskou plošných spojů



Obrázek 27: tisková podložka realizována rezistory

U levnějších tiskáren tento výhřev chybí a tiskárny jsou tak omezeny pouze na některé materiály. Výhřev umožňuje tisknout materiály s vyšší tepelnou roztažností, udržuje materiál teplý a ke smrštění dochází až po ukončení tisku.

Materiálem pro tiskové podložky je například hliník, ocel, sklo, plast a u nevyhříváných tiskáren také například dřevo, MDF a další. Povrch této podložky může být hladký, nebo pro zlepšení adheze zdrsňený. Moderním provedením jsou flexibilní podložky, ty umožňují snadné sundání výtisku po jeho dokončení. Tyto flexibilní podložky jsou na samotné tiskárně přidělaný magnety nebo svorkami. U magnetů je limitujícím faktorem Curieho teplota, při níž magnet ztrácí feromagnetické vlastnosti. [24]

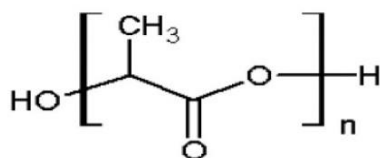
Pro zlepšení adheze se používají také lepidla, laky, papírové pásky, kaptonové pásky, povrch z PEI (Polyetherimide) a další. Výhodou použití lepidla může být například to, že některá z lepidel zlepšují adhezi pouze za tepla – po vychladnutí podložky pak model jde snadno sundat. Vytisknuté objekty je nutno sundávat po úplném vychladnutí, pokud by byli sundány ještě za tepla, mohlo by dojít k jejich zkroucení. [25]

4.5 Materiály

Pro tisk na 3D FDM tiskárně jsou využívány termoplastické materiály. Limitujícím faktorem pro tisk je hlavně teplota tání materiálu. Ta musí být nižší než teplota, které je schopný dosáhnout hotend. Druhým limitujícím faktorem pro užití materiálu pro 3D tisk je teplotní roztažnost. Pokud má materiál velkou teplotní roztažnost, dochází v průběhu tisku ke smršťování objektu pod aktuálně tisknutou vrstvou a výsledný model je nepřesný. Smrštění způsobuje i delaminaci první vrstvy od tiskové podložky, to je jeden z důvodů, proč bývá tisková podložka vyhřívána.

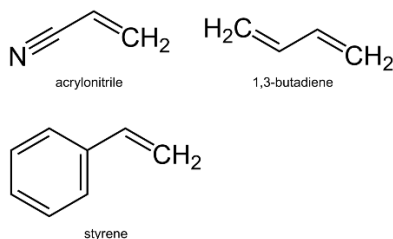
Během tisku může být použito i chemicky rozpustitelného materiálu, tento materiál slouží převážně jako tisková podpora a je po dokončení tisku rozpuštěn. Příkladem rozpustitelného materiálu může být například PVA, tento materiál je rozpustný ve vodě.

- PLA - polylactic acid
 - Teplota tisku: 210°C – 235°C
 - Biologicky rozložitelný materiál vyrobený z přírodních produktů, nejčastějším vstupním zdrojem pro jeho výrobu je kukuřice
 - Nejméně náročný materiál na tisk
 - Tisk možný i bez vyhřívání tiskové podložky



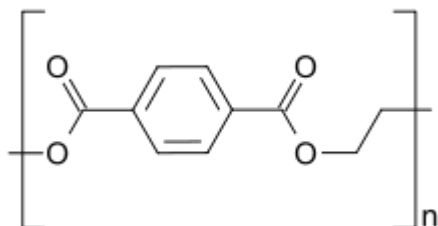
Obrázek 28: molekula PLA

- ABS – Akrylonitrilbutadienstyren
 - Teplota tisku: 230°C – 240°C
 - Materiál s poměrně vysokou teplotní roztažností (73.8 K^{-1}) – pro dosažení dobrých výsledků tisku je potřebná vyhřívaná tisková podložka, pomáhá také pokud je tiskárna uzavřena v komoře a není vystavena průvanu
 - Nízká odolnost UV záření, nevhodný pro venkovní použití
 - Při tisku uvolňuje zdraví škodlivé výpary
 - Dobrá otěruvzdornost
 - Možnost vyhlazení povrchu naleptáním pomocí výparů acetonu



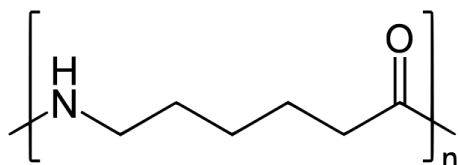
Obrázek 29: molekula ABS

- PET - Polyethylene terephthalate
 - Teplota tisku: 230°C – 250°C
 - Pro dosažení dobrých výsledků je potřeba vyhřívaná tisková podložka
 - Dobrá chemická odolnost
 - Bezpečný pro kontakt s potravinami
 - Recyklovatelný
 - Vysoká odolnost proti vlhkosti



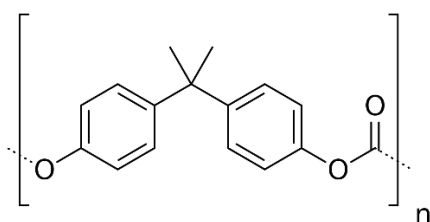
Obrázek 30: molekula PET

- Nylon
 - Teplota tisku: 240°C – 280°C
 - Pro dosažení dobrých výsledků je potřeba vyhřívaná tisková podložka
 - Dobrá chemická odolnost
 - Vhodný pro tisk
 - Houževnatý materiál
 - Nízká odolnost proti vlhkosti, nutnost sušení materiálu před tiskem



Obrázek 31: molekula Nylonu

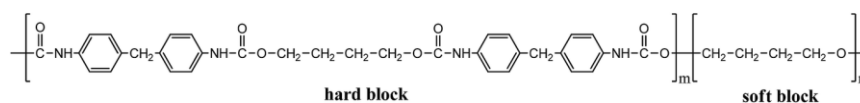
- PC – Polycarbonate
 - Teplota tisku: 250°C – 320°C
 - Pro dosažení dobrých výsledků je potřeba vyhřívaná tisková podložka
 - Nejpevnější materiál ze zde jmenovaných
 - Nízká odolnost UV záření, nevhodný pro venkovní použití
 - Povrch lze snadno brousit
 - Hůře drží na tiskové podložce, lépe se tiskne na povrch opatřený kaptonovou folií
 - Lze sterilizovat



Obrázek 32: molekula PC

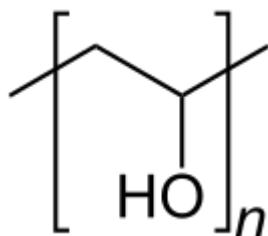
- TPU - Thermoplastic polyurethane
 - Teplota tisku: 195°C – 230°C
 - Flexibilní materiál
 - Odolný oleji
 - Těžká úprava povrchu po tisku

- Tisk měkčích materiálu je možný pouze na tiskárnách s extruderem velmi blízko hot endu



Obrázek 33: molekula TPU

- PVA - Polyvinyl alcohol
 - Teplota tisku: 190°C – 220°C
 - Materiál pro tisk rozpustitelných objektů ve vodě, vhodný pro tisk podpor, pokud tiskárna umožňuje tisk více materiálů najednou
 - Náchylný na vzdušnou vlhkost, nutno vysušit před tiskem a uchovávat v uzavřeném boxu s nízkou vlhkostí
 - Netoxický, biologicky odbouratelný



Obrázek 34: molekula PVA

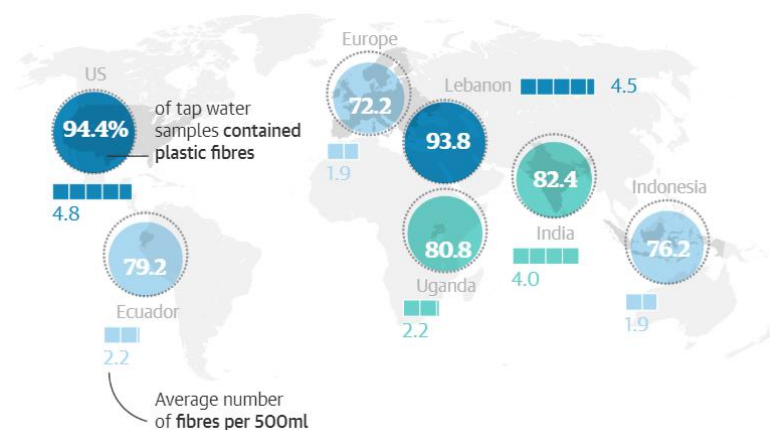
Pro 3D tisk je dostupné velké množství dalších materiálů, příkladem mohou být již zmiňované materiály s příměsí vláken (sklo, uhlík, dřevitá vlákna), směsi několika druhů plastů a další. Toto odvětví 3D tisku se velmi rychle rozšiřuje a přibývají také výrobci. Příkladem výroby filamentů pro 3D FDM tisk mohou být například české firmy Plasty Mladeč a Fillamentum, poslední zmiňovaná firma je velmi úspěšná ve světě i u nás. [26]

4.6 Zdravotní závadnost materiálů

3D FDM tiskárny jsou velmi rozšířené i mezi širší veřejností, tyto tiskárny jsou velmi často umístěny v obytných prostorech a je tedy vhodné, aby samotný tisk byl co nejméně zdraví škodlivý. Velmi často se zapomíná na zdravotní škodlivost materiálů při jejich ohřátí a produkování výparů. Z běžně dostupných materiálů je například ABS, jehož výpary jsou zdraví škodlivé, tisk by tedy měl probíhat v dobře větraných prostorech. Alternativou mohou být také uzavřené boxy s vestavěnými vzduchovými filtry. Tyto boxy mohou přispívat i ke zlepšení kvality tisku tím, že udržují lépe

konstantní teplotu a zabraňují průvanu prudce ochlazovat tisk. Další možností omezení škodlivosti výparů je také častá údržba tiskárny. Při tisku dochází k usazování plastu na vnější straně trysky a tento materiál je následně dlouhodobě vystavován vyšší teplotě a dochází k jeho přepalování, je tedy vhodné časté očištění těchto usazenin. Protože je tato technologie relativně nově rozšířenou záležitostí, dlouhodobé účinky výparů produkovaných 3D tiskárnami nejsou dokonale prozkoumány. [27]

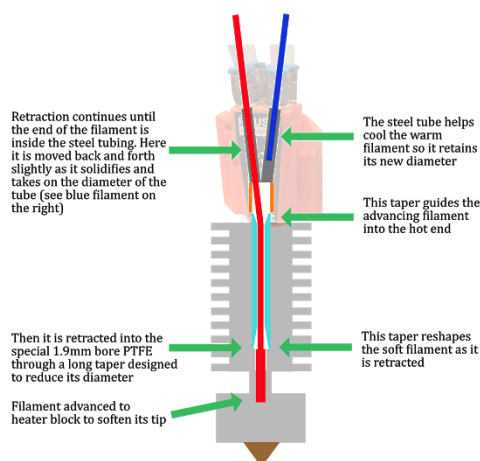
Dalším rizikem při 3D tisku je uvolňování velmi malých plastových částic. Tyto částice se usazují v prostředí a je velmi těžké je následně odfiltrovat například z pitné vody běžně užívanými metodami v čističkách pitné vody. Pro odstranění těchto částic je zapotřebí filtrů s velmi malými póry. Na tento druh znečištění jsou náchylné hlavně metody tisku SLS a další, které používají jako vstupní materiál prášek. Riziko je ovšem přítomno i u FDM 3D tiskáren.



Obrázek 35: přehled znečištění vodních zdrojů

4.7 Vícebarevný a vícemateriálový FDM tisk

Tisku více materiálů najednou je možno dosáhnout několika způsoby. Mezi nejprimitivnější způsob patří ruční výměna materiálu, v malé míře je využitelná i pro tisk více materiálů v jedné vrstvě – běžně je však používána pouze pro změnu materiálu od určité výšky tisku. Dalšími metodami je použití více trysek, více extruderů nebo použití externího zařízení, které tiskové struny napojuje před tiskárnou. Při použití jedné trysky a více extruderů dochází k vytažení předchozího materiálu a následném natlačení nového, před tryskou je několik cest, které vedou do hot endu (tento systém používá například tiskárna Prusa i3 mk3 MM). Nevýhodou použití jedné trysky je potřeba použití materiálů se stejnou teplotou tání nebo rychlá změna teploty trysky. [28,29, 30]

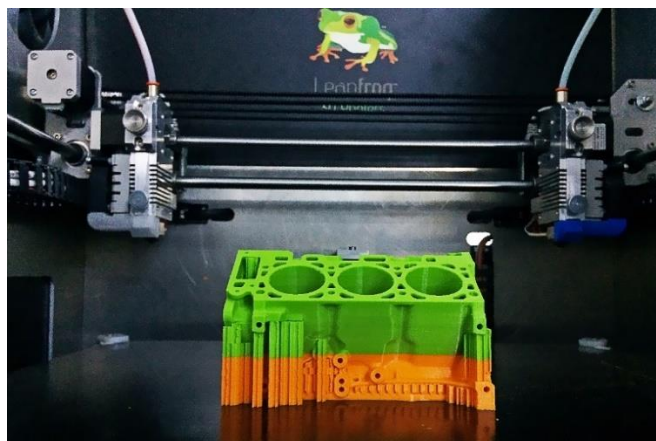


Obrázek 36: vicemateriálová tisková hlava (Prusa i3 mk3 MM)

Pokud je užito více trysek, není potřebné materiál při změně vytahovat, dochází pouze například k nadzvednutí trysky (tento systém používá například tiskárna Ultimaker 3). Další z možností je užití více plně samostatných tiskových hlav, v tomto případě je možno tisknout například i několik objektů vedle sebe. Toto provedení zrychluje tisk při snížení nákladů (není potřeba více motorů pro osu Z a jednu z os X nebo Y), přináší ale náročnější řízení tiskárny.

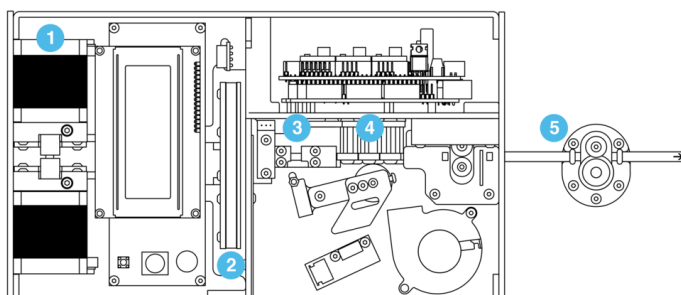


Obrázek 37: dvoutryskové provedení tiskové hlavy (Ultimaker 3)



Obrázek 38: dvě tiskové hlavy (Leapfrog)

Nejnovější technologií pro vícemateriálový 3D FDM tisk je již zmiňované použití externího zařízení pro výměnu materiálů před vstupem do tiskárny. Toto zařízení představila firma Mosaic Manufacturing pod názvem Palette. Zařízení má na vstupu několik tiskových strun, ty následně nařezává a spojuje do jedné výstupní. Při tomto druhu tisku je velmi důležitá synchronizace tiskárny a tohoto zařízení. Důležitá je také spojitelnost obou materiálů. Je nutné, aby bylo možné natavit je a spojit v jeden.



1. **Drive:** Palette+'s all-metal drive systems, inspired by those on industrial FDM machines, accurately control filament to ensure the right lengths are driven from each input.
2. **Cut:** A rotary cutter system slices filament to ensure a clean, low-resistance cut, time after time.
3. **Connect:** Palette+'s patent-pending splicing system connects filaments together end-to-end before passing them through a machined PTFE (Teflon) channel and splicing them together.
4. **Cool:** Combining both active and passive cooling systems, your newly spliced filament is re-hardened to ensure it keeps tight dimensions before being passed to your printer.
5. **Calibrate:** Our patent-pending synchronization systems continually monitor and adjust for filament usage, allowing Palette+ to modify filament lengths to ensure perfect calibration over thousands of feet.

Obrázek 39: schéma zařízení Palette

Technologie vícemateriálového tisku je použitelná například pro tisk rozpustitelných podpor, tvorbu vícebarevných výtisků a tisk objektů s funkčními částmi z jiných materiálů (například flexibilní části, vodivé části, vnitřní výztuhy z jiných materiálů). Pro tisk plnobarevných modelů na FDM tiskárnách zatím není žádná běžně dostupná technologie, omezením je pouze omezené množství vstupních materiálů do tiskárny (běžně 2 – 4 materiály). Míchání barev do bezbarvého nosiče je běžné například u SLS tisku, v tomto případě lze vytvořit téměř jakýkoliv barevný odstín.



Obrázek 40: ukázka barevných výtisků



Obrázek 41: ukázka tisku rozpustitelných podpor z materiálu PVA

Nevýhodou tisku více materiálů najednou je například větší spotřeba materiálu (nutnost tisknout objekt pro otření trysky vedle požadovaného modelu) a také ztížený tisk, pokud mají materiály rozdílnou teplotní roztažnost.

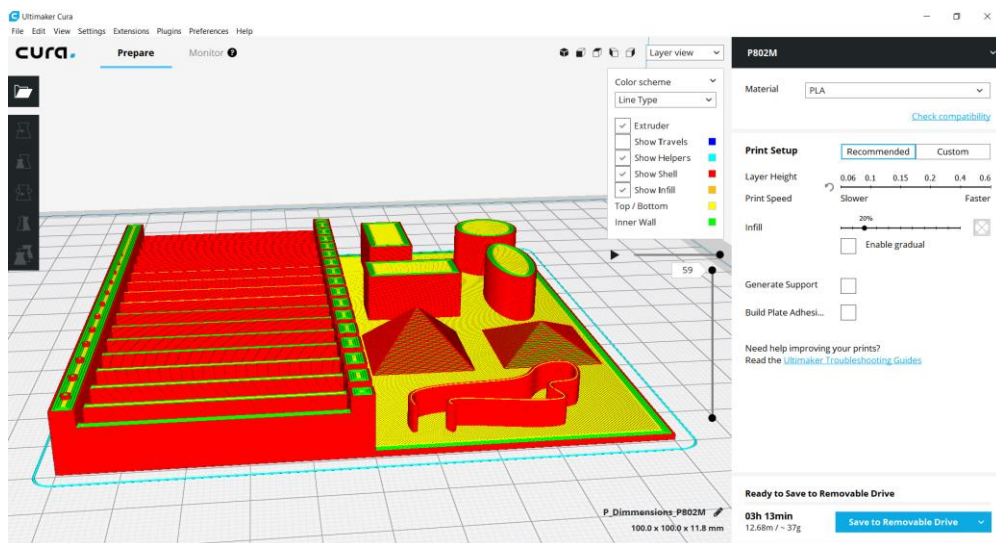
4.8 Slicovací software (CAM)

Slicovací software je posledním článkem 3D tisku, v tomto softwaru dochází k vytvoření strojového kódu rozložením výchozího modelu na jednotlivé vrstvy a naplánováním tras trysky v těchto vrstvách.

Velká část tiskáren nemá od výrobce vlastní software vytvořený přímo pro konkrétní tiskárnu, velmi často je však s tiskárnou dodáván profil pro nejběžnější slicovací software. Tiskárny jako vstupní kód používají standardizovaný G-kód. Tento kód je standardizovaný již od roku 1980 pod označením RS274D a je použit pro řízení mnoha druhů CNC strojů.

Protože je tento kód standardizovaný, pro většinu tiskáren je tedy možno použít libovolný slicer, který tento formát podporuje. Mezi nejběžněji používané slicery patří například programy Cura, Sli3er, KISSlicer, Simplify3D.

Pro dosažení kvalitního vytištěného objektu je nutné použít kvalitní slicer a také správně zvolit parametry. Volitelná je například tloušťka vrstvy, tloušťka stěn, množství výplně, rychlost tisku, pořadí tisku a mnoho dalších. Konkrétně zvolené parametry záleží na možnostech dané tiskárny a také na konkrétním tisknutém objektu. Samotnou tvorbu dráhy trysky obstarává slicer, nevolíme tedy přímo kterou část vrstvy bude tisknout nejprve – v tomto se tvorba strojového kódu značně liší od tvorby pro konvenční způsob výroby na obráběcích strojích. Po vložení modelu a nastavení všech parametrů slicovací software sám vygeneruje celý kód. [31, 32]



Obrázek 42: slicovací software Cura

5 Kvalitativní parametry tiskáren

Abychom mohli říci, která tiskárna je kvalitní, je důležité nedříve napsat, jaké požadavky jsou na tiskárnu kladeny. Mezi tyto požadavky patří například:

- 1.) Absence vůlí v konstrukci tiskárny.
- 2.) Tuhý rám, který odolá vibračním způsobenými rychlým pohybem tiskové hlavy a to především rychlou změnou směru pohybu.
- 3.) Schopnost uchládit materiál při tisku „do vzduchu“ dostatečně rychle na to, aby se vytlačený plast neprověšoval.
- 4.) Schopnost uchládit materiál při tisku velkého objemu plastu.
- 5.) Schopnost udržet tiskovou trysku dostatečně teplou během tisku.
- 6.) Schopnost řídit pohyb tiskárny v malých krocích i po složitých křivkách.
- 7.) Zajistit adhezi tištěného objektu během tisku a následně zajistit snadné sundání po dokončení tisku.

8.) Zajistit, aby tisknutý materiál neodkapával z trysky během přejezdů tiskové hlavy.

Požadavky na tiskárnu jsou také stanoveny tím, pro jaký účel bude tiskárna využívána. Pro využití v uměleckém prostředí je například kvalita pohledových ploch mnohem důležitější než dosažení přesných rozměrů dle výchozího modelu.

Výsledkem nedostatků v některém ze zmiňovaných bodů je zhoršená kvalita tisku, nebo nemožnost vytisknout některé objekty. Pro svoji specifičnost je vyhodnocení kvality tisku často subjektivní a bylo tedy potřebné vytvořit testovací tělesa pro odhalení těchto nedostatků. Je nutné zajistit, aby všechny tiskárny měly při porovnávání stejné podmínky. Pouze za stejných podmínek můžeme prohlásit, že vzniklá vada na vytištěném objektu je způsobena nedostatkem v konstrukci dané tiskárny. Pokud bychom nezajistili stejné podmínky, tak nemůžeme prohlásit, že vzniklé vady jsou způsobeny konstrukcí tiskárny. Vady tisku mohou vznikat také například nevhodným nastavením, materiálem a podobným parametrem, který ovlivňuje uživatel. Eventuálně také prostředím, ve kterém je tiskárna provozována.

Pro zajištění rovných podmínek testu je tedy potřeba:

- 1.) Provádět test v prostředí se stejnou teplotou okolí.
- 2.) Zajistit tiskárně během testu stabilní pozici, neměla by být uložena na nestabilním podloží.
- 3.) Použít stejný druh a typ materiálu, ideálně z jedné výrobní dávky.
- 4.) Použít stejné nastavení, tedy stejnou tloušťku vrstvy, rychlost a dodržet doporučené teploty tisku od výrobce materiálu. Ideálně použít profil dodávaný výrobcem tiskárny.
- 5.) Použít stejný slicovací software, pokud to tiskárna umožňuje.

Při zachování těchto podmínek můžeme tvrdit, že způsobené chyby jsou způsobeny převážně mechanickou konstrukcí tiskárny. Následnou analýzou vytištěných testovacích objektů můžeme zjistit nedostatky, kterými tiskárna trpí a pracovat na jejich nápravě. Testovací artefakty jsou také vhodné, pokud tiskárnu nemáme a zvažujeme její pořízení.

6 Návrh artefaktů

Tiskové artefakty jsou navrženy tak, aby jejich použití bylo vhodné pro jakoukoliv 3D FDM tiskárnu, jediným omezením je pouze velikost. Aby byl test proveditelný na větším množství zařízení, zvolil jsem při tvorbě testovacího artefaktu možnost tvorby několika jednotlivých objektů menších rozměrů (půdorys maximálně 100x100mm).

Pro přípravu CAD dat jsem zvolil modelovací software Autodesk Inventor 2018 Ultimate. Výsledná data jsou uložena ve formátu tohoto programu (*.ipt) a vyexportována do formátu *.stp a *.stl. Pro dosažení nejlepší možné kvality bylo při ukládání dat do formátu *.stl zvoleno velmi vysoké rozlišení.

Každý artefakt zahrnuje jeden až dva testy. Rozložení bylo vybráno tak, aby v jedné vrstvě nebylo zároveň tisknuto několik objektů s různými požadavky. Ke každému testovacímu artefaktu je vytvořen i soubor pravidel, které je nutno dodržet pro dosažení srovnatelných výsledků a také proto, aby se měly nedostatky tiskárny možnost projevit.

Součástí kvality tiskárny, obzvláště u těch pro průmyslové užití, je také kvalita dodaných základních nastavení. Tyto parametry tedy nebyly upraveny. Jedinými změnami parametry byla tloušťka tisknuté vrstvy, množství výplně uvnitř modelu a také tloušťka tisknuté skořepiny.

Pro každý test byla připravena pravidla, dle kterých můžeme testy vyhodnocovat. Tato pravidla byla aplikována na ukázkovém provedení tohoto testu na 3 různých tiskárnách.

6.1 Společná pravidla pro tisk artefaktů

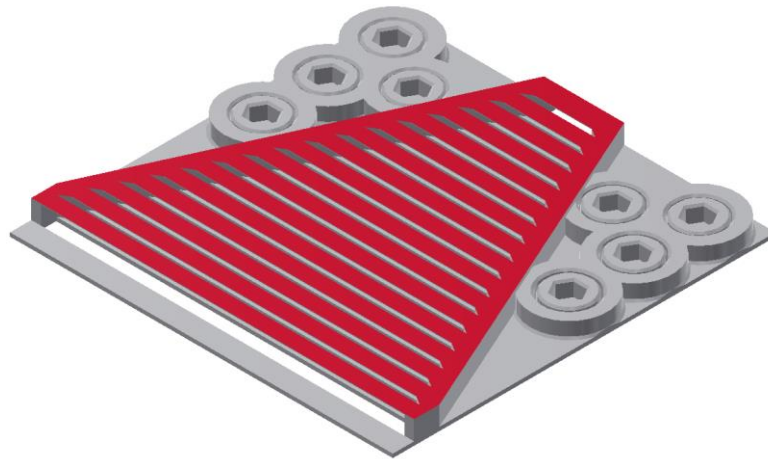
Dodržení společných pravidel pro všechny testy je velmi důležité pro dosažení kvalitních výsledků testu. Tato pravidla byla již nastíněna v kapitole popisující slicovací software. Konkrétně je to tedy použití stejného materiálu pro tisk, stejných teplot tiskové hlavy a podložky. Pro tisk těchto objektů je vhodné zvolit materiál PLA, tento materiál je snadný pro tisk – omezíme vliv vybraného materiálu na výsledky testu. Materiál PLA není citlivý na vlhkost vzduchu, nicméně pro vyloučení tohoto vlivu je vhodné materiál vysušit. Musíme si však dát pozor, abychom nepřesáhli teplotu skelného přechodu a nedošlo k jeho zdeformování před tiskem.

Všechny artefakty byly již v modelu připraveny ve správné poloze, jejich natočení je tedy nežádoucí a je vhodné, aby byly tisknuty ve středu podložky. Během tisku nepoužíváme žádné tiskové podpory a zlepšení adheze k tiskové podložce.

Uvedené parametry pro testovací artefakty jsou hodnoty určené pro užití na 3D FDM tiskárnách s průměrem tiskové trysky 0,4mm.

6.2 Artefakt 1 – přemostění a tolerance

První část tohoto testu je navržena pro porovnání kvality chlazení výtisku během tisku, konkrétně tedy rychlé chlazení tištěného plastu ve vzduchu. Jedná se o sérii mostů o stupňující se v délce. Nejkratší most má na délku 15mm, nejdelší 95mm - krok mezi délkou těchto mostů je 5mm.



Obrázek 43: část artefaktu s mosty

Za kvalitní výsledek považujeme vytištění mostu bez prověšeného materiálu, nekvalitní chlazení může způsobit také odklonění plastu během tisku nebo selhání a nevytištění mostu vůbec. Čím delší most je tiskárna schopna vytisknout bez problému, tím lépe.

Při porovnávání výsledků mezi tiskárnami hledíme na to, která těchto mostů vytiskla více. Pokud více tiskáren dosáhlo stejného počtu vytištěných mostů, rozhodujeme se dle průvěsu mostu a také podle hustoty vyplnění plastu v mostu (tedy čím méně průhledný most tím lépe).

Druhou částí testu na tomto artefaktu je test tolerance, kterou je schopna tiskárna vytisknout mezi objekty, aniž by došlo k jejich spojení. Pro tento účel jsou na objektu vytvořeny válečky se stupňující se mezerou mezi tělesem a pláštěm těchto válečků.

Rozměry mezery mezi válečky a tělesem jsou: 0,05mm; 0,1mm; 0,15mm; 0,2mm; 0,3mm; 0,4mm; 0,5mm; 0,6mm.



Obrázek 44: část artefaktu s testem tolerancí

Vyhodnocením testu je množství válečků, které budeme schopni z objektu uvolnit. Při sundávání výtisku z podložky si poznamenejme, kolik válečků zůstalo na podložce volně. V následujícím kroku si vezmeme imbusový klíč (6mm) a zasuneme jej do připravených otvorů. Otvory jsou záměrně vytvořeny s velmi těsnou tolerancí, pro zasunutí klíče je tedy vhodné užít kladivo.

Otočením klíče se snažíme válečky uvolnit, pokud dojde k vytlačení klíče v plastu a jeho následnému protočení, považujeme tento váleček jako neuvolněný. V porovnání zohledníme, která tiskárna měla více uvolněných válečků již při sundání z podložky a také množství válečků, které jsme uvolnili.

Příčinou spojení válečků a tělesa jsou například mechanické vůle v rámu tiskárny, nemožnost řízení pohybu tiskové hlavy v malých krocích nebo špatně kalibrovaný extruder který, dodává nadměrné množství materiálu. Chyba může také vzniknout při tvorbě strojového kódu, zde je však výsledek stejný u všech tiskáren při použití stejného slicovacího softwaru.

Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,2mm
- 2.) Výplň: 20%

6.3 Artefakt 2 – chlazení velkého objemu materiálu

Dalším testem v pořadí je znovu zkouška chlazení, tentokrát ovšem nejde o chlazení v krátkodobém horizontu. Při tisku velkého množství materiálu dochází k akumulaci tepla v již vytištěném objektu. Toto naakumulované teplo nadále působí na aktuálně tištěnou vrstvu a dochází k přehřívání materiálu, následkem čehož dochází k deformaci objektu. Pro tento test slouží objekt s postupně se snižující plochou vrstvy. Tím je zajištěno, že na každé následující vrstvě stráví méně času a objekt tak má méně času na zchlazení předchozích vrstev.



Obrázek 45: artefakt pro test objemového chlazení

Při vyhodnocování výsledku tohoto testu věnujeme pozornost kvalitě vytištěných vrstev. Čím výše jsou stále kvalitně vytištěné vrstvy, tím lépe. Při nedokonalém chlazení začnou vrstvy vykazovat známky deformace, bublinek nebo eventuálně i přepáleného plastu.

Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,1mm
- 2.) Výplň: 100%

6.4 Artefakt 3 – tisk převisů

Během tisku objektů je zapotřebí nejen vytisknout materiál do vzduchu ale také vytvořit stěnu, která není kolmá k tiskové podložce a odklání se směrem ven. Pokud se tryska dostane celou částí průměru mimo již vytištěný objekt a nedochází ke spojení s předchozí vrstvou, dochází k průvěsu aktuálně tištěného plastu a vzniku pohledových

vad. Tyto vady ovlivňují také vůle v rámu tiskárny. Důležitou připomínkou je, že čím nižší vrstvu tiskneme, tím většího úhlu naklonění stěny jsme schopni dosáhnout.



Obrázek 46: artefakt pro test tisku nakloněných stěn

Pro účel testu je vytvořeno těleso, jehož stěna se v pravidelných krocích (5° na 2mm výšky) více naklání. Při vyhodnocování sledujeme, u které tiskárny dochází ke kvalitnějšímu tisku ve vyšších vrstvách. Čím kvalitnější jsou horní vrstvy, tím lépe. Je také užitečné sledovat vnitřní stranu stěny, i zde může docházet k vzniku nekvalitních míst. Pro zjednodušení kontroly jsou na rovné stěně umístěny rysky, jejichž rozteč je 2mm.

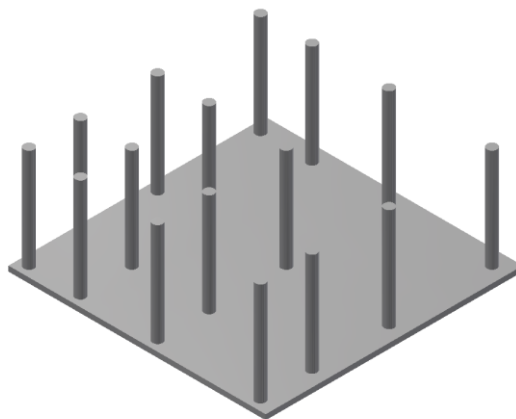
Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,2mm
- 2.) Výplň: 20%

6.5 Artefakt 4 – tvoření otřepů při tisku

Pokud tiskárna přejíždí velmi rychle mezi místy v jedné vrstvě, aniž by v těchto místech tiskla, může docházet k úniku plastu a vzniku jemných plastových otřepů. Jejich vznik je ovlivněn nastavením výrobce a geometrií trysky. Tyto plastové otřepy jsou pouze pohledovou vadou. Jejich odstranění je velmi snadné, jediným předpokladem je, že k místě jejich vzniku musíme mít přístup i po dokončení tisku (tedy z vnitřních dutin se hůře odstraňují).

Pro ověření vzniku těchto vad jsem vytvořil těleso obsahující množství menších sloupek rozmístěných v různých vzdálenostech od sebe v obou směrech X a Y. Tyto sloupky jsou vhodným předpokladem pro projevení této vady, tiskárna při jejich tisku přejíždí mezi více místy na jedné vrstvě velkou rychlostí.



Obrázek 47: artefakt pro test vzniku plastových otřepů

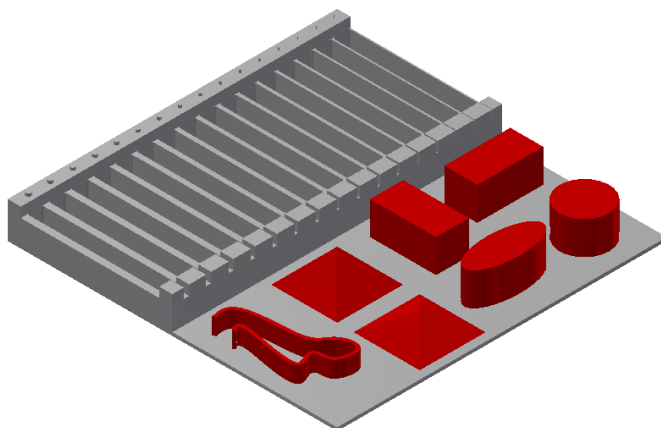
Ideálním výsledkem je artefakt vytištěný bez jakýchkoliv plastových otřepů, čím méně jich při tisku vznikne, tím lépe. Při porovnání výsledků z více tiskáren věnujeme pozornost i velikosti těchto otřepů a eventuálně množství úsilí, které je potřeba vynaložit na jejich odstranění.

Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,2mm
- 2.) Výplň: 20%

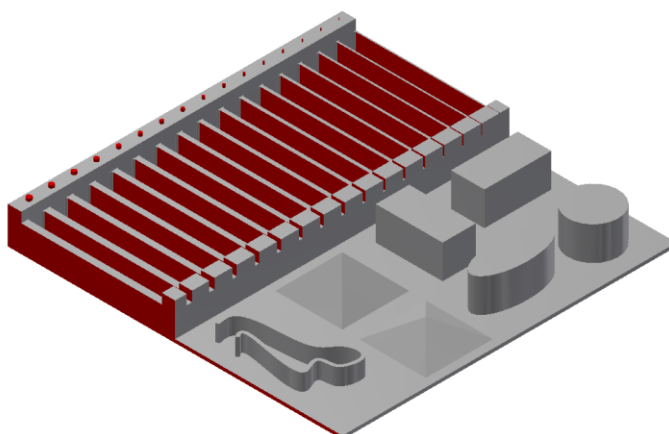
6.6 Artefakt 5 – rozměrové tolerance

Pro kontrolu rozměrových tolerancí, kterých je tiskárna schopna při tisku dosáhnout, je vytvořen tento artefakt. Na jeho povrchu jsou rozmístěny testovací kvádry, válce, elipsy a jedna křivka. Tyto objekty slouží pro kontrolu rozměrových tolerancí v osách X a Z, kvádry a válce jsou matematicky snadno popsitelné a el. řízení zvládá tyto pohyby velmi snadno ovládat. Elipsa a křivka vytvořená od ruky jsou objekty, které prověří nejen mechanickou konstrukci tiskárny ale také schopnosti ovládací elektroniky a slicovacího softwaru. Zde je zkouška slicovacího softwaru žádoucí pouze v případě, že tiskárna má pouze vlastní ovládací program a nelze do ní nahrávat programy vytvořené v jiných softwarech. Pro kontrolu přesnosti v ose Z jsou zde umístěny dva čtyřboké jehľany.



Obrázek 48: část artefaktu pro kontrolu rozměrových tolerancí v osách X a Z

Druhou částí tohoto artefaktu je série stěn a mezer o stupňující se tloušťce a série malých kolíků o stupňujícím se průměru. Tyto části ověří, zda je tiskárna schopna tisknout stěny a mezery o velikosti průměru trysky a větší, malé kolíky prověří schopnost tiskárny tisknout drobné detaily.



Obrázek 49: část artefaktu pro kontrolu schopnosti tisknout malé a tenké objekty

Pro vyhodnocení tohoto testu je nutno použít vhodné měřicí zařízení. Jmenovitě to může být využití souřadnicového měřícího stroje, laserového skeneru, tomografu, anebo také ručních měřidel. Ruční měřidla však mohou sloužit pouze k oměření základních rozměrů, tvarové plochy je ručními měřidly velmi těžké zkontrolovat. Při měření ručními měřidly musíme dbát faktu, že vytištěné objekty jsou částečně duté a i při použití mikrometru s ráčnou musíme dát pozor na deformaci materiálu.

Ideálním výstupem tohoto porovnání je barevná mapa odchylek, zde poté můžeme sledovat, v jakých částech modelu tiskárna během tisku pochybila.

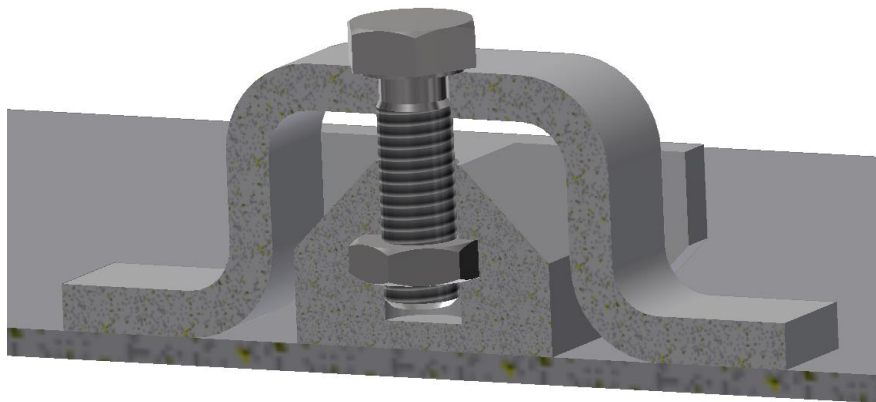
Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,2mm
- 2.) Výplň: 20%

6.7 Artefakt 6 – test adheze

Posledním testem z této série je test adheze, tento test provádíme pouze v tu chvíli, když pozorujeme problémy s adhezí tisku. Pokud výtisk po dokončení na tiskové podložce nedrží, nepovažujeme to za vadu, naopak jako velmi přínosný fakt. Tento test je vhodný také pokud zkusíme různé úpravy tiskové podložky na jedné tiskárně.

Na tiskové podložce vytiskneme testovací artefakt, během tisku je do tohoto artefaktu nutno vložit matici M8 (ČSN EN 24035), tato matice se stane bodem pro uchycení během zkoušky odtržení tělesa od tiskové podložky. Za účelem vložení matice výtisk pozastavíme ve výšce 12mm. Pokud nemáme možnost pozastavení tisku, jsou připraveny a přiloženy i stejné artefakty v jejichž blízkosti je umístěn další objekt. Tento objekt nám zajistí, že tisková hlava během tisku této vrstvy odjede do ústraní.



Obrázek 50: řez sestavou artefaktu pro test adheze

Zkoušku odtržení provádíme neprodleně po dokončení výtisku, dokud je tisková podložka stále teplá. Přiložíme železný profil dle přiložených výkresů a vložíme do něj skrz díru šroub M8x25. Tento šroub za použití ruky dotáhneme do takové míry, aby si hlava dosedla na plech. Od tohoto dotažení nadále počítáme, kolik otočení šroubu je nutno k oddělení artefaktu od podložky. Čím více, tím lépe.

U tohoto testu je nutné upozornit, že jej neprovádíme na tiskárnách vybavených skleněnou tiskovou podložkou nebo podložkou s povrchem, který bychom mohli tímto testem poškodit.

Parametry nastavení pro tento test jsou:

- 1.) Výška vrstvy: 0,2mm
- 2.) Výplň: 20%

7 Ukázka použití testovacích artefaktů

Pro porovnání těchto tří tiskáren jsem zvolil užití materiálu PLA od společnosti Plasty Mladeč. Jediná tiskárna, která tento materiál nevyužila byla tiskárna Zortrax M200, u této tiskárny nebylo možné vyměnit aktuálně používaný materiál. Všechny tyto tiskárny jsou kartézské koncepce.

Strojový kód pro tiskárny Ultimaker 3 a P802M byl vygenerován v slicovacím softwaru Cura 3.1.0. Pro tiskárnu Zortrax M 200 v programu Z-Suite, tato tiskárna neumožňuje využití jiného slicovacího softwaru.

Pro zajištění rovných podmínek byli výtisky prováděny v uzavřených místnostech bez průvanu. V slicovacím softwaru byly použity výrobcem doporučené hodnoty.

Při zjišťování výsledků testů byla použita porovnávací metoda, tedy který z vytištěných objektů vypadá nejlépe a měl nejméně vad. Pro test rozměrových tolerancí bylo použito laserové scanovací zařízení Nikon ModelMaker H120. Povrch vytištěných objektů byl pro účely této metody příliš odrazivý, jejich povrch byl tedy upraven nanesením spreje Developer D70. Po této úpravě došlo k redukci odlesků a tím ke zlepšení naměřených dat.

7.1 Ultimaker 3

Přístup k této konkrétní tiskárně mi byl s laskavým dovolením vedoucího mechanického oddělení Ing. Jiřího Hegara umožněn ve společnosti 2N Telekomunikace a.s., v níž působím jako stážista.

Tato tiskárna je zde využívána pro tisk prototypů nových produktů ještě před jejich zavedením do sériové výroby. Druhou, o poznání menší částí využití této tiskárny je zde také tisk přípravků využívaných v montážních prostorách této společnosti. Tento konkrétní kus tiskárny je zde v provozu od 9.12.2016.

7.1.1 Parametry tiskárny

Pořizovací cena	3503USD
Rozměr tiskové plochy (X, Y, Z)	215x215x200mm
Maximální teplota trysky	280°C
Maximální teplota tiskové podložky	100°C
Minimální tloušťka vrstvy	0,06mm
Udávaná přesnost os (X, Y, Z)	0,0125x0,0125x0,0025mm
Průměr použitého filamentu	2,85mm
Průměr použité trysky	0,4mm

Tabulka 1: parametry tiskárny Ultimaker 3

7.1.2 Výsledky testů



Obrázek 51: detail tisku přemostění

Při tisku přemostění došlo k úspěšnému tisku všech délek, mosty jsou pouze lehce prověšené.



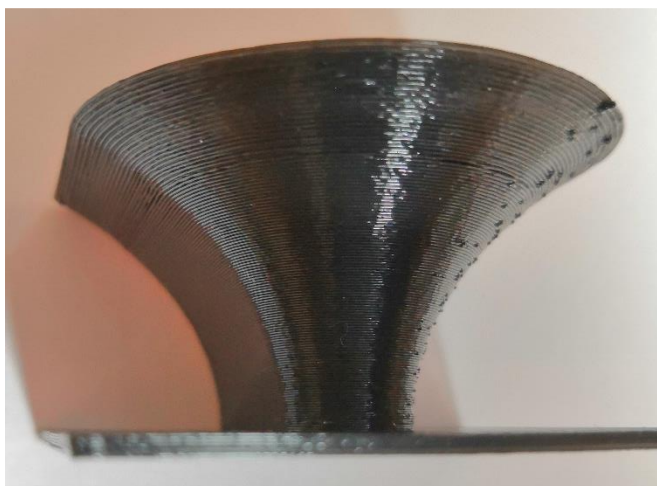
Obrázek 52: detail tisku tolerancí

Tisk tolerancí tato tiskárna zvládla velmi dobře, při sundání artefaktu z tiskárny došlo k uvolnění válečků s tolerancí 0,3mm a více, při použití imbusového klíče došlo k uvolnění válečků s tolerancí 0,15mm a více.



Obrázek 53: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení

Tisk tohoto artefaktu proběhl velmi úspěšně, deformace a lehké zvlnění je viditelné pouze na úplné špičce tohoto artefaktu.



Obrázek 54: výtisk artefaktu pro test převisů

Jediné pohledové vady na tomto výtisku vznikly při počátku tisku vrstvy. Výsledný povrch je kvalitní a celistvý.

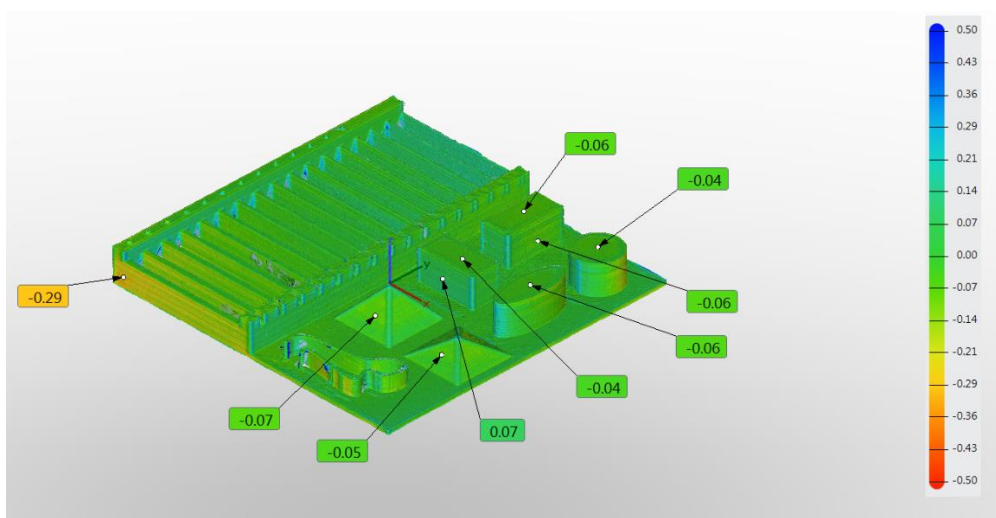


Obrázek 55: vytištěný artefakt pro test vzniku plastových otřepů

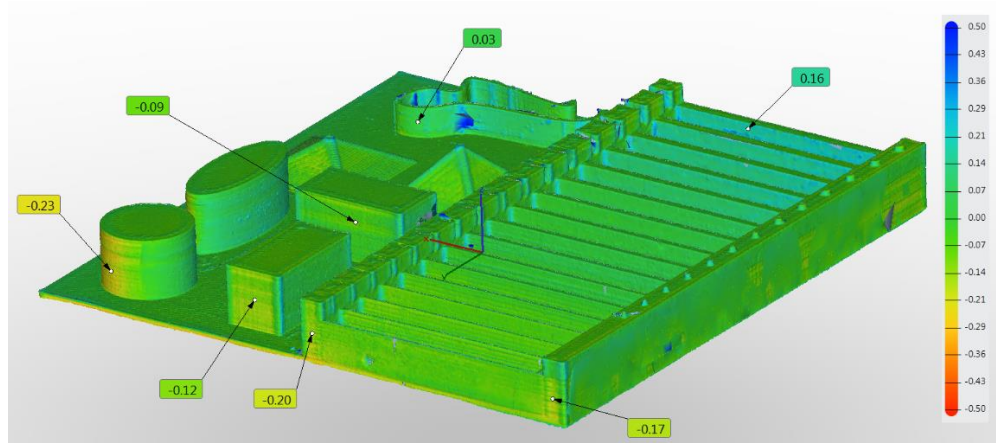
Na tomto artefaktu nedošlo k projevení žádného negativního vlivu.



Obrázek 56: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí



Obrázek 57: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1



Obrázek 58: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2

Na tomto artefaktu je viditelná pouze velmi malá deformace, došlo k vytištění všech stěn a drobné detaily se vytiskly již od válečku o průměru 0,4mm.

Během žádného z předchozích testů nebyl zaznamenán problém s adhezí, výtisky se během tisku nedeformovaly a po vychladnutí docházelo k odpadnutí od tiskové podložky.

7.2 P802M

Tato tiskárna byla pořízena jako stavebnice, tedy kvalita vytištěných artefaktů závisí i na kvalitě složení této stavebnice. V mém vlastnictví a provozu je od 24.1.2016 a slouží pro tisk uměleckých předmětů, náhradních dílů pro domácí spotřebiče a pro tisk funkčních součástí k hobby elektronice.

7.2.1 Parametry tiskárny

Pořizovací cena	190USD
Rozměr tiskové plochy (X, Y, Z)	220x220x240mm
Maximální teplota trysky	260°C
Maximální teplota tiskové podložky	90°C
Minimální tloušťka vrstvy	0,1mm
Udávaná přesnost os (X, Y, Z)	0,01x0,01x0,01mm
Průměr použitého filamentu	1,75mm
Průměr použité trysky	0,4mm

Tabulka 2: parametry tiskárny P802M

7.2.2 Výsledky testů



Obrázek 59: výtisk artefaktu pro test přemostění

Tiskárna úspěšně vytiskla všechny mosty, nejsou prověšené, avšak jejich povrch je velmi řídký.



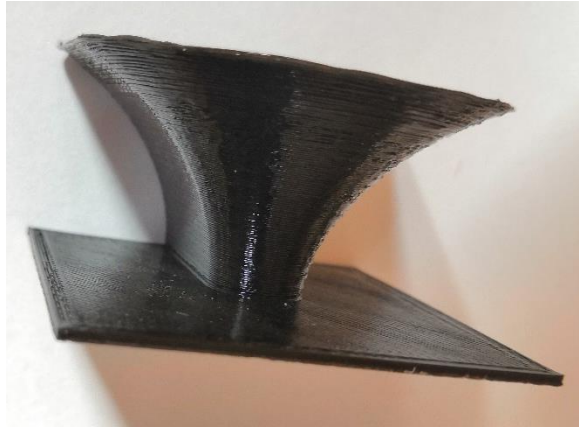
Obrázek 60: pohled na část artefaktu s testem tolerancí

Po sundání artefaktu z tiskové plochy došlo pouze k uvolnění válečků s tolerancí 0,5mm a více, imbusovým klíčem bylo možné uvolnit pouze váleček s tolerancí 0,4mm.



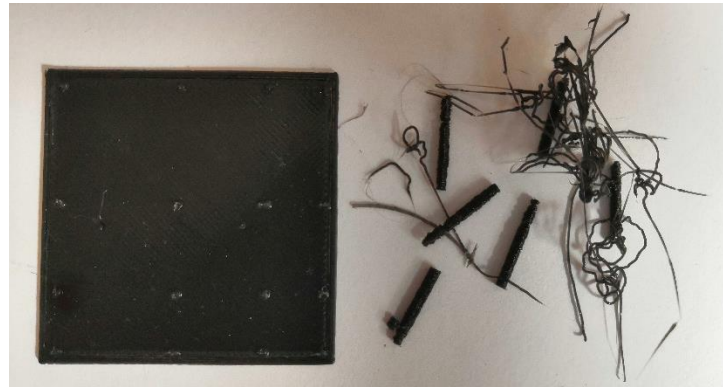
Obrázek 61: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení

Na tomto artefaktu je znatelná deformace již od spodních vrstev, špička tohoto tělesa je zdeformována velmi výrazně.



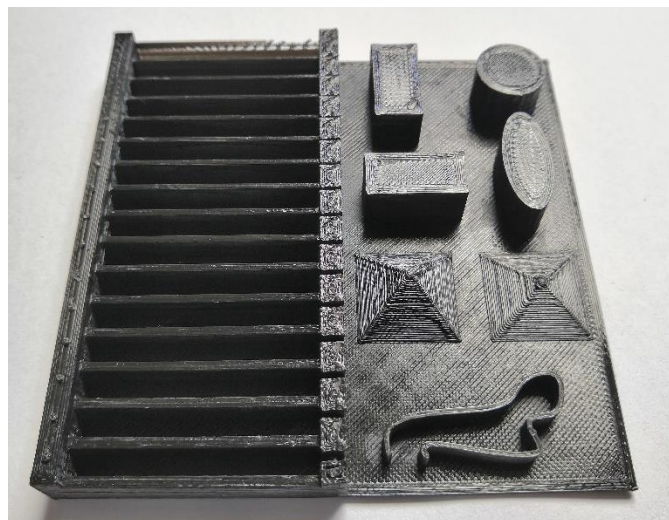
Obrázek 62: vytištěný artefakt pro test tisku převisů

Tisk převisů na tomto stroji byl úspěšný až do poslední vrstvy, na povrchu jsou znatelné propadliny a zvlnění.

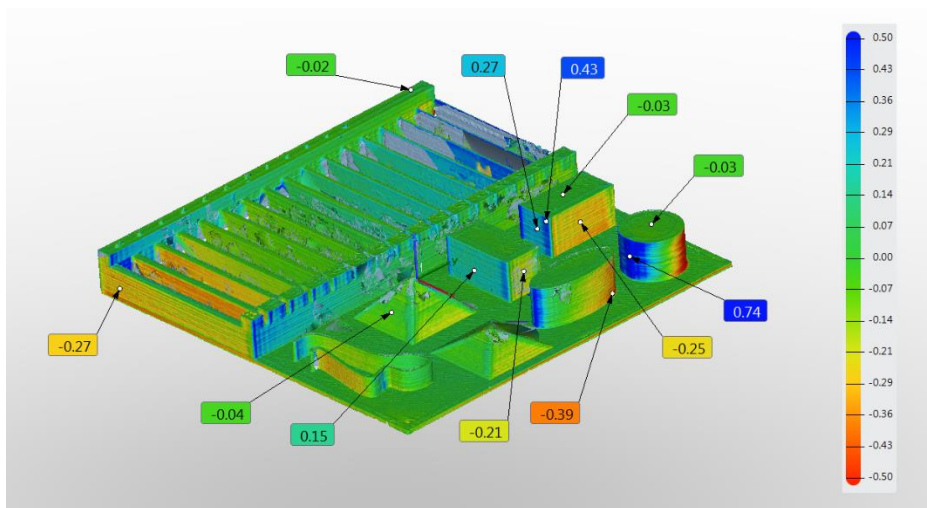


Obrázek 63: vytištěný artefakt pro vznik testu plastových otřepů

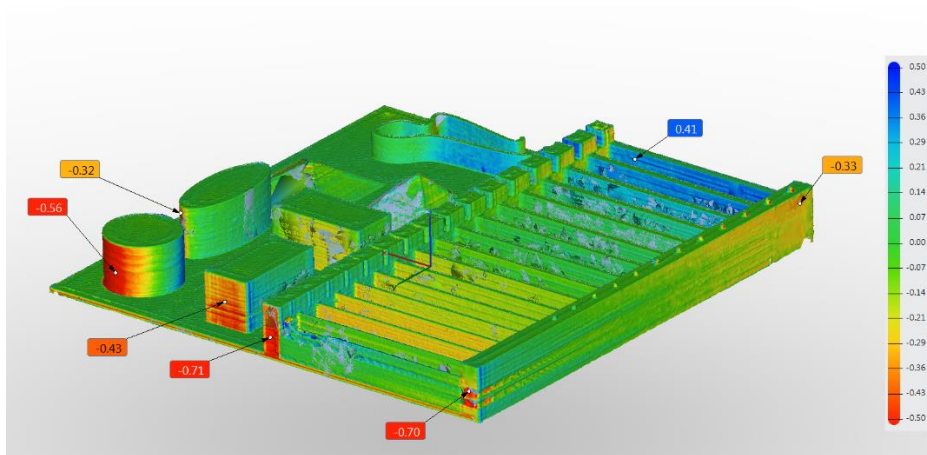
Tento výtisk skončil naprostým selháním, došlo k vzniku plastových otřepů a následnému utržení všech sloupků pohybující se tryskou.



Obrázek 64: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí



Obrázek 65: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1



Obrázek 66: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2

Při výtisku testovacího artefaktu došlo k značné deformaci v ose X, tato deformace může být způsobena špatným nastavením tiskárny. Všechny tloušťky stěn byly vytisknuty, na první se ovšem projevila vada. Tato vada by byla při výtisku reálného produktu problémem a tisk takto tenké stěny na této tiskárně není vhodný. Malé detaily byly vytištěny již od průměru válečku 0,4mm.

7.3 Zortrax M200

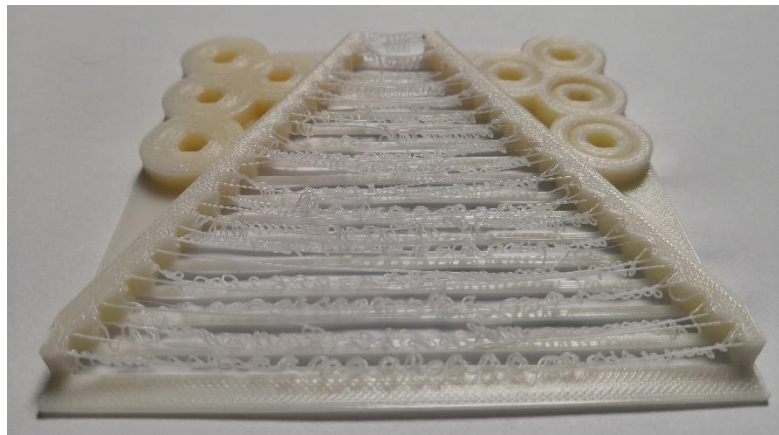
Poslední tiskárna k porovnání je ve vlastnictví školy, tato tiskárna na rozdíl od předchozích nemůže využít libovolného slicovacího softwaru a je vázána na proprietární Z-Suite. Tato tiskárna slouží pro výuku na ČVUT FS, na její chod dohlíží Ing. Jan Šimota, který zde zmiňované výtisky prováděl.

7.3.1 Parametry tiskárny

Pořizovací cena	1990USD
Rozměr tiskové plochy (X, Y, Z)	200x200x180mm
Maximální teplota trysky	290°C
Maximální teplota tiskové podložky	105°C
Minimální tloušťka vrstvy	0,09mm
Udávaná přesnost os (X, Y, Z)	0,002x0,002x0x0,002mm
Průměr použitého filamentu	1,75mm
Průměr použité trysky	0,4mm

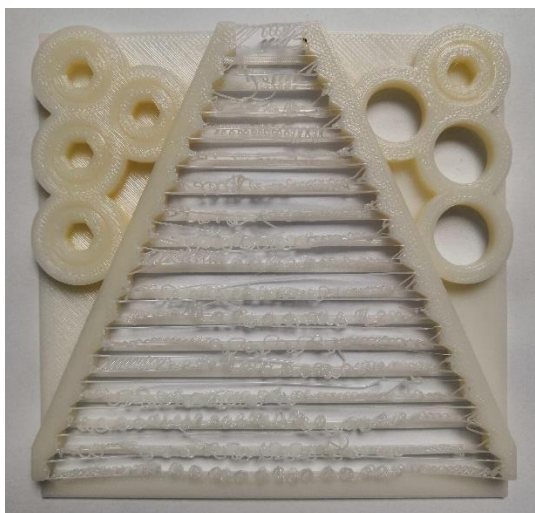
Tabulka 3: parametry tiskárny Zortrax M200,

7.3.2 Výsledky testů



Obrázek 67: výtisk artefaktu pro test přemostění

Při tisku tohoto artefaktu se projevila nemožnost využití jiného slicovacího softwaru než toho, který výrobce dodává. Tento software nebyl schopen správně vygenerovat data a tisk všech mostů skončil nezdarem.



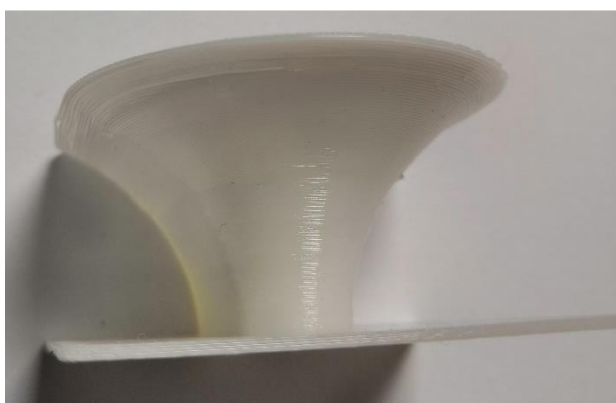
Obrázek 68: pohled na část artefaktu s testem tolerancí

Válečky s tolerancemi 0,5mm a větší byly uvolněny již při sundání z podložky, nástrojem nadále došlo k uvolnění válečku s tolerancí 0,4mm. Ostatní válečky jsou pevně spojeny s tělesem objektu.



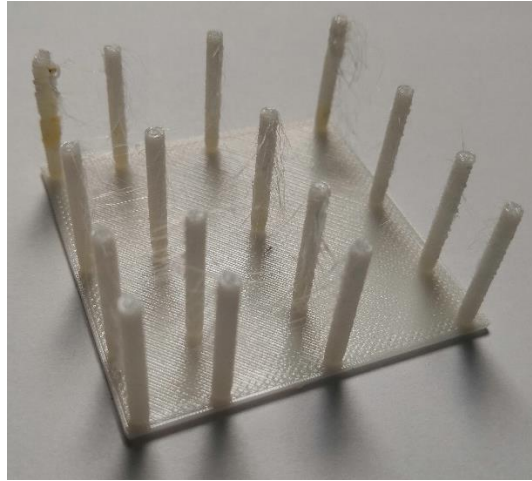
Obrázek 69: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení

Tisk artefaktu objemového chlazení proběhl úspěšně, povrch tělesa nevykazuje deformaci a špička objektu je pouze málo zdeformována.



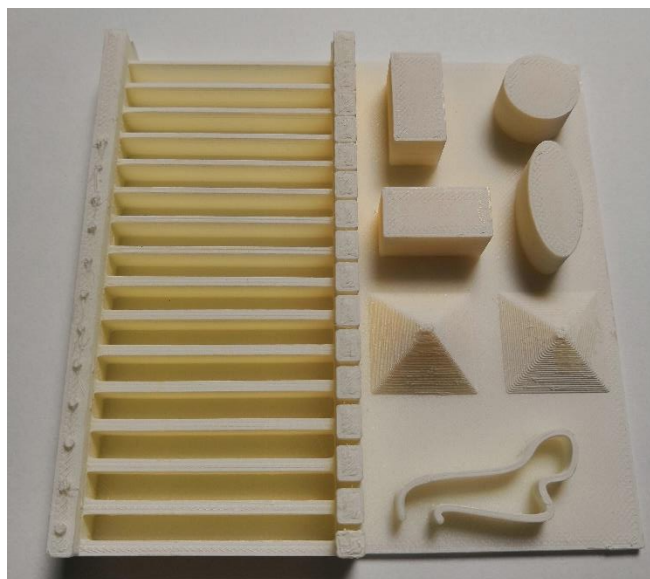
Obrázek 70: vytištěný artefakt pro test tisku převisů

Na artefaktu pro test tisku převisů je patrná vrstva, od které již další vrstvy vykazují vady. Tato vrstva je 2,2mm od vrchní strany objektu. Předchozí vrstvy mají hladký povrch a jsou bez vad.

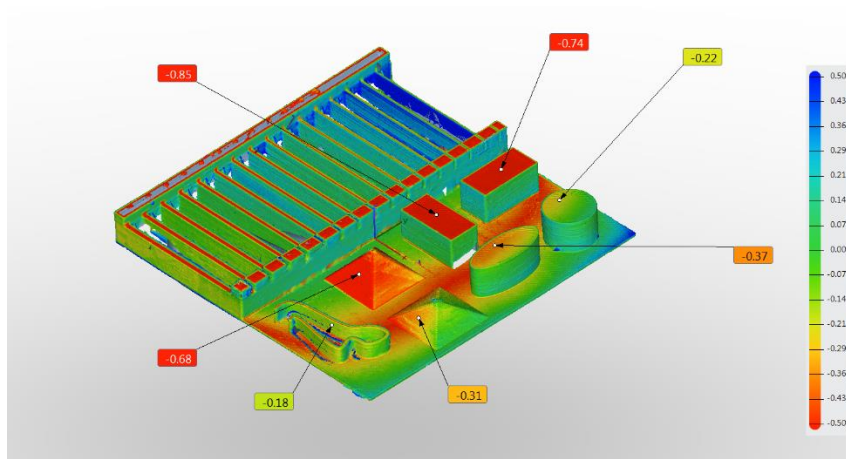


Obrázek 71: vytištěný artefakt pro vznik testu plastových otřepů

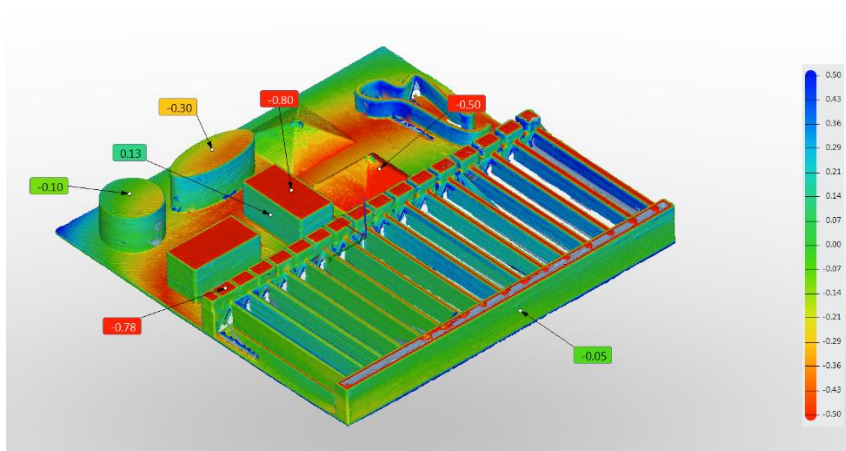
Během výtisků tohoto artefaktu došlo ke vzniku velkého množství plastových otřepů, samotný výtisk byl však dokončen a nedošlo k poškození sloupků.



Obrázek 72: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí



Obrázek 73: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1



Obrázek 74: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2

U tohoto artefaktu je znatelná deformace převážně ve střední části modelu. Toto může ukazovat například na nerovnoměrné vyhřívání tiskové podložky. Další vadou byla také absence stěny o nejmenší tloušťce. Oproti předchozím tiskárnám tato tiskárna vytiskla detail pouze od průměru válečku 0,5mm.

7.4 Vyhodnocení porovnání tiskáren

Při tisku artefaktů na těchto třech tiskárnách se projeví odlišnosti, každá z těchto tiskáren je vhodná pro jiný účel. V porovnání tisku přemostění a testu tolerancí nejlépe dopadla tiskárna Ultimaker 3, za touto tiskárnou následovala tiskárna P802M a poslední v tomto žebříčku skončila tiskárna Zortrax M200. U tiskárny Zortrax M200 se u tohoto testu projevila převážně chyba ve slicovacím softwaru, která vygenerovala nevhodné cesty tiskové hlavy.

V testu objemového chlazení znovu nejlépe obstála tiskárna Ultimaker 3, následovala tiskárna Zortrax M200 a na posledním místě skončila tiskárna P802M. Výsledky testu tisku převisů a vzniku plastových otřepů byly ve stejném pořadí jako test předchozí.

Zajímavým porovnáním bylo u těchto tří tiskáren hlavně oměření vytištěného artefaktu pro test rozměrových tolerancí. Zde na prvním místě skončila tiskárna Ultimaker 3, překvapením byla tiskárna P802M která obsadila pomyslné druhé místo. Zklamáním zde může být, že druhá nejdražší tiskárna zde obsadila poslední místo v tomto testu.

8 Závěr

V této práci se čtenář seznámí s oblastí 3D tisku. Součástí je krátký přehled historie, ukázka použití a stručný seznam technologií, které jsou v této době k dispozici. Z těchto technologií je vybrána technologie FDM, které se práce nadále věnuje. Čtenář je seznámen s konstrukcí těchto tiskáren, jejich rozdělením a jsou mu popsány jednotlivé části těchto tiskáren. Práce obsahuje také seznam nejběžněji používaných materiálů pro tuto technologii. S ohledem na jejich vlastnosti byl vybrán vhodný materiál pro užití během testování těchto tiskáren. Při jeho výběru bylo bráno v potaz, jak dobře se s tímto materiálem pracuje, a také jeho snadná dostupnost. Konkrétně se jedná o materiál PLA.

Byla také stanovena pravidla, kterých je nutno držet se, abychom získali kvalitní výsledky testu. Při jejich dodržení bude hlavní příčinou kvality tisků samotná tiskárna.

Cílem bylo vytvoření souboru testovacích artefaktů, které budou sloužit k porovnávání tiskáren. Porovnání může být užito při výběru nové tiskárny, nebo také při zlepšování jedné konkrétní tiskárny.

Pro tvorbu těchto artefaktů jsem zvolil software Autodesk Inventor Professional 2018. Modely byly vyexportovány do formátu *.stl, který je v 3D tisku hojně užíván. Výsledkem této tvorby je šest testovacích artefaktů, které mají otestovat vlastnosti 3D FDM tiskáren. Pro ověření praktičnosti těchto testů bylo provedeno porovnání tří dostupných tiskáren. Během tohoto testu se u tiskáren objevily očekávané nedostatky a mohlo tedy dojít k porovnání kvality těchto tiskáren. Pro kontrolu testu rozměrových tolerancí bylo použito profesionální laserové scanovací zařízení Nikon ModelMaker H120. Pro měření na tomto přístroji bylo nutno povrch těchto artefaktů upravit kvůli vznikajícím odleskům. Pro snížení tohoto efektu a snadnější měření by bylo vhodné objekty na tomto artefaktu posunout více od sebe. Tělesa se však podařilo oměřit a jejich oměření by bylo bezproblémové například i na souřadnicovém měřicím stroji.

Cíl práce byl splněn. Na reálném pokusu byla ověřena použitelnost těchto artefaktů. Z výsledků testů dokáže uživatel určit limity, které tiskárna má. Případné nedostatky může řešit vhodným nastavením, například užitím podpor, natočením nebo konstrukčními změnami modelu.

Seznam použité literatury

- [1] Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping [online]. In: . Liberec, 2012 [cit. 2018-06-14]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
- [2] JALOVEC, Tomáš a Marek ŽEHRA. 3D tisk pro každého?!. *Model hobby*. Praha: Dart, 2014, XIX(9), 29-30.
- [3] 3D printers comparsion. Aniwaa [online]. [cit. 2018-06-16]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/comparison/3d-printers/>
- [4] WATKIN, Hanna. ABB Robotics Uses 3D Printing for Functional Prototyping. ALL3DP [online]. 23.9.2016 [cit. 2018-06-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/functional-prototyping-abb-robotics/>
- [5] MITCHELL, Robert. 3D tisk se etabluje ve výrobní sféře. *Computerworld*. Praha: IDG Czech Republic, 2014, XXV(19), 21-24.
- [6] WALLACH KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Getting Started with 3D Printing*. San Francisco: Maker Media, 2019. ISBN 978-1-6804-5020-0.
- [7] BIEHLER, John a Bill FANE. *3D printing with Autodesk 123D: create and print 3D objects with 123D, Autocad, and Inventor*. Indianapolis, Indiana: Que, 2014. ISBN 978-0-7897-5328-1.
- [8] JANI, Matt. Introducing Cura 2.7 beta. Ultimaker [online]. 2.8.2017 [cit. 2018-06-16]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/blog/50492-introducing-cura-27-beta>
- [9] Informace o technologiích 3D tisku. *EasyCNC* [online]. Úvaly, 2010, 18.2.2010 [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [10] FAQ - vysvětlení DMLS, SLS, SLM, EBM, Laser Cusing. *Inomnia* [online]. Jaroměř, 2010 [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>
- [11] 3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP. *Formlabs* [online]. U.S.A., 2017, 5.7.2017 [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>

- [12] What is 3D printing?. *3Dprinting* [online]. [cit. 2018-07-17]. [Dostupné z: https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/](https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/)
- [13] DRAW, David a Grant GROSS. *Nastal čas pro 3D tisk?*. Computerworld. Praha: IDG Czech Republic, 2011, XXII(7), 17-18.
- [14] BENSOUSSAN, Bannah. *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today*. *Sculpteo* [online]. 2016, 14.12.2016 [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>
- [15] CRUMP, Steven Scott. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. U.S.A. US5121329A. Uděleno 30.10.1989.
- [16] *Stratasys* [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>
- [17] MENKEN, Ivanka. *3D printing: complete certification kit*. U.S.A.: The Art of Service, 2013. ISBN 9781486456451.
- [18] Typy 3D tiskáren. *Makerslab* [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [19] The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar). *3Dnatives* [online]. 2017, 15.12.2017 [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>
- [20] Základní principy krokových motorů. *E-konstruktor* [online]. 2013, 4.12.2013 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/novinka/zakladni-principy-krokovych-motoru>
- [21] List of electronics. *RepRap* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/List_of_electronics
- [22] The PartDaddy - large format delta 3D printer. *SeeMeCNC* [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.seemecnc.com/products/partdaddy-large-format-delta-3d-printer>
- [23] BOUTHILLER, Jean. *Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment*. *Boots Industries* [online]. 2016, 13.3.2016 [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/>
- [24] Curieho teplota aneb jak zrušit magnet. *FYZMATIK.píše* [online]. 2009, 3.5.2009 [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/868-curieho-teplota-aneb-jak-zrusit-magnet.html>

- [25] 4 3D Printer Bed Surface Materials for Better Adhesion!. *Pinshape* [online]. 2016, 15.6.2016 [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/4-3d-printer-bed-surface-materials-for-better-adhesion/>
- [26] FDM 3D Printing materials compared. *3D HUBS* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>
- [27] SHER, Davide. How toxic are ABS&PLA fumes?: 3dsafety.org examines VOCs. *3D Printing Industry* [online]. 2015, 28.10.2015 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/toxic-abs-pla-fumes-3dsafety-org-inquires-vocs-60796/>
- [28] DERRICO, Errica. How to Print in Multi-Color with a Single Extruder: Want to print in multi-color but only have one extruder? Fear not! With just a simple trick using MatterControl, you can print with all the colors of the rainbow. *Matterhackers* [online]. 2016, 15.1.2016 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-print-in-multi-color-with-a-single-extruder>
- [29] MILLS, Chris. This Box Turns Any 3D Printer Into A Multi-Color, Multi-Material Marvel. *Gizmodo* [online]. 2015, 21.4.2015 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://gizmodo.com/this-box-turns-any-3-d-printer-into-a-multi-color-mult-1699332022>
- [30] JOEL, Chris. Important things to know about dual extrusion in 3D printers. *3D Printers online store* [online]. 1.12.2017 [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintersonlinestore.com/important-things-to-know-about-dual-extrusion-in-3d-printers>
- [31] What is slicing software, and what does it do?. *GoPrint3D* [online]. 6.7.2016 [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>
- [32] G-code. *RepRap* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/G-code>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka užití v letectví.....	8
Obrázek 2: ukázka užití v lékařství.....	9
Obrázek 3: ukázka užití pro výrobu forem	9
Obrázek 4: ukázka užití ve výrobním procesu ABB	9
Obrázek 5: proces 3D tisku.....	10
Obrázek 6: porovnání rozdílů výroby	11
Obrázek 7: ukázka vytištěných modelů	11
Obrázek 8: metoda tisku FDM.....	13
Obrázek 9: metoda tisku SLS	14
Obrázek 10: metoda tisku SLA.....	14
Obrázek 11: metoda tisku DLP.....	15
Obrázek 12: metoda tisku LOM	16
Obrázek 13: metoda tisku DMLS	16
Obrázek 14: patent společnosti Stratasys.....	17
Obrázek 15: skládání objektu po vrstvách	18
Obrázek 16: rozdílné uspořádání - kartézské, delta	19
Obrázek 17: polární souřadnicový systém.....	19
Obrázek 18: využití robotické ruky v 3D tisku.....	19
Obrázek 19: přímý pohon	20
Obrázek 20: pohon zubovým řemenem	20
Obrázek 21: pohon závitovou tyčí	21
Obrázek 22: nákres krokového motoru.....	22
Obrázek 23: příklad zapojení řídicí elektroniky	23
Obrázek 24: schéma tiskové hlavy	24
Obrázek 25: tryska s rubínovým hrotem.....	24
Obrázek 26: tisková podložka realizována deskou plošných spojů.....	25
Obrázek 27: tisková podložka realizována rezistory	25
Obrázek 28: molekula PLA	27
Obrázek 29: molekula ABS	27
Obrázek 30: molekula PET.....	27
Obrázek 31: molekula Nylonu.....	28
Obrázek 32: molekula PC	28

Obrázek 33: molekula TPU	29
Obrázek 34: molekula PVA	29
Obrázek 35: přehled znečištění vodních zdrojů.....	30
Obrázek 36: vícemateriálová tisková hlava (Prusa i3 mk3 MM)	31
Obrázek 37: dvoutryskové provedení tiskové hlavy (Ultimaker 3).....	31
Obrázek 38: dvě tiskové hlavy (Leapfrog)	32
Obrázek 39: schéma zařízení Palette	32
Obrázek 40: ukázka barevných výtisků	33
Obrázek 41: ukázka tisku rozpustitelných podpor z materiálu PVA.....	33
Obrázek 42: slicovací software Cura	34
Obrázek 43: část artefaktu s mosty	37
Obrázek 44: část artefaktu s testem tolerancí	38
Obrázek 45: artefakt pro test objemového chlazení.....	39
Obrázek 46: artefakt pro test tisku nakloněných stěn	40
Obrázek 47: artefakt pro test vzniku plastových otřepů	41
Obrázek 48: část artefaktu pro kontrolu rozměrových tolerancí v osách X a Z	42
Obrázek 49: část artefaktu pro kontrolu schopnosti tisknout malé a tenké objekty	42
Obrázek 50: řez sestavou artefaktu pro test adheze	43
Obrázek 51: detail tisku přemostění	46
Obrázek 52: detail tisku tolerancí	47
Obrázek 53: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení.....	47
Obrázek 54: výtisk artefaktu pro test převisů	48
Obrázek 55: vytištěný artefakt pro test vzniku plastových otřepů.....	48
Obrázek 56: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí	49
Obrázek 57: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1	49
Obrázek 58: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2.....	49
Obrázek 59: výtisk artefaktu pro test přemostění	50
Obrázek 60: pohled na část artefaktu s testem tolerancí.....	51
Obrázek 61: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení.....	51
Obrázek 62: vytištěný artefakt pro test tisku převisů	52
Obrázek 63: vytištěný artefakt pro vznik testu plastových otřepů.....	52
Obrázek 64: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí	52
Obrázek 65: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1	53
Obrázek 66: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2.....	53

Obrázek 67: výtisk artefaktu pro test přemostění	54
Obrázek 68: pohled na část artefaktu s testem tolerancí.....	55
Obrázek 69: výtisk artefaktu pro test objemového chlazení.....	55
Obrázek 70: vytištěný artefakt pro test tisku převisů	55
Obrázek 71: vytištěný artefakt pro vznik testu plastových otřepů.....	56
Obrázek 72: vytištěný artefakt pro test rozměrových tolerancí	56
Obrázek 73: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 1	57
Obrázek 74: výsledná barevná mapa z laserscanningu, pohled 2.....	57

Zdroje obrázků

- Obrázek 1: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/aerospace/>
- Obrázek 2: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/dental/>
- Obrázek 3: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/mold/>
- Obrázek 4: <https://all3dp.com/functional-prototyping-abb-robotics/>
- Obrázek 5: <https://phys.org/news/2015-06-hot-world-3d-printed-platinum-thruster.html>
- Obrázek 6: <https://3dexter.com/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>
- Obrázek 7: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/29/3d-printing-materials-our-focus-on-material-simulation/>
- Obrázek 8: <https://www.tth.com/wp-content/uploads/FDM-Process.jpg>
- Obrázek 9: <http://www.arpotech.com.au/sls.htm>
- Obrázek 10: <https://www.kudo3d.com/sla-3d-printing-difference-in-laser-and-dlp-light-generation/>
- Obrázek 11: <http://robotsinthesun.org/monkeyprint-an-open-source-3d-print-software/>
- Obrázek 12: <https://scanandmake.com/additive-manufacturing>
- Obrázek 13: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/>
- Obrázek 14: <https://reprage.com/post/44316648000/why-did-reprap-pick-fdm-and-not-another-3d-printing>
- Obrázek 15: <http://www.instructables.com/id/3D-Printing-101-1-Introduction/>
- Obrázek 16: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/cartesian-3d-printer/>
- Obrázek 17: <http://fyzweb.cz/materialy/sily/sourad/sourad.php>
- Obrázek 18: <https://trendsink.com/2015/06/23/3d-printed-robotic-steel-bridge/>
- Obrázek 19: <http://doc.3dmodularsystems.com/direct-drive-extruder-assembly/>
- Obrázek 20: <http://www.sdp-si.com/Markets/Industrial-Manufacturing.php>
- Obrázek 21: <https://hackaday.com/2015/11/26/upgrading-a-3d-printer-with-a-leadscrew/>
- Obrázek 22: <https://openlabpro.com/guide/openlab-stepper-motor-hookup-guide/>
- Obrázek 23: <https://www.reprap.me/radds-v15.html>

- Obrázek 24: <http://www.3dprinterprices.net/best-3d-printer-extruder/>
- Obrázek 25: <https://www.matterhackers.com/store/printer-accessories/olsson-ruby-nozzle-175-x-040>
- Obrázek 26: <https://gulfcoast-robotics.com/products/large-size-reprap-3d-printer-heated-bed-pcb-mk2a-300x300mm-pcb-24v-360watt>
- Obrázek 27: <http://teamreprap.blogspot.com/2012/06/heating-2x2-aluminum-plate.html>
- Obrázek 28: https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-poly-lactic-acid-PLA_fig4_51832364?_sg=dpzP7Ddwv9p3DhMXdfYBzC_F3VnHhy0_yEFRCA0J_VdZJJXXeH1VQAtSt8gUJWNqdeB4mo2Y8aag8YudEPf14vA
- Obrázek 29: https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene
- Obrázek 30: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate
- Obrázek 31: https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon_6
- Obrázek 32: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>
- Obrázek 33: http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/ArticleImage/2015/RA/c5ra03984c/c5ra03984c-s1_hi-res.gif
- Obrázek 34: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol
- Obrázek 35: <https://www.theguardian.com/environment/2017/sep/06/plastic-fibres-found-tap-water-around-world-study-reveals>
- Obrázek 36: <http://www.sublimelayers.com/2017/06/first-week-with-prusa-mm-quad-extrusion.html>
- Obrázek 37: <https://dimensionalley.com/product/ultimaker3-dual-extrusion/>
- Obrázek 38: <https://www.lpfrg.com/en/benefits-of-independent-dual-extruders/>
- Obrázek 39: <https://www.mosaicmanufacturing.com/pages/technology>
- Obrázek 40: <https://3dprint.com/55323/kickstarter-diamond-hotend/>
- Obrázek 41: <https://ultimaker.com/en/products/materials/pva>

Seznam tabulek

Tabulka 1: parametry tiskárny Ultimaker 3	46
Tabulka 2: parametry tiskárny P802M	50
Tabulka 3: parametry tiskárny Zortrax M200,.....	54

Seznam příloh

Příloha 1: CAD data testovacích artefaktů

Příloha 2: Výkresová dokumentace artefaktů

Příloha 3: Výsledná data měření artefaktu 5 ze všech tří porovnávaných tiskáren