

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE
OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE**



**POVRCHOVÉ ÚPRAVY
3D TISKOVÝCH PLASTŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Autor práce: David Vlach
Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota
Praha 2020

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně a použil jsem pouze poklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Šimotovi za odborné a velkorysé vedení při tvorbě této bakalářské práce. Poděkování také patří Tomáši Kellerovi za pomoc s provedením experimentů a v poslední řadě děkuji svým blízkým za morální podporu.

Obsah

1.	ÚVOD	4
2.	STRUČNÁ HISTORIE 3D TISKU	5
3.	POJEM ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	6
A.	Využití aditivních technologií	6
4.	VÝHODY 3D TISKU	7
5.	LIMITY 3D TISKU	8
6.	DRUHY ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	9
A.	SLA (STEREOLITOGRAFIE)	9
B.	SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)	10
C.	FDM (FUSED DEPOSITION MODELLING)	10
7.	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI FDM	11
A.	ABS (AKRYLONITRIL BUTADIEN STYREN)	11
B.	ASA (AKRYLONITRIL STYREN AKRYLÁT)	12
C.	HIPS (HIGH IMPACT POLYSTYRENE)	12
D.	PC ABS (POLYCARBONATE AKRYLONITRIL BUTADIEN STYREN)	12
E.	DALŠÍ MATERIÁLY A JEHO FORMY	14
I.	PLA (POLYLACTIC ACID)	14
II.	PETG (MODIFIKOVANÝ POLYETYLÉN TEREFTALÁT GLYKOLEM)	14
8.	ZVLÁŠTNÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU	15
9.	OBECNÝ PROCES ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	17
A.	PŘÍPRAVA	17
B.	TISK	18
C.	POST-PROCESING	20
I.	BROUŠENÍ	21
II.	NANÁŠENÍ PLNIČE A BARVENÍ	21
III.	LEPENÍ DÍLU	22
IV.	VYHLAZENÍ POVRCHU POMOCÍ ACETONOVÝCH PÁR	23
10.	PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE	24
A.	ACETONOVÁ KOMORA	24
B.	POVRCH VZORKU PO FDM	26
C.	TISK A MĚŘENÍ	27
D.	VYHLAZOVÁNÍ ACETONEM	28
11.	ZÁVĚR	41
12.	SEZNAM ZDROJŮ	42
13.	SEZNAM OBRÁZKŮ	44

1. ÚVOD

V dnešní době se objevují stále nové technologie výroby, které jsou rychlejší, přesnější a také levnější. Trh s technologiemi se stále zvětšuje a zorientovat se v něm není snadné. Některá odvětví se rozvíjí rychleji než ostatní, mezi tyto technologie se řadí právě aditivní technologie (additive manufacturing) neboli 3D tisk. Tato technologie se v posledních letech stala velmi oblíbenou, a to nejen ve strojírenství. 3D tisk se stává jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví v průmyslu. Jedná se o velmi jednoduchý způsob konstrukce určité součásti bez nutnosti velké vstupní investice do zařízení. FDM tisk je dnes nejdostupnější ze všech aditivních technologií, a proto je vybrán jako metoda tisku vzorku v této práci. FDM je také nejjednodušší metodou a nejvíce výrobců se touto metodou zabývá, jelikož princip tisku spočívá pouze ve vytlačování materiálu tryskou na podložku a to lze provádět kdekoliv.

Firmy jsou dnes ochotny investovat do nákupu tiskárny, aby zrychlily svůj vývoj a také v budoucnu ušetřily nemalé množství financí za výdaje v tomto odvětví. Tisk z plastu je skvělým pomocníkem, který se pomalu stává nedílnou součástí vývoje ve většině odvětvích. V porovnání s tiskem kovu je tisk plastu levný a bezpečný, právě proto se mnoho firem zabývá jeho aplikací.

Cílem této práce je v první části shrnutí historie 3D tisku, popsání hlavních metod, strojů a materiálů 3D tisku a druhá část se zaměřuje na vhodnost konkrétní metody povrchové úpravy na navržený testovací vzorek, který je vyhlazován pomocí acetonových par a jsou stanoveny parametry pro ideální výsledky. Ideální výsledek spočívá ve vyhlazení v největším možném rozsahu, aniž by byly markantně pozměněny rozměry vzorku a nedošlo k degradaci materiálu. Tato metoda povrchové úpravy je vybrána právě proto, že její aplikace je snadná a je možné rovnoměrné zlepšení drsnosti povrchu vzorku. Nutnost povrchové úpravy při tisku plastu je většinou pouze z estetických důvodů, a proto je volena metoda, která docílí rovnoměrného zlepšení povrchových vlastností. V druhé části práce je metoda důkladně popsána a aplikována na vytištěné vzorky včetně výsledků vyhlazování pomocí acetonových par.

2. STRUČNÁ HISTORIE 3D TISKU

Jako první představitel aditivních technologií neboli 3D tisku by se dal považovat vynález první inkoustové tiskárny v roce 1976, jedná se zde totiž také o přidávání vrstvy na papír, i když to má k dnešnímu 3D tisku poměrně daleko. [1]

Dalším významným milníkem byl vynález stereolitografie a prvního prototypu stroje Chuckem Hullem roku 1984. Dva roky poté si nechal stereolitografii patentovat tzn. v roce 1986. Chuck Hull založil firmu 3Dsystems a koncem 90. let vytvořil první komerční zařízení tisknoucí ve 3D formátu, v této době ještě nebyl znám pojem 3D tiskárna. Jeho zařízení neslo název SLA – 1 a pracovalo s technologií vytvrzování fotopolymerů UV laserem (stereolitografie). SLA – 1 byl k dispozici pouze vybraným zákazníkům a postupně byl vylepšován dokud nebyl představen model SLA – 250, který již byl nabídnut široké veřejnosti. StereoLithography Apparatus SLA-1 je doposud k vidění ve Fordově muzeu v Dearborn, Michigan. [2]

V roce 2002 se podařilo vytvořit miniaturní ledvina, která filtrovala krev a produkovala moč. Tato ledvina byla ozkoušena na zvířeti. [3]

Roku 2006 bylo vytvořeno první zařízení pracující na principu Selective laser sintering (SLS) a také první zařízení, které bylo schopné zároveň pracovat s více materiály [3]

Roku 2008 začala první osoba používající protézu kompletně vyrobenou pomocí aditivních technologií [3]

V roce 2010 bylo navrženo a vyrobeno první letadlo.

Bylo také vyrobeno auto s maximálním použitím aditivních technologií, při kterém bylo vytištěno téměř 500 Kg materiálu z plastu ABS. Aditivní technologie byly využity všude, kromě motorových a podvozkových částí. Proběhl také první tisk ze zlata a stříbra [2]

Koncem roku 2014 došlo k vypršení platnosti patentu stereolitografie a tím k otevření této technologie pro volný trh.

3. POJEM ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Pojem aditivní technologie je nejbližší a nejpřesnější termín, kterým nazýváme 3D tisk. V minulosti jsme proces nazývali Rapid Prototyping a dnes je nejvíce používaný termín 3D tisk. Pod názvem Rapid Prototyping (RP) si představujeme velmi rychlý vývoj součásti stroje nebo celý díl, který se nazývá prototypem. Pod tímto pojmem si můžeme představit vizi dané součásti, která se v budoucnu může změnit a jejíž základ bude nejspíše použit při finální konstrukci součásti. Vzhledem k tomu, že většina dílů, vyrobená pomocí RP, jsou funkční součásti a nejedná se tedy o prototypy, není již vhodné používat pojem Rapid Prototyping. Z tohoto důvodu se nyní používá pojem aditivní technologie. Pojem „aditivní technologie“ (AT) v sobě také skrývá základní princip této technologie – slovo „aditivní“, které vystihuje tuto technologii nejlépe, protože na rozdíl od běžných ubíracích technologií u AT materiál přidáváme. [4]

Princip aditivních technologií spočívá v postupném kladení vrstev materiálu, přičemž každá vrstva odpovídá jednomu vodorovnému řezu o výšce dané vrstvy zkonstruovaného 3D modelu. Touto metodou lze vyrábět hotové díly bez použití dalších technologií, což velice šetří čas i peníze. Existují i jiné druhy aditivních technologií, o kterých bude psáno dále v práci. Vhodnost použití aditivních technologií neboli 3D tisku je zcela závislé na dostupnosti 3D tiskáren a konkrétním díle, který chceme vytvořit. [4]

3.1. Využití aditivních technologií

Aditivní technologie byly z počátku vyvinuty pouze za jedním účelem – rychlá výroba prototypu, kterou bylo možno fyzicky vyzkoušet a ukázat světu (rapid prototyping). Reálné modely jsou názornější než virtuální modely a díky aditivním technologiím je možné v plném rozsahu pochopit myšlenku, se kterou konstruktér model vymýšlel. Tisk modelu je velmi rychlý a jednoduchý proces, ve kterém je možné téměř okamžitě zjistit, zda model splňuje svou funkci nebo bude potřeba díl upravit. Díky dnešním technologiím 3D tisku je možné vyrobit díl, který je z plastu nebo dokonce z různých kovů, keramiky či kompozitu. [4]

Tato práce se zabývá pouze 3D tiskem plastů a následným post-procesingem. Pod pojmem „post-procesing“ si představujeme povrchovou úpravu, která je většinou nutná po tisku. Může se jednat o odstranění podpor, broušení nebo jinou úpravu povrchu k zajištění chtěného výsledku. [5]

4. VÝHODY 3D TISKU

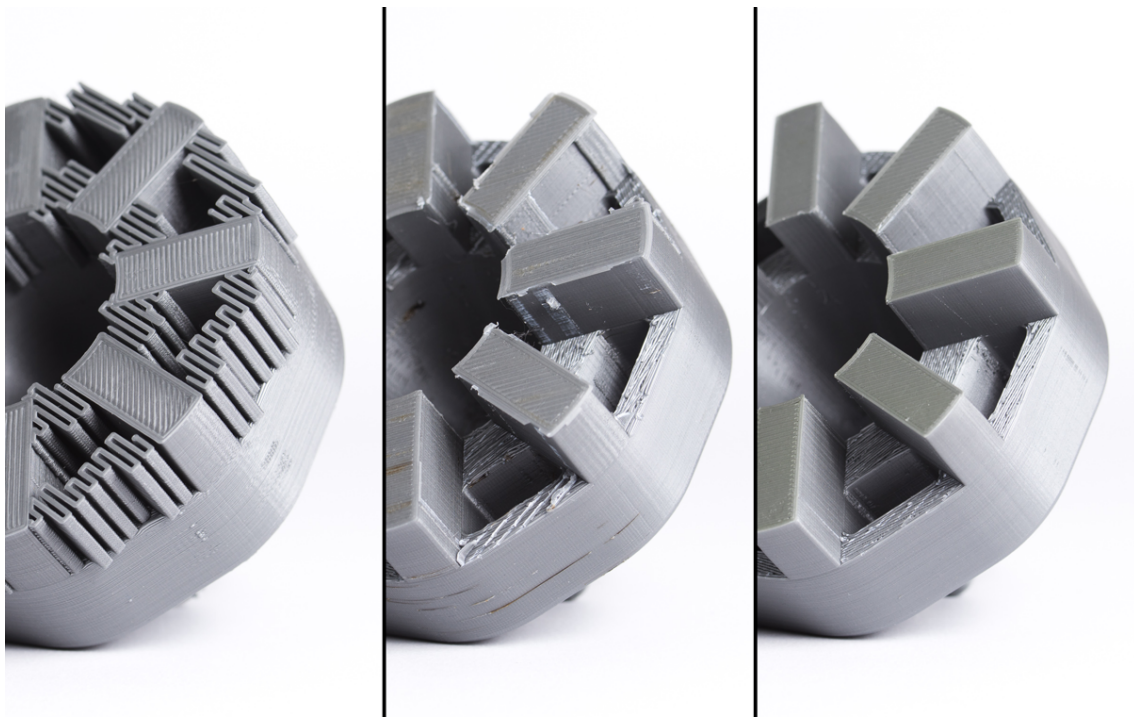
Mezi hlavní výhody 3D tisku je nutné zmínit téměř neomezenou tvarovou rozmanitost za stejnou nebo často i menší cenu v porovnání s běžnou ubírací metodou. Oproti běžnému obrábění není 3D tisk omezen napříkladem nutností upínání součástí nebo velikostí nástroje a při tom je spotřebován pouze materiál, který je nutný na stavbu součásti. Další velkou ekonomickou výhodou je nízká vstupní investice, záleží na využití a materiálu, ze kterého se tiskne. Nejjednodušší FDM tiskárny se dnes pohybují mezi 5-10 tisíci korunami. Do nákladů je nutné zahrnout materiál, který bude použit (400 až 2000 Kč za kilogram materiálu). Mezi další výhody patří možnost velmi jednoduché úpravy a produkci každého dílu, rychlý vývoj ideální součásti a v poslední řadě stojí za zmínění i velká materiálová komplexnost, která poskytuje možnost výběru nejvhodnějšího materiálu. Hlavní parametry při výběru materiálu jsou pevnost, teplotní odolnost, stálost materiálu nebo houževnatost. [5]



Obrázek 1 - Možnosti 3D tisku [27]

5. LIMITY 3D TISKU

3D tisk, stejně jako každá technologie, má své limity. Největší a nejdůležitější nedostatek 3D tisku FDM metodou patří nedokonalá materiálová celistvost, která je způsobená postupným kladením vrstev. Tento jev může způsobovat snížení pevnosti dílu o 10–50 % a s tímto omezením se při konstrukci musí počítat. Je také nutné předem určit v jaké poloze bude součást tisknuta, zmíněné parametry mohou velmi snížit dopady zmíněných nedostatků aditivních technologií. Dalším limitem je bezesporu vyšší cena při velké produkci dílu, každý díl se vyrábí vrstvou po vrstvě, což snižuje efektivitu výroby s rostoucím objemem. Přesnost a tolerance 3D tisku pomocí FDM záleží na správném seřízení a konstrukci tiskárny. FDM tiskárny mají nejmenší přesnost v porovnání s ostatními metodami tisku plastu, pohybuje se okolo 0,5mm na všech třech osách. Český výrobce tiskárny PRUSA MK3 dokonce udává 0,1mm na ose Z a 0,3 na ose X a Y. [10] Z praxe ale víme, že přesnost se snižuje s velikostí dílu. Poslední zápor 3D tisku je nutnost odstranění podpor, které jsou tvořeny pod převisy dílu, protože tiskárna nemůže stavět do vzduchu. Podpory zanechávají nekvalitní povrch, a proto je mnohdy nutné další post-procesing jako například aplikace acetonových par, broušení nebo lakování dílu. [6]

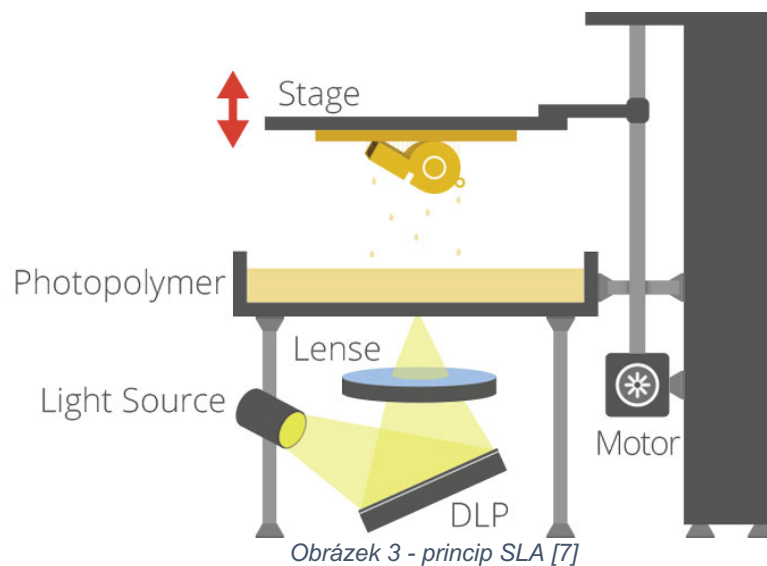


Obrázek 2 - Odstranění podpor [6]

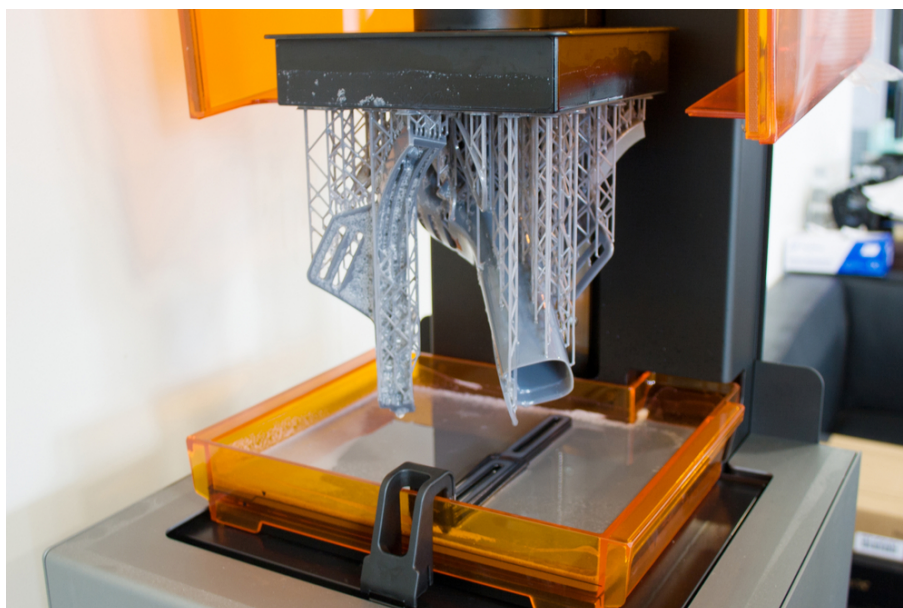
6. DRUHY ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

6.1. SLA (Stereolitografie)

Metoda SLA je považována za první a nejstarší metodu 3D tisku. Princip SLA je založený na laseru a fotopolymerové pryskyřici. SLA je považována za nejpřesnější metodu 3D tisku, teoretická přesnost dílu by měla odpovídat velikosti molekuly polymeru. Fotopolymer je velmi přesně vytvrzován pomocí laseru v nádobě s pryskyřicí. Nádoba je posunuta pod hladinu (v ose Z) a laser vytvrdí další vrstvu v potřebném místě, tento proces se opakuje do vytvrzení celého dílu. [7]



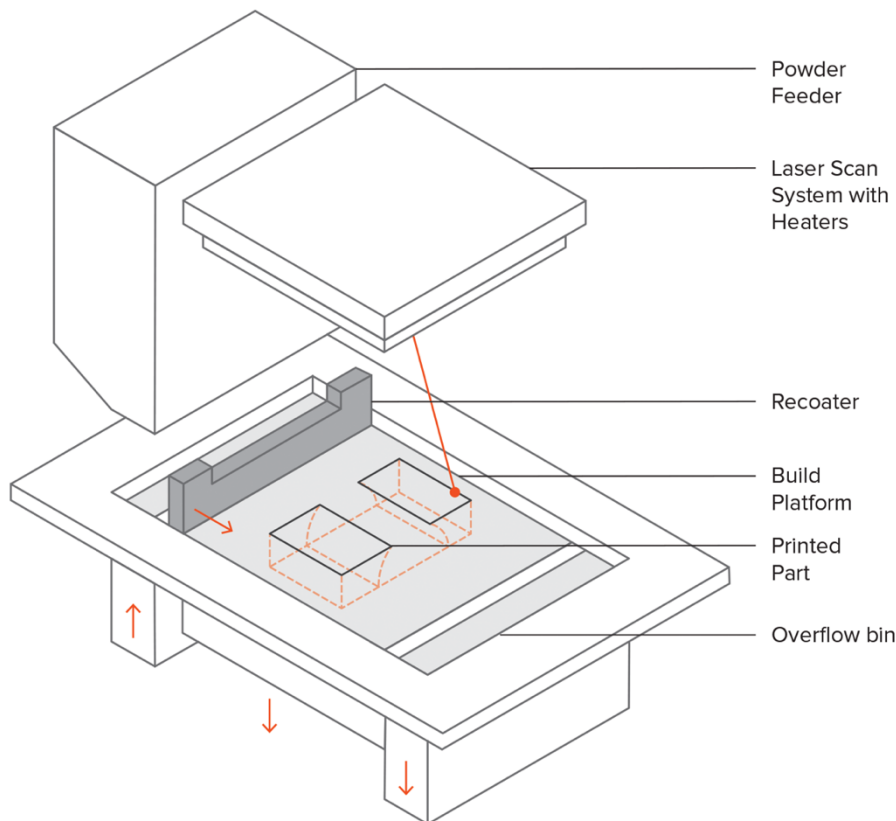
U této metody je nutné používat podpory u převisů dílu a ty po tisku většinou vyžadují ruční odstranění. Existují dva způsoby stereolitografie, jeden je s platformou posunující se nahoru a druhý se posouvá dolů. Po tisku může následovat celkové vytvrzení dílů v peci, aby se zvětšila odolnost a trvanlivost. [7]



6.2. SLS (selective laser sintering)

SLS je metodou, která používá vysokoteplotní laser ke spečení prášku dohromady po velmi tenkých vrstvách. Po vytvoření dané vrstvy v prášku se posune stavební podložka dolů (nebo nahoru) a mechanismus nahrne novou vrstvu a vypálí se vrstva další. Tento proces se opakuje, dokud se model nevytiskne celý. Tiskárny jsou vždy zakrytované, protože při tisku je nutná ochranná atmosféra a prášek obsahuje tak malé součásti kovu, že je to pro člověka nebezpečné. Dostupné systémy SLS jsou schopny tisku součástí o velikosti 500 μm a větší. Často se používají dva rozdílně výkonné lasery pro větší spékání vnitřních a vnější vrstev. [8]

Díly vytvořené pomocí SLS nemají velké vnitřní pnutí a jsou tedy rovnou použitelné jako funkční díly nebo prototypy. Pokud je vyžadována větší tvrdost, následuje po tisku vhodná tepelná úprava. Díky spékání vrstev není nutné používat podpory, které vyžadují následné odstranění. Tato technologie je vhodná pro malé a středně velké množství výtisků. Povrch bývá zrnitý a pokud je požadován hladký povrch, musí díl projít povrchovou úpravou. [9]

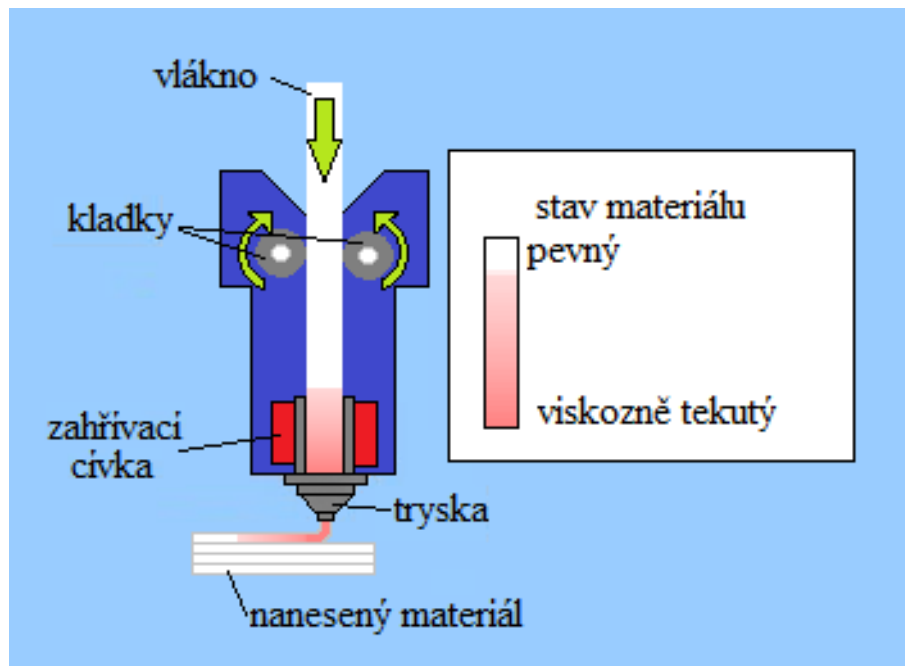


Obrázek 5 - princip SLS [8]

6.3. FDM (fused deposition modelling)

Technologie FDM je nejznámější a nejrozšířenější metodou 3D tisku na světě. Zkratka pro název FDM byla chráněna patentem firmy Stratasys, která tuto metodu vyvinula. Princip FDM spočívá ve vytlačování roztavené plastové struny tryskou, která nanáší materiál na podložku a postupně ho na sebe vrství. U této technologie nutné tisknout spolu s výtiskem i podpory, které slouží jako stavební podklad u převislých částí. Podpurné struktury je možné odlomit nebo rozpustit, když jsou vyrobeny z jiného

materiálu než zbytek součástí, což umožňují tiskárny, které podporují tisk dvou různých materiálů najednou. Tato technologie je rychlá a uživatelsky velmi jednoduchá. [3] Využití FDM tiskárny nacházejí v kancelářích, domácích dílnách ale i například ve vývoji firem. Problémem FDM tisku mohou být mezery mezi vrstvami nebo nedostatečná přilnavost k podložce. Je důležité dbát na čistotu prostředí, údržbu tiskárny a také následný post-processing, který může vzniklé nedokonalosti výtisku vyřešit. [4]



Obrázek 6 - princip FDM [10]

7. MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI FDM

Vzhledem k tomu, že se v této práci věnuji hlavně FDM tisku, bude v této kapitole popsáno několik hlavních a mnou použitých materiálů, ze kterých je vytisknut testovaný vzorek. Tyto materiály obsahují styren, podle písmena S v jejich názvu, který reaguje s acetonovými parami, a proto dochází k vyhlazení, které je sledováno v druhé části práce. Velikost a doba vyhlazování je závislá na obsahu styrenu v materiálu, čím více styrenu je obsaženo v materiálu, tím rychleji změna nastává.

7.1. ABS (Akrylonitril butadien styren)

ABS je termoplast, který se hojně využíval při tisku metodou FDM a dokonce se využívá k výrobě například LEGO kostiček. ABS je možné opakovaně roztavit a krystalizovat, aniž by došlo ke znehodnocení materiálu. Teplotní odolnost má ABS až 98 °C a díky kaučuku je také odolnější proti opotřebení a nárazům. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi pevný a houževnatý materiál, který bohužel podléhá vnějším podmínkám a díky UV záření degraduje, má ABS už dnes nástupce jako například ASA. Polybutadien obsažený v ABS stimuluje oxidaci polystyrenu a materiál vystavený vnějším podmínkám degraduje, přichází o svou barvu a mechanické vlastnosti. ABS je nevhodné pro tisk v místnosti, kde je průvan hlavně díky jeho velké smrštitivosti, tudíž se ABS materiál na tisk velkých dílů nehodí. Na druhou stranu je ABS díky velkému

množství styrenu vhodný k vyhlazení pomocí acetonu, což budeme testovat v acetonové pračce v druhé části této práce. [12] [11] [13]



Obrázek 7 - druhy post-procesingu [13]

7.2. ASA (akrylonitril styren akrylát)

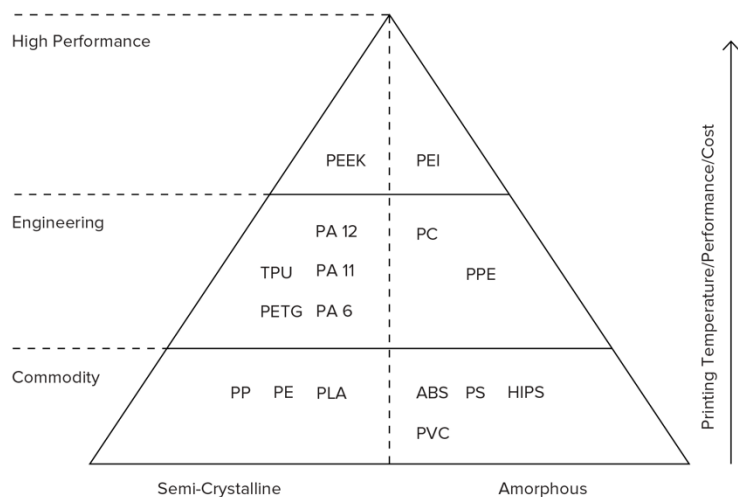
Asa vychází svými mechanickými vlastnostmi z ABS, díky vylepšené UV stabilitě a menší smrštitivosti, které bylo docíleno pomocí elastomeru akrylového esteru. Mezi výhody tohoto materiálu patří také velmi dobrá chemická stálost a vysoká houževnatost v nízkých teplotách. Při tisku nevzniká zápach a teplotní stálost je do 98 °C. Typické použití Asy je v u mechanicky namáhaných dílů, které mohou být venku. [12]

7.3. Hips (high impact polystyrene)

Hips patří do skupiny materiálů, ve kterých se vyskytuje styren stejně jako v ABS nebo ASA. V potravinářském průmyslu je Hips jeden z nejpoužívanějších materiálů na obaly. Jedná se o termoplast, který je vylepšen o kaučuk. Je pevný, houževnatý a teplotně velmi stálý. Vlastnostmi je Hips velmi podobný ABS. Největší použití zatím nabízí jako podpurný materiál při tisku z ABS, protože se dá rozpustit v Lemonesolu (chemická látka vhodná k rozpouštění Hips a zároveň nepoškození ABS). [14]

7.4. PC ABS (polycarbonate akrylonitril butadien styren)

Jedná se o kompozitní materiál, který kombinuje vlastnosti PC (polykarbonát) a ABS. Mezi jeho výhody patří bezpochyby odolnost proti nárazům, a to i za nízkých teplot, odolnost je vyšší než u samotného ABS nebo samotného PC. Tento materiál se snadno tiskne, díky menšímu smršťování a správnému poměru mezi ABS a PC. [15]



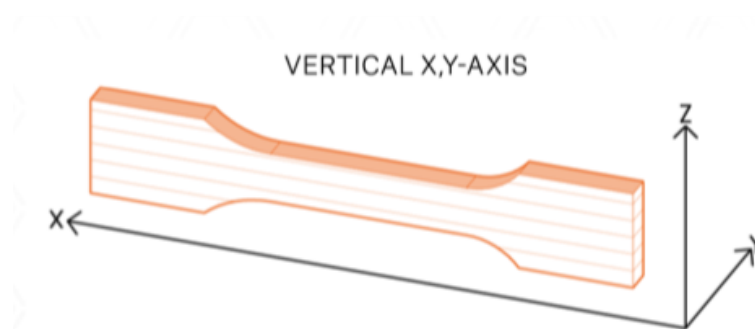
Obrázek 8- Termoplasty dostupné při tisku FDM metodou [5]

Přehled materiálů a jejich parametrů

Tabulka 1 [11] [12]

Materiál	Teplota trysky [°C]	Hustota [g/cm ³]	Teplotní stabilita do [°C]	Napětí na mezi kluzu [MPa]*
PLA	210	1,24	55	59
PETG	250	1,27	68	50
ABS	255	1,05	98	45
ASA	260	1,07	93	43
HIPS	230	1,04	85	26
PC-ABS	270	1,07	110	42

Napětí na mezi kluzu bylo měřeno na vzorku a při poloze viz. Obrázek číslo 9.



Obrázek 9 - testovací vzorek [11]

7.5. Další materiály a jeho formy

Tyto výše zmíněné materiály budou použity ve druhé části této práce, nejedná se tedy o všechny používané filamenty (materiál ve formě struny, který je používán u FDM tisku). Mezi velmi používané materiály patří navíc PLA, PETG, CPE, TPU, nylon, anebo například filamenty s příměsí dřeva.

7.5.1. PLA (Polylactic Acid)

PLA je recyklovatelný nebo i biologicky odbouratelný plast, který se vyrábí z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. Je to polyester sestavený z několika molekul kyseliny mléčné a je při kontaktu s potravinami zdravotně nezávadný. [10]

Jedná se o velmi jednoduše tisknutelný materiál, se kterým se při FDM tisku setkal každý začátečník. PLA se totiž vyznačuje nízkou teplotou tání a skvělou tvrdostí. Při tisku nedochází ke smršťování a je tedy vhodné pro tisk rozměrnějších součástí. Díky kombinaci biologické odbouratelnosti, nízké teploty tání a malé odolnosti vůči UV záření není PLA vhodné pro venkovní použití. PLA je recyklovatelné, a proto se dá na rozdíl od reaktoplastů znovu roztavit a použít na tisk. [11]

7.5.2. PETG (modifikovaný polyetylen tereftalát glykolem)

PETG patří skupiny termoplastů a díky své houževnatosti a dobré tepelné odolnosti (70 °C) se řadí na druhou příčku nejvíce používaného filamentu při FDM. Písmeno G v názvu tohoto materiálu znamená příměs Glykolu, ten pozměňuje vlastnosti PET, který známe například z PET lahví, a materiál je méně křehký a lépe tisknutelný. PETG má univerzální využití, ale je zejména vhodný pro tisk mechanických namáhaných součástí, protože není křehký jako PLA. Je možné jej použít v interiérech i exteriérech. PETG má velmi malou tepelnou roztažnost, na podložce se tedy nekroučí, tudíž není problém s tiskem velkých modelů. Teplota tání je okolo 250 °C. [12]

CPE (co-polystyren) je vylepšené PETG, které by mělo být v budoucnu jeho nástupcem, TPU (thermoplastic polyurethane) se vyznačuje svou na dotek měkkostí a pružností, která může až připomínat gumu, jsou nabízeny různé druhy tvrdosti na trhu s filamenty. [16]

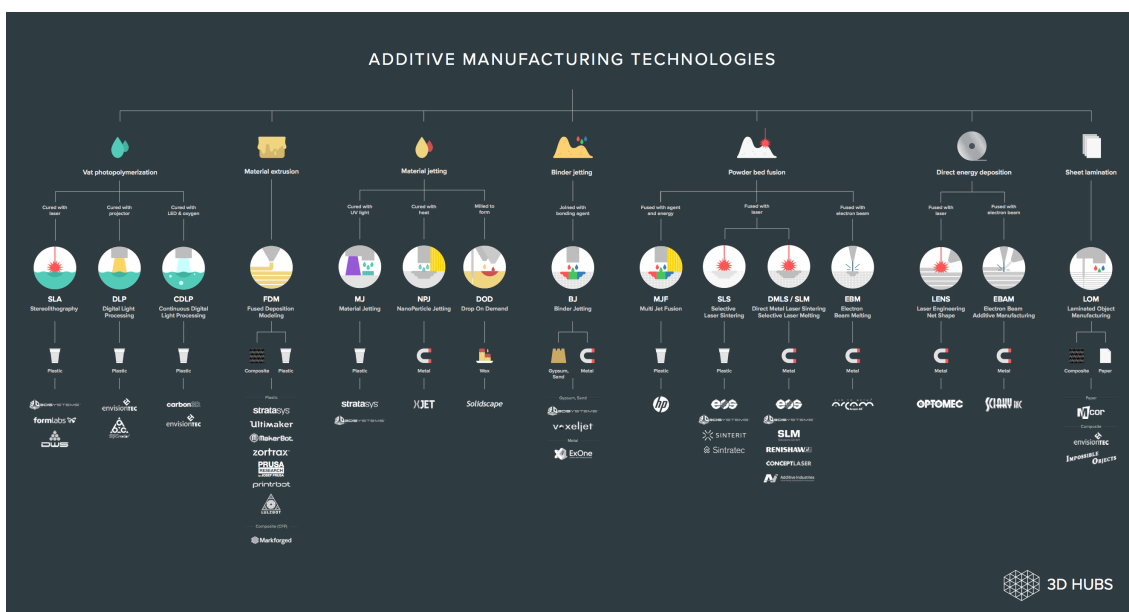
Nylon patří mezi filamenty, které se vyznačují velkou chemickou odolností a vnější stálostí, proto je používám při tisku funkčních a mechanicky namáhaných dílů například v automobilovém průmyslu. [16]

Jako posledního zástupce speciálních druhů filamentu bych rád uvedl PLA s různými příměsí. Možností je mnoho, ale nejdiskutovanější je rozhodně filament s příměsí dřeva. Jelikož je základem PLA, je materiál 100 % biologicky rozložitelný. Další variantou je kombinace PLA s mědí, ocelí nebo bronzem. Vždy se jedná o práškovou formu příměsí ve filamentu a účelem těchto kombinací je většinou vzhled. Tyto materiály se pomocí post-procesingu dají opracovat tak, že součásti vypadají jako kdyby byly celé z mědi, ocele, dřeva nebo bronzu. [17]

Dnešní možnosti jsou velmi rozmanité jak ve volbě materiálu, tak volbou metody tisku. Materiál používaný při tisku může být ve formě prachu, kapaliny, drátu nebo pásu a tento materiál je vytvrzen nebo nataven pomocí laseru, elektronového svazku, plazmy, ultrafialového paprsku nebo třeba lepidla.

Jednoduchou FDM tiskárnu je možné koupit v řádech jednotek tisíc korun a nebo lze koupit poloautomatickou linku s tiskárnou na kov v hodnotě až několik desítek milionů korun. Dnešní trh je obrovský a čím dál více firem rozšiřuje svá vývojová oddělení specializující se právě na 3D tisk. [18]

Aktuální přehled aditivních technologií



Obrázek 10- aktuální přehled aditivních technologií [5]

Z obrázku výše je zjevné, že nejvíce výrobců se soustředí právě na FDM technologii, která patří do skupiny, u které dochází k vytlačování materiálu tryskou na podložku. Další oblíbenou metodou je SLS tisk, který využívá práškovou formu materiálu. SLM je také prášková metoda, ale výhradně používána na tisk kovu.

8. ZVLÁŠTNÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU

Na světě se 3D tisk velmi rychle rozvíjí v řadě oborů, zejména v automobilovém, leteckém a medicínském průmyslu. Nejrozšířenější tiskárny jsou na plast, kovových přibývá zejména v automobilovém průmyslu.

Technologie určující směr, kterým se bude 3D tisk v budoucnu ubírat, se mění každým dnem. Sledovat tento proud informací je dnes velmi náročné, a proto bych rád zmínil technologie tisku, které pro mě osobně, jsou ze všech nejzajímavější.

První uvedu tisk kloubních náhrad a srdečních chlopní. Firma Lima Corporate, která jako první úspěšně aplikovala kloubní náhradu vytvořenou 3D tiskem a začátkem tohoto roku otevírá ortopedické centrum, které bude využívat 3D tisk, v New Yorkské

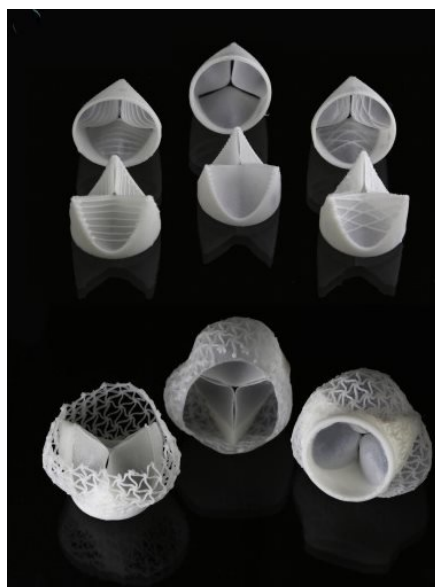
nemocnici. Vyvinuli produkt, který je velmi podobný svou strukturou kostní tkáni, má trojrozměrnou hexagonální strukturu, tzv. trabekulární titan – název napovídá, že se jedná o kombinaci strukturu kosti a titanu. Trabekulární titan je nejpoužívanější produkt v ortopedii, a to hlavně díky svým výjimečným vlastnostem. Není pochyb pouze o mechanické odolnosti, důležité také jsou vlastnosti jako biokompatibilita a odolnost proti korozi. [19]

Tento produkt je vytvořen pomocí technologie EBM (electron beam melting), což je technologie založená na tavení kovového prášku pomocí laseru vrstvu po vrstvě. EBM se používá pouze u kovového tisku. [19]



Obrázek 11- kloubní náhrady firmy Lima Corporate [19]

Další zajímavou možností 3D tisku bych zde uvedl tisk srdečních chlopní ze silikonu. Vědci z ETH v Zurichu a firma Strait Acces technologies z jižní Afriky začali tisknout chlopně na míru pro každého pacienta. Tento průlomový vynález by mohl pomoci stárnoucí populaci v době, kdy bude nedostatek těchto životně důležitých částí srdce. Vědci tuto metodu hodnotí velmi kladně, je totiž velmi složité vytvořit srdeční chlopeň tak, aby byla plně funkční. Každá srdeční tepna má jiný tvar a tím pádem i její chlopeň, 3D tisk je ideální technologií k tomuto využití. Lékaři získají přesný tvar chlopně a během hodiny vytisknou silikonový implantát, který podle vědců, vydrží 10-15 let než bude nutné ho znovu vyměnit. V budoucnu se diskutuje o materiálu, který vydrží celý životní cyklus, ale to je zatím nemožné. [20]



Obrázek 12 - srdeční chlopeň [20]

Poslední zmíněnou technologií je tisk kovu od firmy Markforged. Ta přišla na trh se zcela novou formou tisku kovu. Pokud si zakoupíte jejich produkt, nedostanete pouze tiskárnu, ale i myčku a troubu. Základním kamenem jejich úspěchu je totiž tisk pomocí FDM metody, využívající plast k přenosu a formování kovového prášku. Díl je vytisknut a z tiskárny je přesunut do myčky, kde se přebytečný plast vymyje. Třetí zastávkou je trouba, která vypeče z dílu plast a speče dohromady kovové části k sobě, díky tomu vznikne velmi přesný a především velmi levný díl. Markforged uvádí, že je možné tisknout z nerezové oceli, nástrojové oceli a dokonce i mědi. Velkou výhodou této technologie je jednoduchost, není nutné žádné laserové tavení, FDM metoda je jednoduchá i po mechanické stránce a materiálová variabilita je veliká. [21]

9. OBECNÝ PROCES ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Kvalita a vlastnosti vytištěných součástí závisí na mnoha faktorech, které mohou být rozděleny do tří hlavních segmentů, příprava, tisk a post-procesing. Tyto tři segmenty si v následujících odstavcích popíšeme podrobněji.

9.1. Příprava

1. Krok – 3D model

Před tiskem součásti je samotné modelování. Vymodelovat správně složitý model vyžaduje mnohem více úsilí než jednoduchý model, a to především proto, že nestačí pouhé modelování, ale konstruktér musí brát ohled na limity vybrané technologie a geometrie součásti, aby byl umožněn bezproblémový tisk. Je také důležité při modelování počítat s přídávky na obrábění, které mohou při post-procesingu změnit rozměry součástí. Další faktor, který ovlivní kvalitu a správný rozměr výsledného dílu, je smršťování během tisku některého materiálu. Modelování je možné provést v jednom z mnoha CAD programech jako je například Autodesk Inventor, Solidworks nebo například volně přístupný Fusion 360, atd. Důležité pro tvorbu modelů určených k 3D tisku je především to, aby výstupem geometrie softwaru byl 3D model. V

současný je možné jednoduše součást naskenovat a následně vytisknout nebo převést do CAD programu, v tom ji libovolně upravovat a přetvářet. [4]

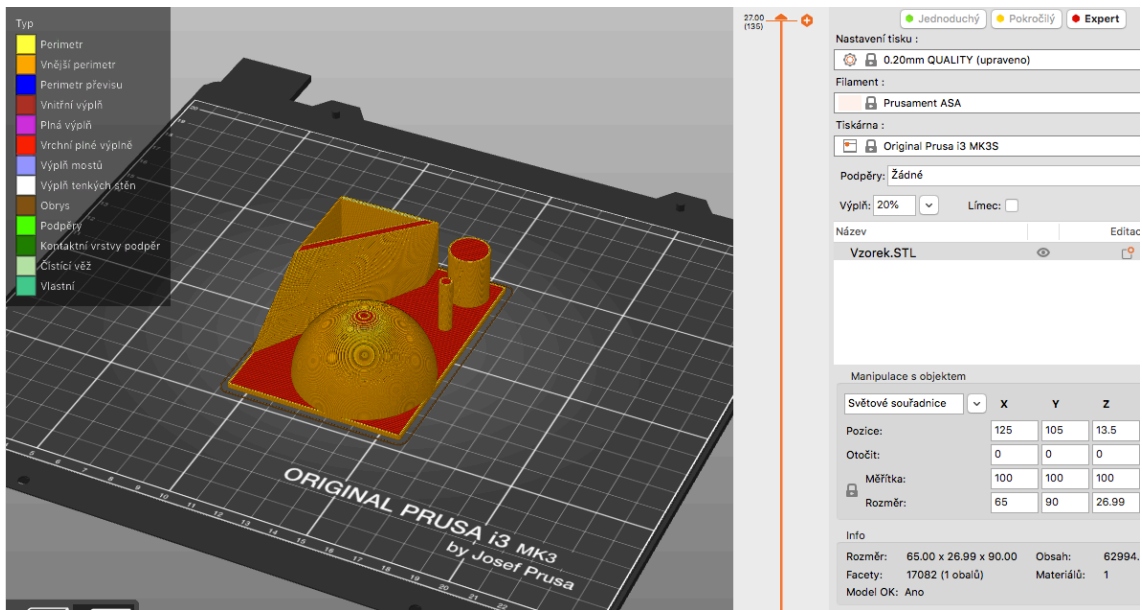
2. Krok - Export

V druhé kroku je nutné převést 3D model z CADu do formátu, který podporuje vybraná tiskárna. Nejpoužívanějším formátem je STL, téměř každý CAD software je schopný vyexportovat model v tomto formátu. STL je formát, který převádí model do trojúhelníku a díky tomu je jednoduchý, to ale nemusí vyhovovat každému uživateli. Další používané formáty jsou například 3DS, IGES, STEP, OBJ nebo AFM atd. Pro standardní tisk je dostačující STL, ale náročnější uživatelé využívají pro barevný nebo multi materiálový tisk OBJ, které je k tomu uzpůsobené. Na druhou stranu formát AFM nabízí větší přesnosti a možnost složitějších geometrií. [5]

9.2. Tisk

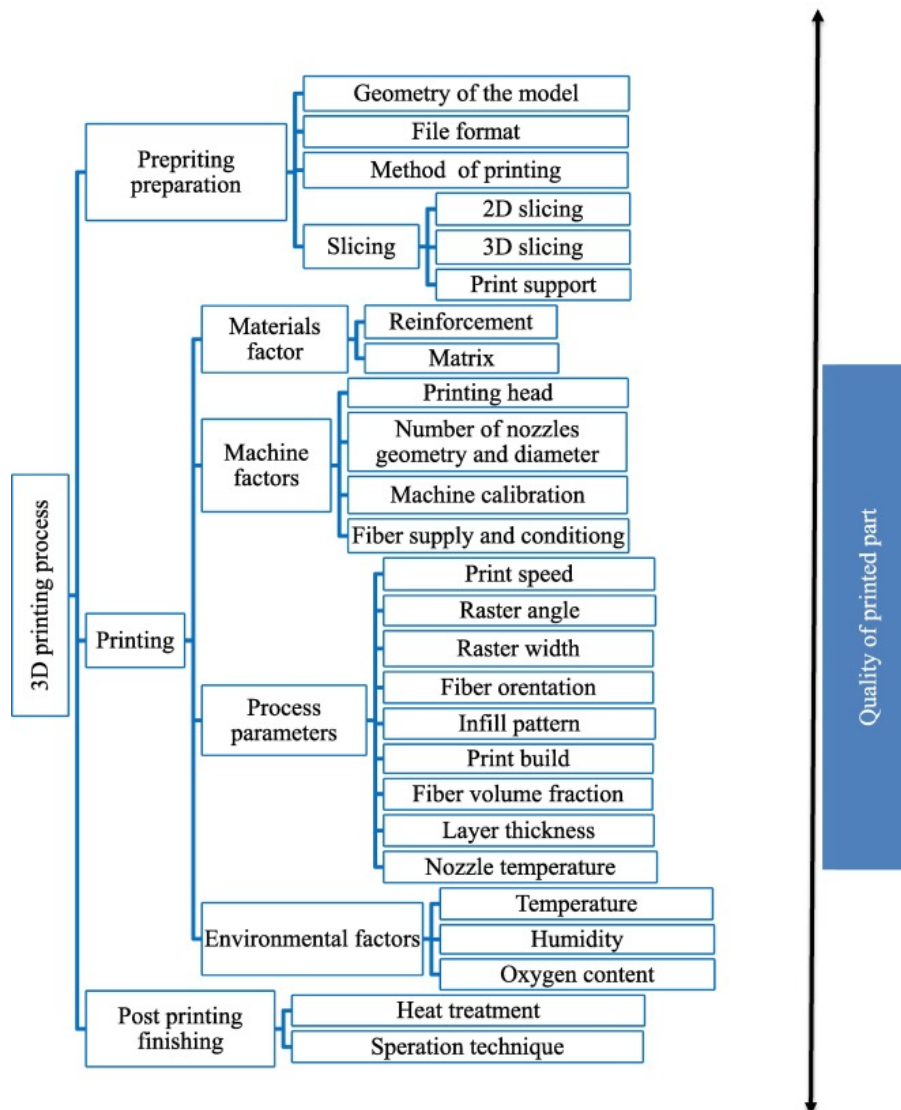
3. Krok - Slicer

Slicer je program, který je standardně dodáván s tiskárnou nebo je možné si ho zakoupit či stáhnout. Úkolem sliceru je naplánovat trasy tiskové hlavy nebo laseru tak, aby byl model úspěšně vytisknut. U FDM tisku slicer doslova nařeže model na vrstvy a trasy, které tiskárna následuje při tisku. Velký podíl na úspěšnosti tisku a jeho kvalitě nese nastavení sliceru. Někteří výrobci mají parametry tisku přísně nastaveny a není pro uživatele možné tyto hodnoty měnit, např. firma Markforged nebo Stratasys umožňuje jen základní nastavení ve sliceru (Grabcad – slicer firmy stratasys, který je doporučován používat). Základním nastavením je myšleno nastavení materiálu, výška vrstvy a výplň. Zbytek je již předdefinován a není možné to měnit. Na rozdíl od výše zmíněných firem, které vyrábí tiskárny v hodnotách okolo půl milionu a více, levné tiskárny umožňují nastavování téměř každého parametru. Na první pohled se to může zdát jako negativní stránka věci, ale výrobci drahých tiskáren díky tomu garantují tisknutelnost, což levné tiskárny rozhodně nenabízí. Ve sliceru je nutné definovat materiál, průměr trysky, teploty trysky a podložky, výšku vrstvy, výplň, rychlost tisku a také například retrakce. Všechny tyto parametry ovlivňují kvalitu výsledného tisku. Při tisku na tiskárnách Prusa je používán Prusaslicer, který výrobce doporučuje používat. [22]



Obrázek 13 - základní nastavení tisku v programu Prusaslicer pro materiál ASA

Tisk je mnohem složitější a perfektní nastavení určitého materiálu může být velmi nedokonalé pro materiál jiný, což je nutné vyzkoušet a vše správně zvolit u levnějších tiskáren. Každý materiál má jiné vlastnosti a s těmi se mění i celkové nastavení tiskárny. Dokonce se mění vlastnosti i u stejných materiálu, kde je rozdíl pouze v barvě. Správné nastavení teploty trysky a podložky má velký vliv na schopnost spojení jednotlivých vrstev a zbytkové pnutí. Důležité také je skladování materiálu (filamentu), protože některé materiály jsou náchylné na vlhkost nebo na UV záření. K vysoušení filamentu lze používat sušičky, které těsně před tiskem filament vysuší a výtisk je o poznání kvalitnější. Ze sliceru se vyexportován soubor gcode, který obsahuje všechny nastavené parametry a může začít tisk. Tisk samotný je automatický a po nastavení tiskárny a parametrů tisku ve sliceru je vzorek vytisknut. [23]



Obrázek 14 - orientační mapa celého procesu [23]

9.3. Post-procesing

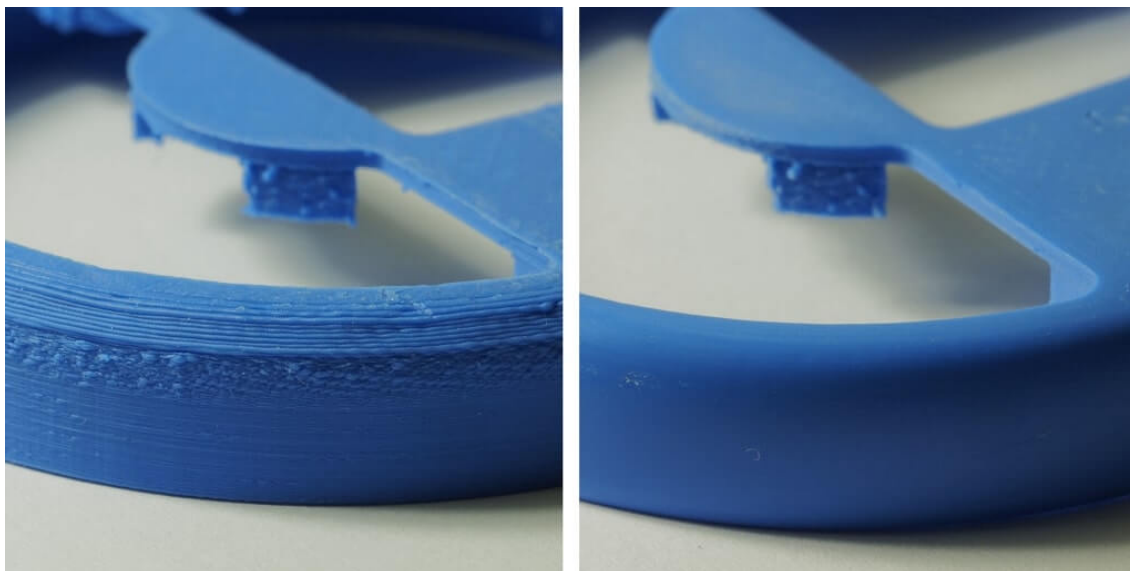
Dalším krokem je post-procesing, který následuje po tisku, a to většinou za úkolem zlepšení mechanických nebo vizuálních vlastností. Úplným základem post-procesingu lze označit odstranění součásti z tiskové podložky a úprava nedokonalých okrajů. Někteří výrobci doporučují nanášet před tiskem na tiskovou podložku speciální lepidlo, které ohřátím podložky získá velkou přilnavost k vytlačovanému filamentu a po dokončení tisku a vychladnutí podložky svou přilnavost ztratí, vytištěná součást se poté velmi jednoduše z podložky odstraní. [23]

FDM metoda je známá svou jednoduchostí a také nechvalně proslulá stavbou podpór, jejichž odstraňování může být velmi složité a nepříjemné. K těmto účelům byl vyvinut vibrační stroj na odstraňování podpěr. Další možností, jak podpory odstranit je chemickou cestou, kdy podpory jsou tištěny z jiného materiálu než zbytek součásti a podpůrný materiál je rozpustitelný v acetonu nebo jiném rozpouštědle. K tomuto účelu se dnes používá Hips, ze kterého se tisknou podpory u modelu z ABS. Hips je rozpustitelný v Lemonsolu.[14]

Mezi další metody post-procesingu patří broušení, leštění, nanášení epoxidu, plniče nebo barvy, acetonové páry, nanášení kovu nebo lepení. Níže budou podrobněji rozepsány nejdůležitější z nich.

9.3.1. Broušení

Broušení je proces, který je možné aplikovat na součást za účelem odstranění vad tisku jako například zbytky materiálu po odstranění podpor nebo zbytky filamentu na povrchu součásti. Broušení se používá i za účelem vyhlazení povrchu, jedná se o velmi snadnou a levnou metodu úpravy povrchu. Brusné pomůcky lze sehnat v každém hobby obchodě. K odstranění větších vad na povrchu používáme brusné papíry nebo houbičky s větší hrubostí. Hrubost vybraného papíru je dána počtem zrn na čtvereční centimetr, čím větší číslo, tím více zrn na cm čtvereční a tím jemnější papír. Klasický rozsah je od 40 do 2000. Pokud brousíme hrubý povrch, začínáme s hrubšími papíry a postupně používáme jemnější až je povrch podle našich představ. Ideální je brousit pod tekoucí vodou, aby se povrch nezahříval a papír zůstal čistý. [23] [4]



Obrázek 15 - součást před a po broušení [23]

9.3.2. Nanášení plniče a barvení

Tato metoda je opakem broušení, kdy se zlepšení povrchu docílí pomocí ubírání materiálu. Při použití plniče totiž mezery a nedostatky vyplníme vrstvou speciálního plniče. Ten může být nanášen ve formě spreje nebo nátěru. K vyplnění menších děr u PLA nebo ABS je vhodné použít XTC-3D [29], u větších nedostatků je nutné použít plnič na automobily, ten je vhodné po uschnutí zbrousit například brusným papírem číslo 600-1000. Po tomto procesu je součást v barvě plniče s příslušnou hrubostí povrchu a dalším krokem většinou bývá lakování součásti. V prvním kroku je vhodné nanést základní vrstvu a následně vybraný lak. [24]



Obrázek 16 - výtisk po nanošení plniče a laku [24]

9.3.3. Lepení dílů

Tiskárna nedokáže vždy vytisknout celý díl a je nutné tisk rozdělit na více částí. Ke spojování se používají různá lepidla nebo také acetone – použití acetonu se také říká studené svařování. Lepidlo na plast je možné koupit téměř kdekoli a ke správné funkci spoje je důležité lepené plochy očistit a odmastit, po nanesení lepidla pevně spojit. Při používání acetonu je také nutné mít plochy čisté a odmaštěné, nanášení acetonu součást naleptá a při spojení dílů vznikne chemická vazba a díly zůstávají spojeny. Je nutné podotknout, že spoj není tak pevný jako výtisk tisknutý najednou. Při spojování plastových dílů je možné také použít šrouby a díly spojit pomocí nich. Je nutné modelovat díly speciálně pro spojení šrouby jinak by spoj mohl být velmi křehký. Jednou ze zajímavých možností, jak docílit lepením co nejpevnějšího spoje, je vytvoření zámku, který zvýší lepenou plochu a mechanicky do sebe díly zapadnou. [24]



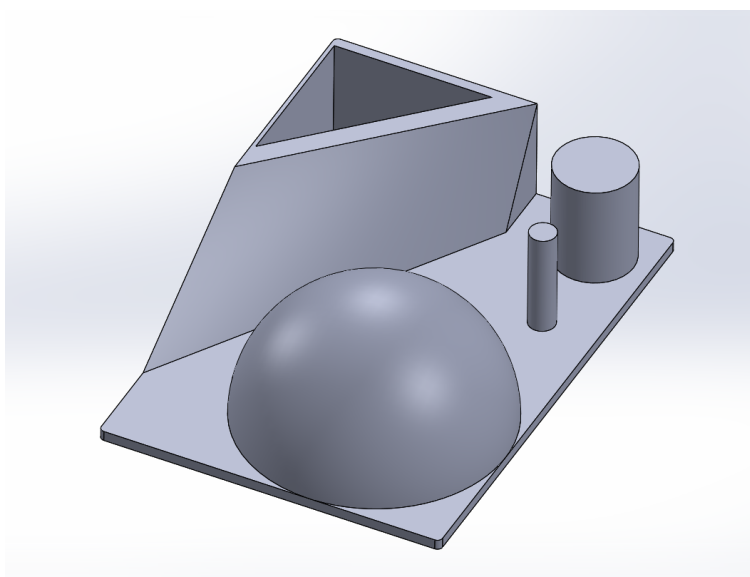
Obrázek 17 - zámky určené ke zlepšení spojů při lepení [24]

9.3.4. Vyhlazení povrchu pomocí acetonových pár

Post-processing pomocí acetonových par je povrchová úprava, kterou lze aplikovat pouze na materiál s příměsí styrenu, protože aceton rozpouští styren. Styren je za normálních podmínek olejovou kapalinou, která je bezbarvá až mírně nažloutlá. Jedná se o celosvětově nejvýznamnější monomer, který slouží jako výchozí surovina pro výrobu pryží, umělých hmot, automobilových součástí nebo potrubí. [30] Podle množství styrenu v tisknutém materiálu je vyhlazování účinné, s rostoucím obsahem se reakce zrychluje a zvětšuje. Acetonové vyhlazování je vhodné používat na materiály jako například ABS, ASA, HIPS. Nejjednodušším způsobem je použití acetonu v uzavřené nádobě, aby při jeho odpařování docházelo k vyhlazení součásti. Další možností je konstrukce acetonové pračky, kterou jsem použil v druhé části této práce. Firma Statasys přišla na trh se zařízením, které díl předchladí a následně vyhladí pomocí acetonu v komoře. Díky rozdílným teplotám dílu a prostředí v nádobě aceton rovnoměrně na povrchu zkondenzuje a není potřeba žádná další cirkulace v nádobě. [25]

10. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

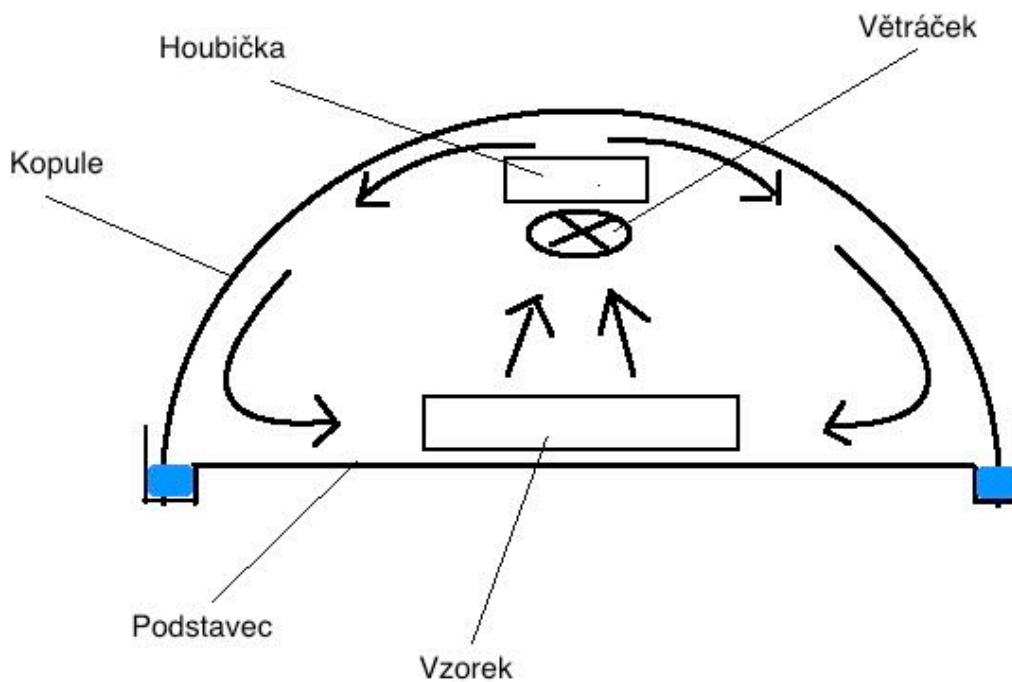
Ve druhé části práce je vymodelován vzorek, na kterém je pozorována a následně vyhodnocována aplikace acetonových par. Vzorky jsou vytisknuty na různých zařízeních a z různých materiálů. Vybral jsem si materiály, které obsahují styren, aby byl aceton účinný a zároveň je zhodnocena vhodnost použití tohoto post-procesingu pro daný materiál, zvolena co možná nejvhodnější délka pobytu v parách. Forma vyhodnocení je jak vizuální, tak exaktní pomocí tomografu Zeiss Metrotom 1500 a konturografu Marsurf LD 120. Sledované rozměry jsou přeměřeny a vzorek je porovnán před a po aplikaci vyhlazování.



Obrázek 18 - 3D model vzorku

10.1. Acetonová komora

K dosažení žádané kvality povrchu musí acetonová komora splňovat určité parametry. Komoru lze zkonstruovat svépomocí nebo lze koupit. Tato komora je prvním prototypem, který je velmi jednoduchý, ale velmi dobře fungující. Komora je tvořena skleněnou kopulí, aby se acetonové páry rovnoměrně pohybovaly prostorem, pohyb par umožňuje větráček a aceton je nalit v houbičce, která je umístěna nad větráčkem. Směr proudění vzduchu je uzpůsoben tak, aby se aceton přímo z houbičky rozlival po kopuli a klesal k opíraným vzorkům. Těsnost celého zařízení je docílena tím, že kopule leží v kruhové nádobě s vodou. Vzorky jsou postaveny na podstavci, který je nad vodní hladinou. Směr proudu par v komoře je uzpůsoben faktu, že acetonové páry jsou těžší než vzduch [26] a větráček fouká skrz houbičku směrem vzhůru. V případě, že by větráček foukal přímo na vzorky, dochází k velmi nerovnoměrnému vyhlazování, proto je zvolen tento směr, dochází také k lepší cirkulaci acetonu. Schéma je na obrázku 19.



Obrázek 19 - schéma acetonové komory

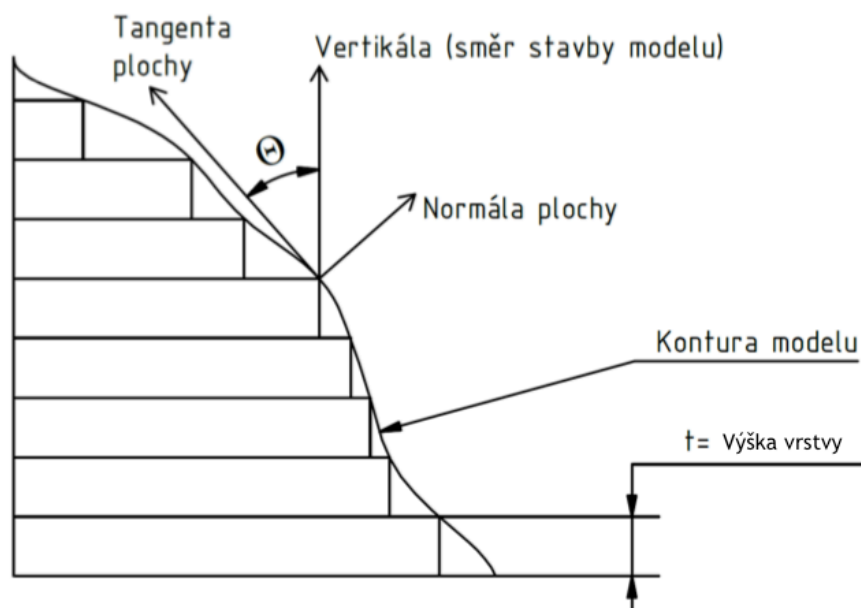


Obrázek 20 - acetonová komora

Pokud bychom chtěli docílit ještě lepších výsledků při vyhlazování, je možné pračku modifikovat. Z hlediska ekologie a větší efektivity by bylo možné na komoru nainstalovat Peltierův článek, který umožňoval při chlazení acetonu kondenzovat, a naopak při ohřívání by docházelo ke zplynění. Další možnou úpravou by bylo nastavení cyklování v komoře, kdy by v prvním cyklu aceton vyhlazoval a ve druhém by bylo umožněno vzorku vysušení odsátím acetonu z komory. Třetí úpravou by bylo možné vzorky pokládat na vibrační desku, která by umožňovala rychlejší leptání povrchu vzorku. Tyto úpravy budou provedeny při konstrukci dalšího prototypu acetonové komory.

10.2. Povrch vzorku po FDM

Výška vrstvy a orientace tisku jsou parametry, které nejvíce ovlivňují kvalitu povrchu výtisku. Vznik nerovností (tzv. schodového efektu) je zapříčiněn samotnou metodou stavby dílu při FDM, ta spočívá v postupném kladení vrstev na sebe, kdy každá vrstva má určitou výšku. Tímto způsobem dochází ke schodovému efektu, který je znázorněn na obrázku 21, kdy je vytištěný model rozdílný od CAD modelu, který byl zkonstruován ve virtuálním prostředí. Drsnost povrchu záleží na výšce vrstvy a na úhlu povrchu. Snížením výšky vrstvy je možné povrch zjemnit, prodlouží se ale celkový čas tisku, což negativně ovlivňuje produktivitu a náklady na tisk.



Obrázek 21 - schodovitý efekt způsobený FDM metodou, kde Θ je sklon plochy ku vertikále [28]

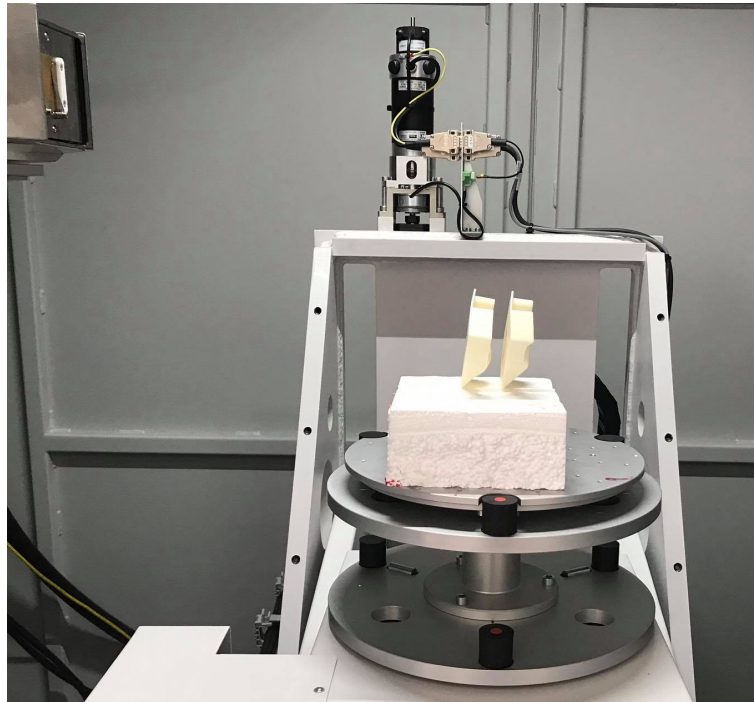


1. Obrázek 22 - schodovitý efekt na kopuli vytištěného vzorku

V acetonové komoře je možné vyhladit tyto nedostatky a docílit povrchu, který má mnohem menší drsnost a vizuálně je hezčí. Vrstvy se díky acetonu slijí a vzniká malý, téměř nezatelný schod. Velikost této změny je závislá na množství acetonu v komoře, délce pobytu vzorků v parách, materiálu, úhlu Θ a výšce vrstvy. Tyto parametry budou sledovány při opírání v komoře.

10.3. Tisk a měření

V první řadě byly vzorky vytisknuty z různých materiálů, které by dle předpokladu měly obsahovat styren a tím pádem by mělo dojít k reakci a vyhlazení za přítomnosti acetonu. Zástupcem levnějšího tisku byla tiskárna PRUSA MK3S a zástupci nákladnějšího tisku byly Stratasys F370 a Stratasys 380 mc. Aby mohlo být srovnání objektivní a opírání mělo výpovědní hodnotu, parametry tisku musely být téměř shodné, u tiskáren Stratasys lze nastavit pouze materiál, perimetry, výška vrstvy a výplň. Po tisku jsou všechny vzorky naměřeny na konturografu a naskenovány v tomografu (obr. 23). Měřené prvky na konturografu byly kopule (obr.24) a zkosená plocha.



Obrázek 23 - skenování vzorků v CT Zeiss Metrotom 1500



Obrázek 24 - měření drsnosti kopule na konturografu na zařízení Marsurf LD 120

Jednotlivé parametry tisku

Tabulka 2 – parametry tisku

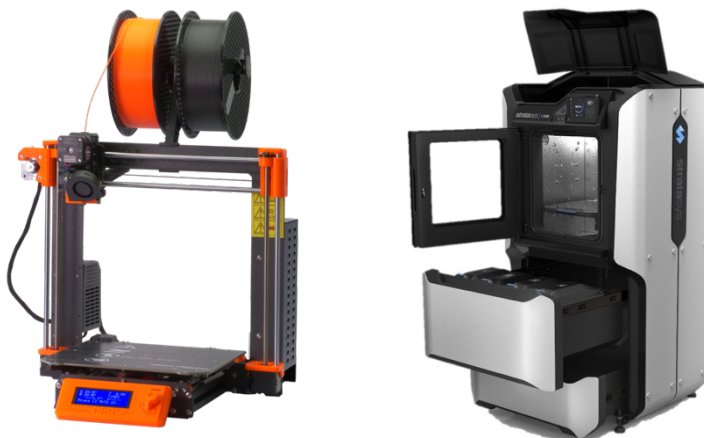
Materiál	Výška vrstvy	Výplň	Počet perimetrů	Teplota extruderu	Teplota podložky	Chlazení
ABS	0,2	20%	2	255	110	0%
ASA	0,2	20%	2	260	110	20
HIPS	0,2	20%	2	220	110	20%
ABS - S	0,178	20%	2	/	90	/
ASA - S	0,178	20%	2	/	90	/
PC_ABS - S	0,178	20%	2	/	90	/

Poznámka – písmeno S u materiálů znamená tisk na tiskárně Stratasys F370, zbytek na tiskárně Prusa MK3S

10.4. Vyhlazování acetonem

V prvním tisku bylo vtištěno šest vzorků, tři na Prusa MK3S a tři na Stratasys F370. Parametry byly použity z tabulky výše.

Na první opírání volím 30 ml ředidla C6000, které obsahuje aceton. Vzorky byly vloženy do komory a doba expozice byla stanovena na 1 hodinu.



Obrázek 25 a 26 - zleva Prusa MK3S a Stratasys F370

Na obrázku 22 je vidět schodový efekt a povrch je matný. Po expozici v komoře vypadají vzorky viz. obrázek 28, 29, 30, na první pohled je vidět větší lesk vzorků a vyhlazení, kterého je nutné docílit. Po vyhlazování jsou vizuálně vybrány úspěšně oprané vzorky, jedná se o vzorky z materiálu ASA, které byly ideálně vyhlazeny po 1 hodině v komoře. Vzorky z ABS a PC-ABS byly jemně vyhlazeny a vzorek z materiálu Hips byl téměř rozteklý.



Obrázek 27- vzorky před opráním



Obrázek 28 - vzorky po hodině v komoře



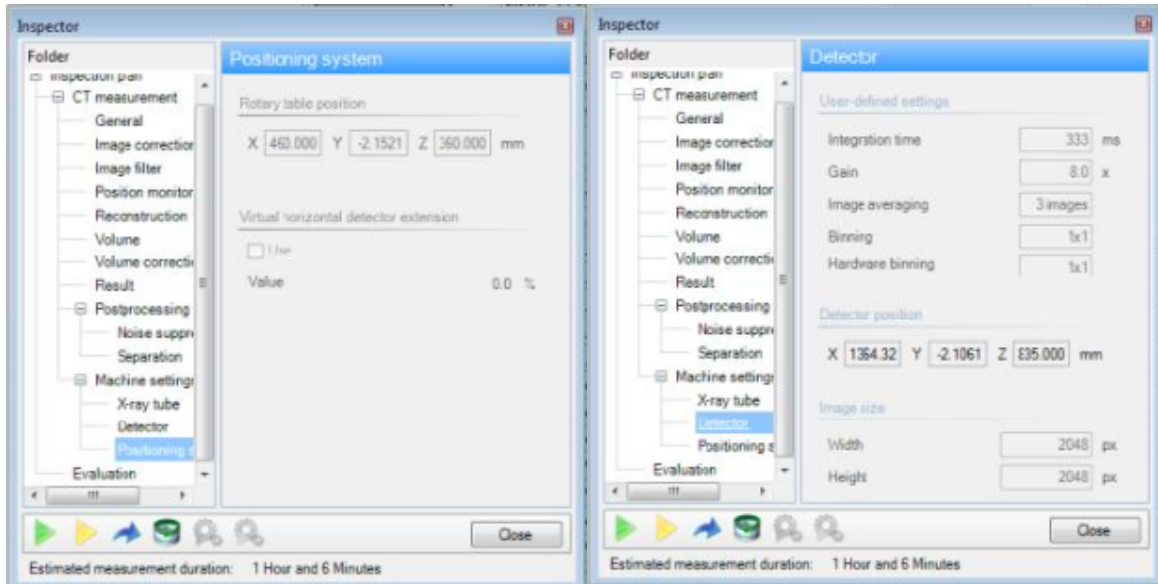
Obrázek 29 - Ideálně opraný vzorek ASA vytisknutý na Prusa MK3S



Obrázek 30 - ideálně opraný vzorek ASA vytisknutý na Stratasys F370

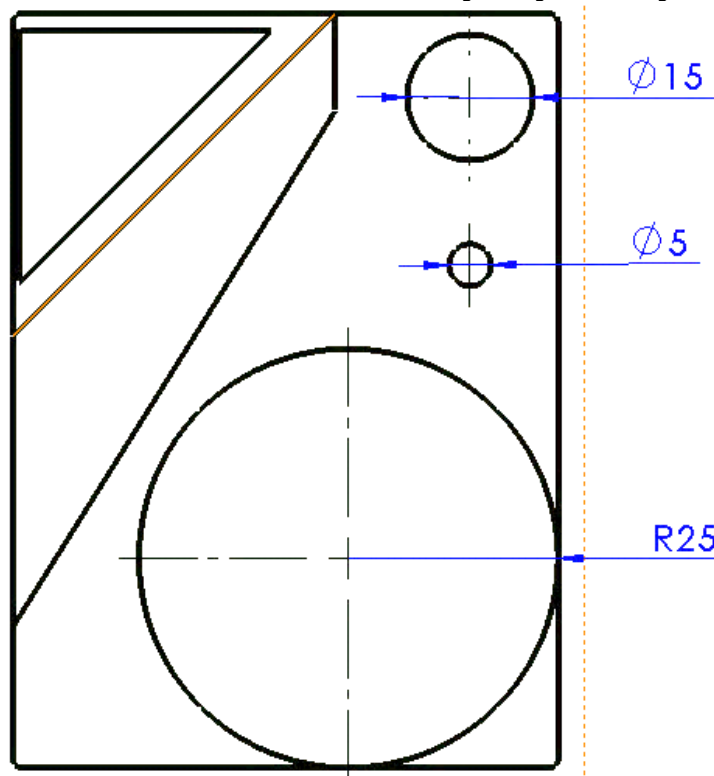
V tabulce níže jsou zaneseny hodnoty, které byly naměřeny pomocí tomografu Zeiss Metrotom 1500. Průmyslové tomografy využívají stejně jako běžné tomografy rentgenového záření umožňující neinvazivní zobrazení vnitřních struktur. Skenování proběhlo vždy ve dvojicích vzorku viz. obr 23.

Nastavený výkon záření je 180 kV na tomografu Zeiss Metrotom, ostatní parametry jsou na obrázku 32 a 33. V tabulce číslo 3 jsou zaznamenány rozměry vzorku před vyhlazováním v porovnání s 3D CAD modelem, podle kterého byly vzorky vytisknuty. Z toho lze usoudit, že obě tiskárny dosáhnou podobné přesnosti tisku a tvarových odchylek. Nastavení zůstalo stejné pro všechny měření.



Obrázek 32 (vlevo) a obrázek 33 (vpravo) - pozice stolu ve stroji (vlevo) a nastavení času a rozlišení snímků (vpravo)

Změny v rozměrech mezi 3D modelem a reálným vytisknutým vzorkem



Obrázek 31 - skica modelu vzorku

Tabulka 3 - Změna rozměrů naměřená na tomografu v porovnání s modelem v CAD

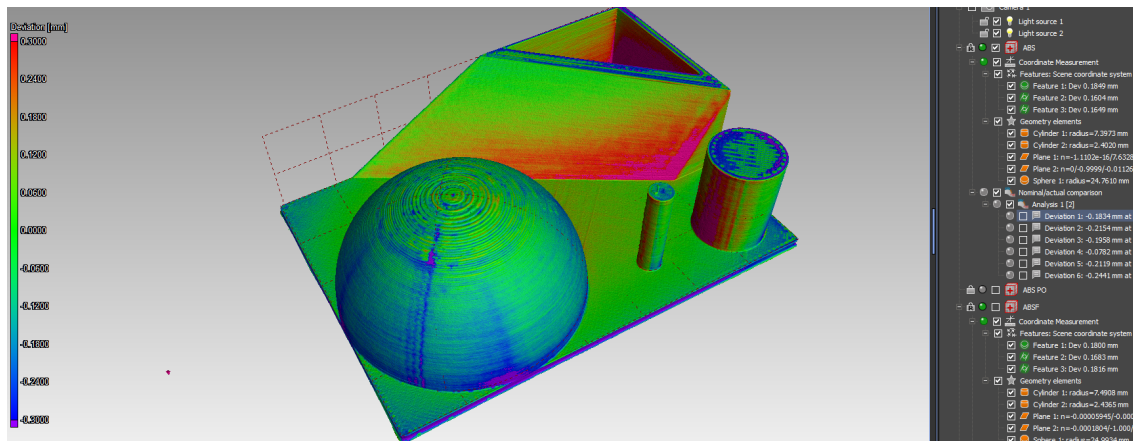
Vzorek	Tiskárna	Poloměr kopule	Průměr většího válce 1	Průměr menšího válce 2	Odchylka tvaru kopule	Odchylka válcovitosti 1	Odchylka válcovitosti 2
Model	/	25	15	5	/	/	/
ABS	F370	24,76	14,78	4,8	0,18	0,16	0,16
Hips	Prusa	24,79	14,74	4,74	0,17	0,15	0,12
ASA	Prusa	24,82	14,86	4,84	0,18	0,15	0,14
ASA	F370	24,95	14,88	4,66	0,19	0,16	0,2

Poznámka – rozměry v mm

V tabulce 4 jsou zaznamenány průměry velikostí všech opraných vzorků naměřené digitálním posuvným měřítkem. Je zde vidět odchylka, ke které dochází kvůli různým materiálům tisku a také délce expozice v acetonové komoře, která díly vyhladí a díky tomu se změní rozměry.

Tabulka 4 – Průměry velikostí všech opraných vzorků

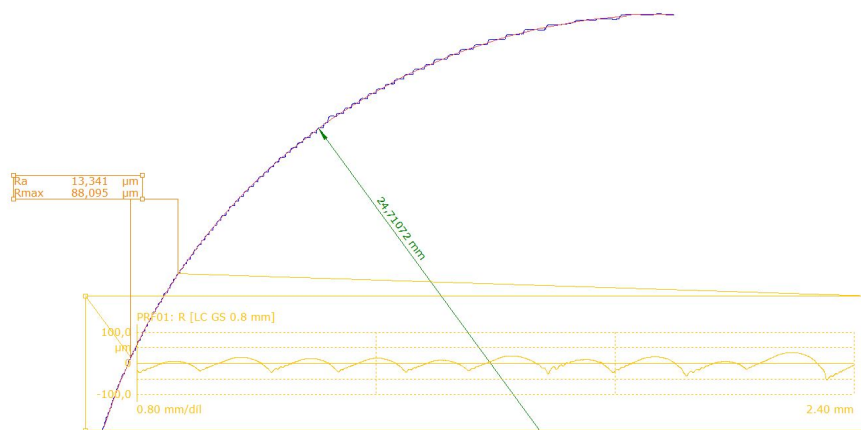
Materiál	Délka expozice	Průměr většího válce 1 [mm]	Průměr menšího válce 2 [mm]	Tiskárna
Vzorek	/	15	5	/
ABS	1h	14,89	4,9	Prusa MK3S
HIPS	1h	14,82	4,83	Prusa MK3S
ASA	1h	14,91	4,92	Prusa MK3S
ABS	1h	15,07	4,96	F370
PC-ABS	1h	15,16	5,08	F370
ASA	1h	14,99	4,67	F370
ABS	1h 20 min	15,22	5	F370
ABS	1h 20 min	15,02	4,97	380mc
ABS	1h 20 min	14,92	4,94	Prusa MK3S
HIPS	20 min	14,86	4,82	Prusa MK3S



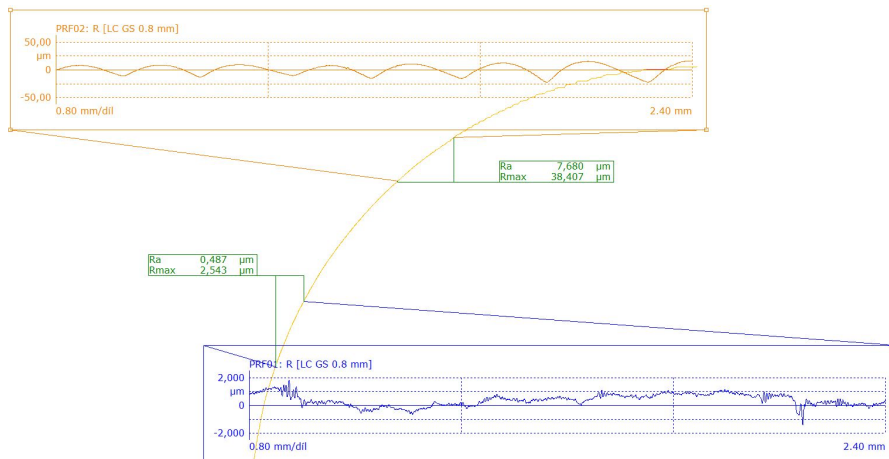
Obrázek 34 - grafické vyhodnocení velikosti vzorku z ABS a 3D modelu v CAD

Na obrázku 34 jsou barevně zobrazeny změny rozměrů na určitých místech mezi virtuálním modelem a reálným výtiskem na tiskárně Stratasys F370.

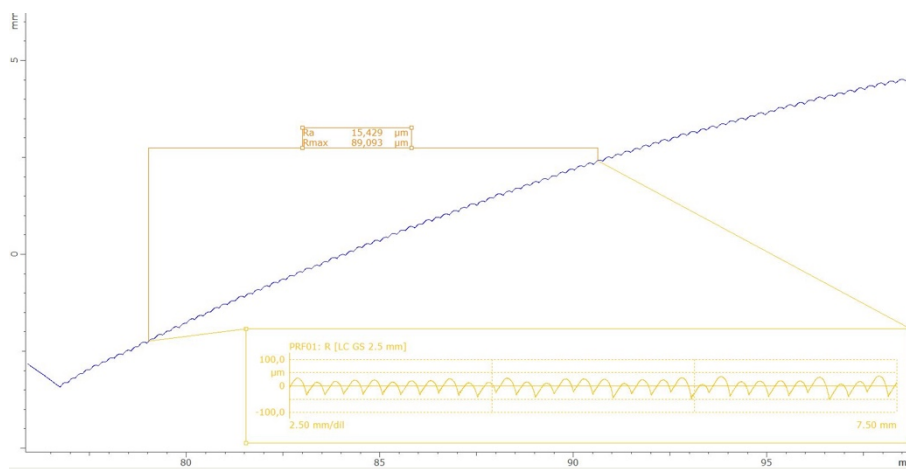
Měření drsnosti proběhlo na konturografu Marsurf LD 120 s měřenou délkou u kopule 35 mm a u zkosené plochy 25 mm. Rychlost snímání byla 1 mm/s a amplituda měření u kopule 0,8mm a zkosené plochy 2,5mm. Tyto parametry zůstaly stejné a vyhodnocované délky byly celkem tři. Normalizovaný počet vyhodnocovaných délek je pět, ale vzhledem k tomu, že na kopuli se mění povrch a drsnost, nebyly by výsledky přesné. Byl zvolen jeden měřený úsek na kopuli, který byl vyhodnocován stejně na všech měřených vzorcích, u zkosené plochy byl měřený úsek také jeden.



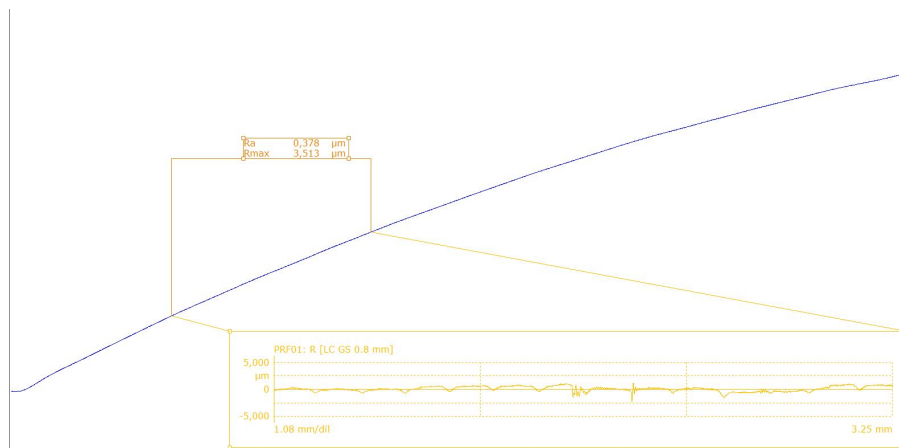
Obrázek 35 - drsnost kopule před vyhlazením z materiálu ASA



Obrázek 36 - drsnost kopule po vyhlazení z materiálu ASA



Obrázek 37 - drsnost plochy před vyhlazením z materiálu ASA



Obrázek 38 - drsnost plochy po vyhlazení z materiálu ASA

Tabulka 5 - Výsledky Ra a Rmax naměřené na drsnoměru před a po vyhlazení

	Vzorek	Ra [μm]	Rmax [μm]
Před opíráním	ABS	15,1	76,6
	ASA	14,4	89,5
	HIPS	15,8	80
	ABS	17,7	78
	PC-ABS	16,5	81
	ASA - S	17,1	80,9
Po oprání	ABS	6,7	34,5
	ASA	0,43	3,02
	HIPS	0,75	1,9
	ABS	9,2	42,1
	PC-ABS	14,4	68,15
	ASA - S	0,95	5,4

Poznámka – zeleně zvýrazněné ideální výsledky, kterých dosáhl pouze materiál ASA, ASA – S je vzorek tisknutý na F370

Vizuální odhad byl potvrzen vyhodnocením na konturografu viz tabulka 5. Drsnosti se ve vybraném úseku změnily rapidně a povrch zůstal lesklý a velmi jemný.

Byl proveden opětovný tisk z ABS na tiskárně Prusa, Stratasys F370 a Stratasys 380mc z důvodu stanovení správného vyhlazovacího času, protože účelem první expozice bylo srovnání rozsahu vyhlazení u vzorků z různých materiálů za stejný čas.

Vyhlazovány jsou tři vzorky ABS a jeden vzorek Hips. Vzorky z ABS jsou vyhlazovány tak, aby vizuálně bylo vyhlazení ideální, čehož bylo dosaženo po 1 hodině a 20 minutách. Vzorek z Hips je vystaven acetonu pouze 20 minut s velmi dobrým výsledkem. Na obrázku níže vzorky z ABS a Hips.



Obrázek 39 - Vzorky z ABS před opíráním



Obrázek 40 - Vzorky z ABS po oprání

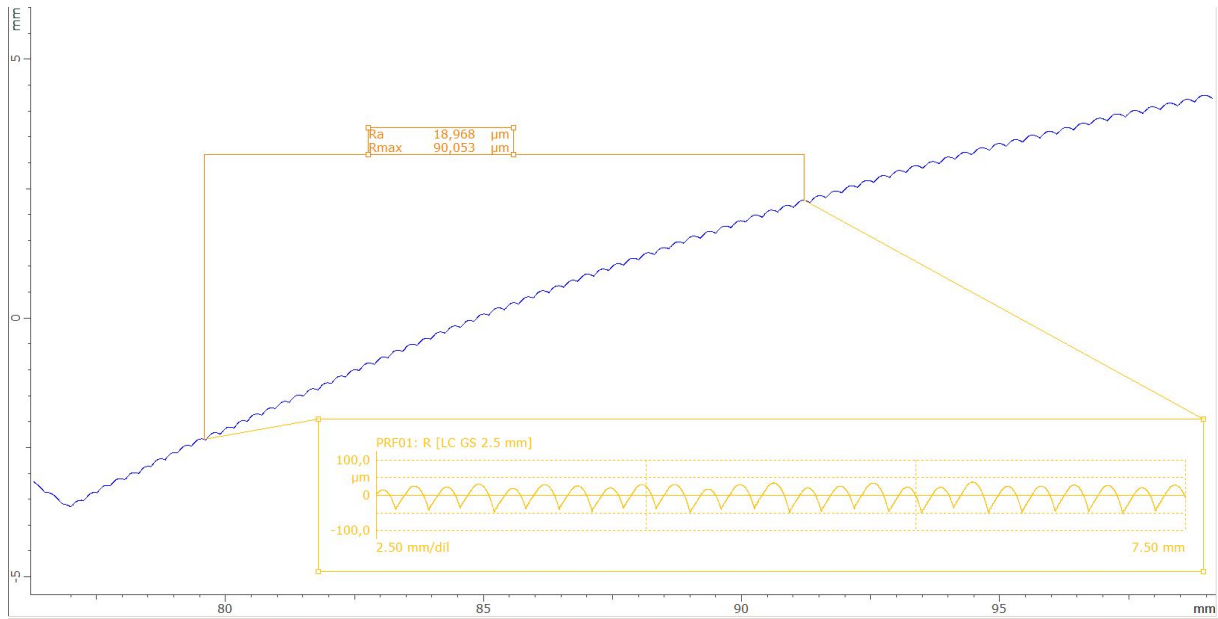


Obrázek 41- Vzorek z Hips po 20 minutách expozice z komoře

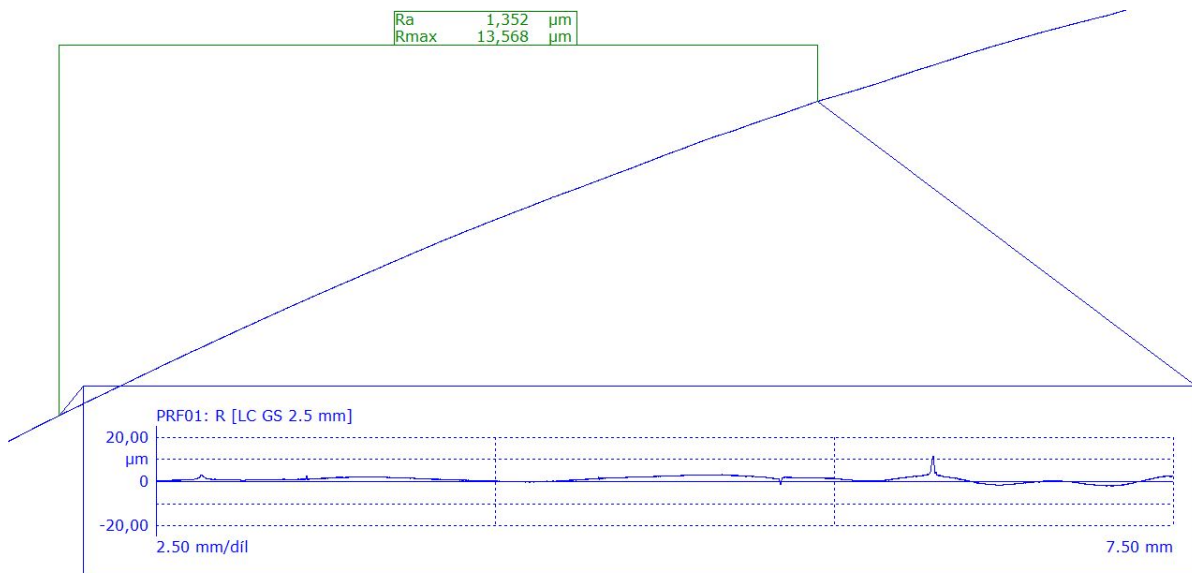
Tabulka 6

	Vzorek	Ra [μm]	Rmax [μm]
Před opíráním	ABS	15,1	76,6
	HIPS	15,8	80
Po oprání	ABS	2,37	11,8
	ABS BT	0,73	4,92
	ABS SK	0,53	3,07
	Hips	0,75	3,07

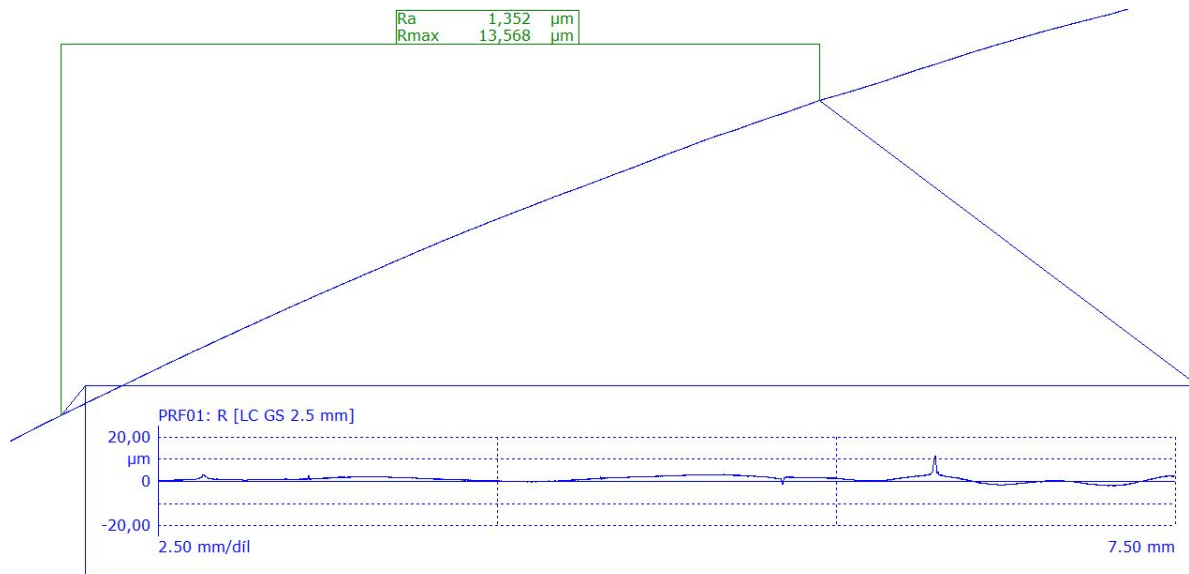
Vizuálně jsou vzorky dostatečně vyhlazeny a měření na konturografu domněnku potvrdilo. Opět je zaznamenána velká změna drsnosti na vybraných úsecích.



Obrázek 42- drsnost ABS před vyhlazením



Obrázek 43- drsnost ABS po vyhlazení na 380mc



Obrázek 44 - drsnost ABS po vyhlazení na F370

Na tomografu jsou naskenovány úspěšně vyhlazené vzorky, kterých nakonec bylo 6. Jedná se o vzorky z ABS vytisknuté na třech strojích, Hips a Asy z prvního vyhlazování.

- Ideální délka expozice pro jednotlivé materiály za použití 30 ml C6000
 - ABS – 1hodina a 20 minut
 - Hips – 20 minut
 - ASA – 1hodina

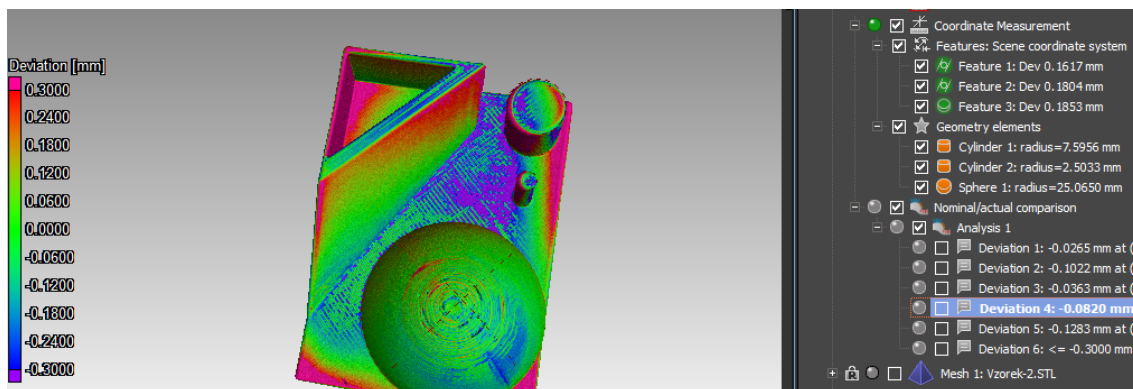
Z této tabulky lze usoudit, že vzorky vyhlazené v acetonových parách zvětšily své rozměry a tím se potvrzuje, že vzorky reagují s acetonem a částečně jsou rozteklé.

Tabulka 7

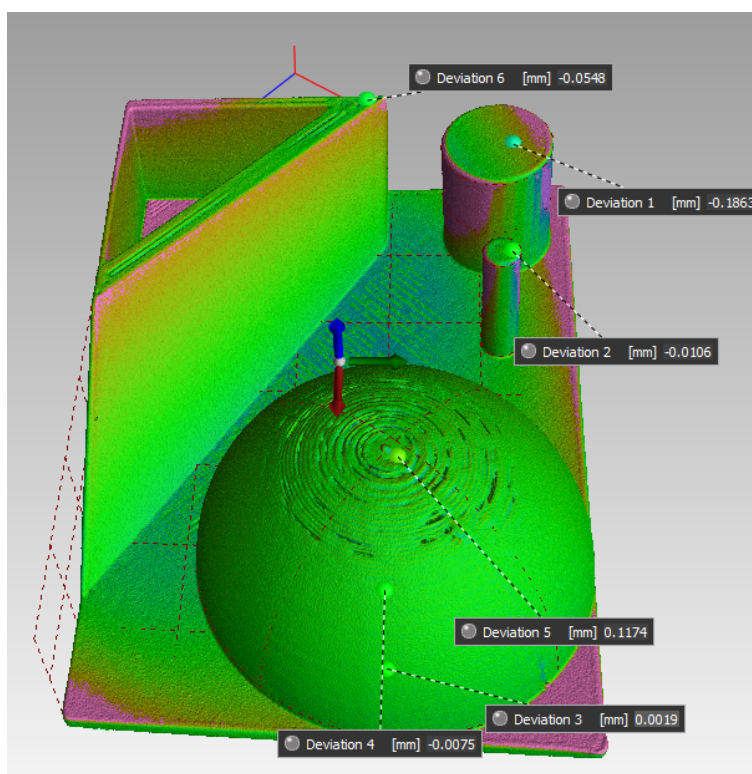
Vzorek	Tiskárna	Poloměr kopule	Průměr válce 1	Průměr válce 2
ABS	Prusa	24,82	7,44	2,45
ABS	F370	25,06	7,59	2,5
ABS	380mc	25	7,48	2,48
ASA	Prusa	24,82	7,44	2,45
ASA	F370	25,02	7,52	2,48
Hips	Prusa	24,83	7,4	2,38

Poznámka – zeleně vyznačené vzorky zvětšily rozměry, bílé vzorky neměly referenční vzorek naskenovaný před vyhlazováním, není tedy možné je vyhodnotit

Ukázka grafického vyhodnocení rozměrů mezi vzorkem před a po vyhlazením. Na první pohled je zřejmé, že vzorek změnil své rozměry v různých místech povrchu. Jak moc je možné zjistit podle barvy a přiřazeného rozsahu, který je v levé části obrázku. V pravé části obrázku je možné vidět rozměry objektů a jejich odchylky, které jsou na sledovaných místech $\pm 0,2$ mm. V rozích vzorku je možné vidět větší odchylky v řádech milimetrů kvůli prohnutí podložky vzorku v acetonové komoře.



Obrázek 45 - grafický znázorněné rozdíly mezi rozměry vzorku před a po opírání



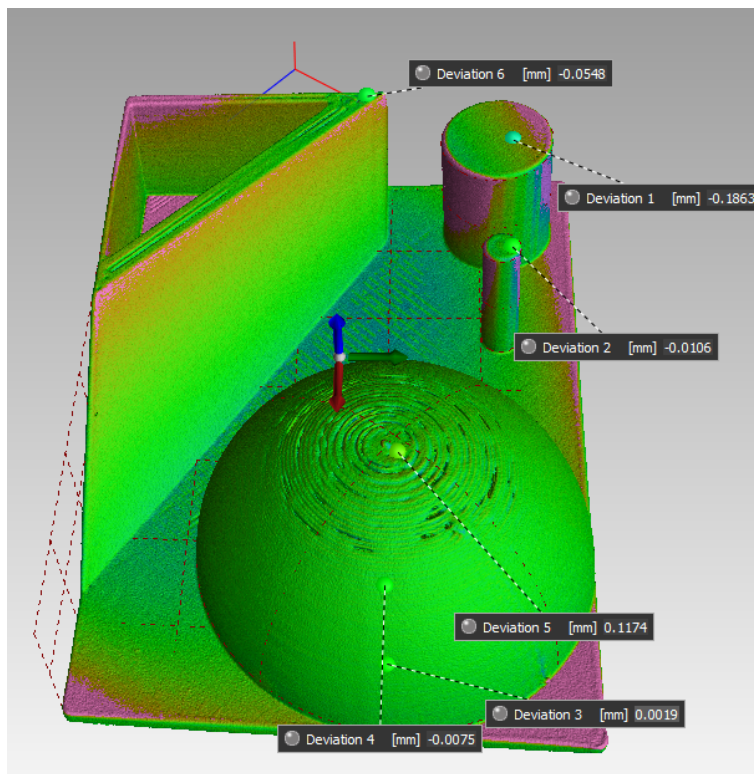
Obrázek 46 - umístění vybraných pozic

Tabulka vyhodnocení odchylek vybraných míst na vzorku po a před vyhlazením

Tabulka 8

Vzorek	Tiskárna	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3	Pozice 4	Pozice 5	Pozice 6
ABS	Prusa	0,04	-0,174	0,018	0,12	-0,039	-0,001
ABS	F370	-0,128	-0,3	-0,026	-0,1	-0,03	-0,082
ABS	380mc	-0,23	-0,21	-0,169	-0,16	0,1	-0,09
ASA	Prusa	0,018	-0,174	-0,04	0,017	0,003	-0,025
ASA	F370	-0,186	-0,01	-0,001	-0,007	0,11	-0,05
Hips	Prusa	0,04	-0,58	0,018	0,002	-0,003	0,003

Dle tabulky 8 je vidět, že ve většině pozic (obrázek 47) pro určitý materiál došlo ke zmenšení objektu oproti neopranému vzorku. Tento jev je přisuzován faktu, že acetonové páry naleptají povrch vzorku, vyhladí ho a mírně změní rozměry objektu. Naleptaný povrchu se rozteče a přesune se díky gravitaci níže.



Obrázek 47 - umístění vybraných pozic

11. ZÁVĚR

V první části byl vysvětlen pojem aditivní technologie, shrnuta historie 3D tisku obecně, dále byly rozepsány hlavní metody aditivních technologií tisku plastů a byly popsány materiály, které byly použity na tisk vzorku a dále byly zmíněny nejčastěji používané materiály FDM tisku.

Ve druhé části byl vymodelován vzorek, který byl následně pomocí Prusa sliceru a Grabcadu vyexportován v souboru gcode, který tiskárně definoval všechny potřebné parametry a cesty. Po vytištění vzorků z různých materiálů byly změřeny rozměry posuvným měřítkem. Dále byly vzorky naskenovány jako mraky bodů pomocí tomografu Zeiss Metrotom 1500 a vyhodnoceny v programu VGS Studio. Třetím měřicím zařízením byl konturograf Marsurf LD 120, na kterém byla vyhodnocena drsnost v určitých bodech vytisknutých vzorků.

Po vytištění a naměření byly vzorky vystaveny expozici acetonových par v acetonové komoře, která změnila rozměry a parametry povrchu. Komoře byla správně zkonstruována a již při první expozici docházelo k rovnoměrnému vyhlazení všech vzorků. Prostor na zlepšení komory bylo možné najít například v recyklaci acetonu a cyklování procesu leptání a sušení vzorků. První vyhlazení bylo stanoveno na 1 hodinu pro všechny vzorky stejně, a to z důvodu sledování rozdílného rozsahu změn u každého vzorku. Tyto změny byly opět naměřeny a vyhodnoceny graficky v programu VGS studiu a na konturografu. Z první sady vzorků bylo zjištěno, že nejlépe vyhlazené vzorky byly z materiálu ASA a to po expozici 1 hodině ve 30 mililitrech acetonového rozpouštědla C6000.

Vzorek ASA vytisknutý na tiskárně Prusa MK3s dosahoval před vyhlazováním drsnosti R_a 13,3 μm a po 1 hodině v acetonových parách se R_a změnilo na 0,43 μm . Obdobně to bylo u vzorku vytisknutého z ASA na tiskárně F370, kde docházelo ke změně drsnosti R_a z 17,1 μm na 0,95 μm . Kompletní výsledky všech materiálů byly zaznamenány v tabulce 5.

Vzhledem k tomu, že ABS materiál neryl po první expozici dostatečně vyhlazen, rozhodl jsem se vytisknout vzorky znovu na třech různých tiskárnách a vystavit je acetonovým parám ještě jednou a déle. Vzorek z materiálu Hips byl naopak vyhlazen moc a také byl vytisknut znovu, aby mohla být stanovena ideální doba expozice v komoře. Proces byl opakován a byla stanovena ideální doba expozice materiálu ABS na 1 hodinu a 20 minut. Zlepšení R_a bylo opět markantní, a to z původních 15,1 μm na 2,37 μm u vzorku z tiskárny Prusa MK3S, na 0,73 μm u vzorku z tiskárny 380mc a na 0,53 μm u vzorku z tiskárny F370. Kompletní výsledky vyhlazování druhého tisku byly zaznamenány v tabulce 6. Opět bylo použito 30 mililitrů C6000.

U materiálu Hips byl čas stanoven na 20 minut se stejnými parametry. Změna drsnosti materiálu R_a byla z původních 15,6 μm na 0,75 μm po vyhlazování v komoře.

Závěrem je důležité zmínit, že po překročení doporučených délek dochází k větším degradacím materiálu a je tedy vhodné díly z komory vyndat. Rychlost a míra vyhlazování opravdu záleží na obsahu styrenu v materiálu a lze z výsledku usoudit, že nejvíce styrenu je obsaženo v materiálu Hips. V materiálu ASA bylo více styrenu než v ABS a díky tomu byla ideální doba vyhlazování kratší. Acetonové páry jsou vhodný druh post-procesingu pro povrchové vyhlazení výše zmíněných materiálů a lze rozhodně doporučit používání této metody za použití acetonové komory.

12. SEZNAM ZDROJŮ

- [1] - BELLIS, Mary. History of Computer Printers. *Thoughtco* [online]. 2019 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-computer-printers-4071175>
- [2] - History of 3D Printing. *3dprintingindustry* [online]. 2017 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>
- [3] - The History of 3D Printing. *3dprintingindustry* [online]. 2020 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history>
- [4] - GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies. *Additive Manufacturing Technologies* [online]. Second. New York: Stucker, 2016, 2020 [cit. 2020-07-11]. ISBN 10.1007/978-1-4939-2113-3_20. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4939-2113-3.pdf>
- [5] - BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 2020 [cit. 2020-07-11]. ISBN 10.1007/978-1-4939-2113-3_20. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [6] - *The basics - What is 3D printing?* [online]. 2020 [cit. 2020-07-15]. ISBN 10.1007/978-1-4939-2113-3_20. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/#basics>
- [7] - *3D Printing Processes* [online]. 2017 [cit. 2020-07-11]. ISBN 10.1007/978-1-4939-2113-3_20. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [8] - *A review on 3D micro-additive manufacturing technologies* [online]. Second. Germany, 2013, 2017 [cit. 2020-07-11]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-012-4605-2.pdf>
- [9] - BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. *Introduction to SLS 3D printing* [online]. Second. 2020 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/#what>
- [10] - *PLA Filament* [online]. 2020 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0762/2839/files/TDS_PLA_Filament.pdf?1776946288798946561
- [11] - *Prusament PLA od Prusa Polymers* [online]. 2018 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf
- [12] - *Prusament PETG* [online]. 2020 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/802-prusament-petg-jet-black-1kg.html>
- [13] - RAMAN PARASHAR, SANJEEV. *Everything You Need to Know About ABS Plastic* [online]. 2015 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>
- [14] - *Hips* [online]. 2020 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/hips/>
- [15] - *PC* [online]. 2020 [cit. 2020-07-25]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pc/>

- [16] - *Flexfill TPU (Flexible)* [online]. Second. [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpu-flexible-filament>
- [17] - *Bronzefill tisková struna* [online]. 2020 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/84-bronzefill-tiskova-struna-filament-750g.html>
- [18] - *3D printing trends 2020* [online]. 2020 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/get/trends>
- [19] - *Introduction to Trabecular Titanium* [online]. 2020 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://limacorporate.com/aboutus.html?b=technology>
- [20] - *Customised silicone heart valves* [online]. Zürich, 2019 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/07/herzklappen-aus-silikon.html>
- [21] - *Metal X System* [online]. 2020 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://markforged.com/metal-x/#materials>
- [22] - *PRODUCTION FACTORS INFLUENCING MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF FDM PRINTED EMBOSSED DIES* [online]. 2018 [cit. 2020-07-23]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328672825_PRODUCTION_FACTORS_INFLUENCING_MECHANICAL_AND_PHYSICAL_PROPERTIES_OF_FDM_PRINTED_EMBOSSED_DIES
- [23] - *A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties* [online]. 2020 [cit. 2020-07-24]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319322706>
- [24] - ARMSTRONG, Courtney. *Post processing for FDM printed parts* [online]. 2020 [cit. 2020-07-24]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#sanding>
- [25] - *Stratasys Smoothing Station Makes FDM Parts as Smooth as Injection Molding* [online]. 2014 [cit. 2020-07-24]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://investors.stratasys.com/news-events/press-releases/detail/149/stratasys-smoothing-station-makes-fdm-parts-as-smooth-as>
- [26] - *Acetone* [online]. 2020 [cit. 2020-07-24]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetone#section=Experimental-Properties>
- [27] - *3D print* [online]. 2020 [cit. 2020-07-24]. ISBN 10.1007/s00170-012-4605-2. Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/images.hamlethub.com/hh20mediafolder/photo1032.jpeg>
- [28] - SVĚTLÍK, David. *POVRCHOVÁ ÚPRAVA ABS SOUČÁSTÍ PO 3D FDM TISKU* [online]. In: . 2015 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e3fc/330f40f06865207555f71b000b20e97513c9.pdf>
- [29] - *XTC-3D* [online]. 2020 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <https://www.silikonysro.cz/epoxyd/xtc-3d>
- [30] - *Styren* [online]. 2020 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <https://arnika.org/styren>

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 – Možnosti tisku [27]
Obrázek 2 - Odstranění podpor [6]
Obrázek 3 - princip SLA [7]
Obrázek 4 - SLA při tisku [7]
Obrázek 5 - princip SLS [8]
Obrázek 6 - princip FDM [10]
Obrázek 7 - druhy post-procesingu [13]
Obrázek 8 - Termoplasty dostupné při tisku FDM metodou [5]
Obrázek 9 - testovací vzorek [11]
Obrázek 10- aktuální přehled aditivních technologií [5]
Obrázek 11- kloubní náhrady firmy Lima Corporate [19]
Obrázek 12 - srdeční chlopeč [20]
Obrázek 13 - základní nastavení tisku v programu Prusaslicer pro materiál ASA
Obrázek 14 - orientační mapa celého procesu [23]
Obrázek 15 - součást před a po broušení [23]
Obrázek 16 - výtisk po nanošení plniče a laku [24]
Obrázek 17 - zámky určené ke zlepšení spojů při lepení [24]
Obrázek 18 - 3D model vzorku
Obrázek 19 - schéma acetonové komory
Obrázek 20 - acetonová komora
Obrázek 21 - schodovitý efekt způsobený FDM metodou, kde Θ je sklon plochy ku vertikále [28]
Obrázek 22 - schodovitý efekt na kopuli vytištěného vzorku
Obrázek 23 - skenování vzorků v CT Zeiss Metrotom 1500
Obrázek 24 - měření drsnosti kopule na konturografu na zařízení Marsurf LD 120
Obrázek 25 a 26 - zleva Prusa MK3S a Stratasys F370
Obrázek 27- vzorky před opráním
Obrázek 28- vzorky po hodině v komoře
Obrázek 29 - skica modelu vzorku
Obrázek 30 - ideálně opraný vzorek ASA vytisknutý na Prusa MK3S
Obrázek 31 (vlevo) a obrázek 32 (vpravo) - pozice stolu ve stroji (vlevo) a nastavení času a rozlišení snímků (vpravo)
Obrázek 33 - grafické vyhodnocení velikosti vzorku z ABS a 3D modelu v CAD
Obrázek 34 - drsnost kopule před vyhlazením
Obrázek 35 - drsnost kopule po vyhlazení
Obrázek 36 - drsnost plochy před vyhlazením
Obrázek 37 - drsnost plochy po vyhlazení
Obrázek 38 - Vzorky z ABS před opíráním
Obrázek 39 - Vzorky z ABS po oprání
Obrázek 40- Vzorek z Hips po 20 minutách expozice z komoře
Obrázek 41- drsnost ABS před vyhlazením
Obrázek 42- drsnost ABS po vyhlazení na 380mc
Obrázek 43 - drsnost ABS po vyhlazení na F370
Obrázek 44 - grafický znázorněné rozdíly mezi rozměry vzorku před a po opírání
Obrázek 45 - umístění vybraných pozic
Obrázek 46 - umístění vybraných pozic