

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Kvalita a charakterizace 3D tištěných modelů

Bakalářská práce

2023

Veronika Petrová

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Veronika Petrová**  
Osobní číslo: **C20169**  
Studijní program: **B0531A130014 Polygrafie**  
Téma práce: **Tisk a charakterizace 3D tištěných modelů**  
Zadávací katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte rošerši v patentové, vědecké a firmní literatuře na téma 3D tisku technologiemi SLA a FDM.
2. Seznamte se s přístupy, jak se hodnotí kvalita 3D tisku daných tiskových technik a vytvořte vlastní testovací obrazec.
3. Za použití vhodných tiskových materiálů a vybraných 3D technologií tisku vytiskněte testovací obrazec za různých tiskových podmínek.
4. Proveďte charakterizaci vzorků vytištěných danou tiskovou technikou a komentujte vliv volených parametrů tisku na dosaženou kvalitu tisku.
5. Z provedených analýz vyvoďte závěry a doporučení.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.**  
Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **30. června 2023**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Kvalita a charakterizace 3D tištěných modelů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Veronika Petrová v.r.

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu své práce panu doc. Ing. Tomáši Syrovému, Ph.D. za pomoc a poskytnuté odborné rady při zpracování bakalářské práce. Také bych chtěla poděkovat panu Ing. Filipovi Jakešovi z firmy RMI za proměření vzorků a zpracování dat drsnosti. Největší poděkování patří mé rodině a přátelovi, kteří při mě po celou dobu studia stáli a ve studiu mě podporovali.

Bakalářská práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16\_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

**MŠMT**  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

## ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá kvalitou tisků realizovaných pomocí 3D tisku technologií FDM. Cílem je vyhodnocení vlivů chemického vyhlazování na vytištěné modely. V teoretické části se zabývá jednotlivými metodami 3D tiskových technologií a možnostmi dokončovacího zpracování. V experimentální části se věnuje realizaci testovacích obrazců a zhodnocení jejich kvality. Dále se věnuje vlivům chemického vyhlazování na změnu kvality výtisků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, kvalita tisku, vyhlazování povrchu parami rozpouštědla, drsnost

## TITTLE

Quality and characterization of 3D printed models

## ANNOTATION

This bachelor theses deals with quality of prints realized using 3D printing technology FDM. The purpose of this work is evaluation of the effects of chemical smoothing on printed models. In the theoretical part it deals individual methods of 3D printing technologies and options in finishing processing. In the experimental part is dedicated to implementation test patterns and evaluation of their quality. It also deals with influences chemical smoothing to change the quality of prints.

## KEYWORDS

3D printing, printing quality, surface smoothing with solvent vapors, roughness

# OBSAH

|  |    |
|--|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ.....  | 10 |
| SEZNAM TABULEK .....   | 11 |
| ÚVOD.....  | 12 |
| 1 Teoretická část .....  | 13 |
| 1.1 3D tisk.....   | 13 |
| 1.1.1 Historie 3D tisku.....   | 13 |
| 1.1.2 Využití 3D tisku.....  | 14 |
| 1.1.3 Výhody a nevýhody 3D tisku .....   | 14 |
| 1.2 Typy 3D tiskových technologií .....  | 15 |
| 1.2.1 Objekty vytvořené fotopolymerací .....   | 15 |
| 1.2.2 Objekty vytvořené spékáním a pojením práškového materiálu.....   | 17 |
| 1.2.3 Objekty vytvořené přímým inkoustovým tiskem .....  | 20 |
| 1.2.4 Objekty vytvořené přímým energetickým nanášením (z anglického DED –<br>Direct Energy Deposition) ..... | 21 |
| 1.2.5 Objekty vytvořené laminováním listu.....   | 21 |
| 1.3 FDM tisk .....   | 22 |
| 1.4 Tiskové materiály pro FDM tisk .....   | 23 |
| 1.4.1 Kyselina polymléčná (PLA) .....  | 23 |
| 1.4.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS).....  | 24 |
| 1.4.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA) .....  | 24 |
| 1.5 Dokončovací zpracování 3D tištěných objektů.....   | 25 |
| 1.5.1 Odstraňování nosné konstrukce .....  | 25 |
| 1.5.2 Broušení výtisku .....   | 25 |
| 1.5.3 Vyhlazování povrchu výtisku parami rozpouštědla.....   | 26 |
| 1.5.4 Barvení a lakování výtisků .....   | 28 |
| 1.5.5 Další typy dokončovacího zpracování .....  | 28 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2     | Experimentální část .....                                      | 29 |
| 2.1   | Použitá zařízení .....   | 29 |
| 2.2   | Použité materiály.....   | 29 |
| 2.3   | Tisk testovacích obrazců a hodnocení jejich kvality .....      | 29 |
| 2.3.1 | Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu PLA .....         | 31 |
| 2.3.2 | Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu ABS .....         | 32 |
| 2.3.3 | Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu ASA.....          | 33 |
| 2.3.4 | Tisk malých testovacích obrazců z filamentu ABS a ASA .....    | 34 |
| 2.4   | Vyhlazování povrchu modelů acetonovými parami .....            | 35 |
| 2.4.1 | Vyhlazování povrchu u ABS výtisků .....                        | 36 |
| 2.4.2 | Vyhlazování povrchu u ASA výtisků .....                        | 40 |
| 2.5   | Hodnocení změny hmotnosti vyhlazovaných výtisků.....           | 44 |
| 2.6   | Změna rozměrů u jednotlivých objektů .....                     | 45 |
| 2.6.1 | Změna rozměrů u ABS výtisků .....                              | 45 |
| 2.6.2 | Změna rozměrů u ASA výtisků .....                              | 49 |
| 2.7   | Změna rozměrů (obrazová analýza).....                          | 52 |
| 2.7.1 | Obrazová analýza pro vyhlazované výtisky z filamentu ABS ..... | 52 |
| 2.7.2 | Obrazová analýza pro vyhlazované výtisky z filamentu ASA ..... | 54 |
| 2.8   | Drsnost povrchu hranolu .....                                  | 56 |
| 3     | Závěr.....   | 59 |
|       | POUŽITÁ LITERATURA .....                                       | 60 |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Rozdělení 3D tiskových technologií .....                                 | 15 |
| Obrázek 2: Princip technologie SLA .....  | 16 |
| Obrázek 3: Princip technologie DLP .....  | 17 |
| Obrázek 4: Princip technologie SLS.....   | 18 |
| Obrázek 5: Princip technologie MJF .....  | 19 |
| Obrázek 6: Princip technologie BJ .....   | 19 |
| Obrázek 7: Princip technologie EBM.....   | 20 |
| Obrázek 8: Princip technologie Polyjet .....  | 21 |
| Obrázek 9: Princip technologie LOM.....   | 22 |
| Obrázek 10: Princip technologie FDM.....  | 22 |
| Obrázek 11: Schéma výroby PLA .....   | 23 |
| Obrázek 12: Chemická struktura ABS.....   | 24 |
| Obrázek 13: Malý (vlevo) a velký (vpravo) testovací obrazec.....                    | 30 |
| Obrázek 14: Velké PLA testovací obrazce.....  | 32 |
| Obrázek 15: Velké ABS testovací obrazce.....  | 33 |
| Obrázek 16: Velká ASA testovací obrazce.....  | 34 |
| Obrázek 17: Zdeformovaný ABS výtisk s kvalitou tisku 0,1 mm .....                   | 35 |
| Obrázek 18: Proces vyhlazování výtisků acetonovými parami .....                     | 35 |
| Obrázek 19: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s kvalitou tisku 0,3 mm..... | 37 |
| Obrázek 20: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s rozlišením 0,15 mm.....    | 38 |
| Obrázek 21: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s kvalitou tisku 0,1 mm..... | 40 |
| Obrázek 22: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s kvalitou tisku 0,3 mm..... | 41 |
| Obrázek 23: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s rozlišením 0,15 mm.....    | 43 |
| Obrázek 24: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s rozlišením 0,1 mm.....     | 44 |
| Obrázek 25: Závislost změny hmotnosti ABS výtisků na době vyhlazování .....         | 44 |
| Obrázek 26: Závislost změny hmotnosti ASA výtisků na době vyhlazování .....         | 45 |
| Obrázek 27: Změna rozměru podložky u ABS ve směru A.....                            | 46 |
| Obrázek 28: Změna rozměru podložky u ABS ve směru B.....                            | 46 |
| Obrázek 29: Změna výšky kuželu u ABS výtisku .....                                  | 47 |
| Obrázek 30: Změna šířky kuželu u ASB výtisku.....                                   | 47 |
| Obrázek 31: Změna výšky kváдру u ABS výtisku.....                                   | 48 |
| Obrázek 32: Změna šířky kváдру u ABS výtisku .....                                  | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 33: Změna rozměrů podložky u ASA ve směru A.....                      | 49 |
| Obrázek 34: Změna rozměrů podložky u ASA ve směru B.....                      | 49 |
| Obrázek 35: Změna výšky kuželu u ASA výtisku .....                            | 50 |
| Obrázek 36: Změna šířky kuželu u ASA výtisku.....                             | 50 |
| Obrázek 37: Změna výšky kvádrů u ASA výtisku.....                             | 51 |
| Obrázek 38: Změna šířky kvádrů u ASA výtisku .....                            | 51 |
| Obrázek 39: Změna plochy kvádrů u ABS výtisků .....                           | 52 |
| Obrázek 40: Číslování linek .....   | 53 |
| Obrázek 41: Změna délky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm.....      | 53 |
| Obrázek 42: Změna tloušťky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm .....  | 54 |
| Obrázek 43: Změna plochy kvádrů u ASA výtisků .....                           | 54 |
| Obrázek 44: Změna délky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm.....      | 55 |
| Obrázek 45: Změna tloušťky linek u ASA výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm .....  | 55 |
| Obrázek 46: Změna drsnosti ABS hranolu v závislosti na době vyhlazování ..... | 56 |
| Obrázek 47: Nakloněná rovina ABS hranolu v průběhu vyhlazování.....           | 57 |
| Obrázek 48: Změna drsnosti ASA hranolu v závislosti na době vyhlazování ..... | 58 |
| Obrázek 49: Nakloněná rovina ASA hranolu v průběhu vyhlazování.....           | 58 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1: Chemická odolnost materiálů pro 3D tisk .....                                   | 26 |
| Tabulka 2: Vysvětlivky k tabulce 1 .....   | 27 |
| Tabulka 3: Nastavené parametry tisku pro malý testovací obrazec.....                       | 30 |
| Tabulka 4: Nastavené parametry tisku pro velký testovací obrazec.....                      | 31 |
| Tabulka 5: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm .....  | 36 |
| Tabulka 6: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,15 mm ..... | 38 |
| Tabulka 7: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm .....  | 39 |
| Tabulka 8: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm .....  | 41 |
| Tabulka 9: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,15 mm ..... | 42 |
| Tabulka 10: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm ..... | 43 |
| Tabulka 11: Rozdělení linek do skupin A – D .....  | 53 |

## ÚVOD

Před příchodem 3D tisku bylo možné realizovat trojrozměrné předměty pouze pomocí konvenčních metod, jako je vstřikování plastů do formy nebo obrábění. Avšak tyto metody mají několik nevýhod, ať už z hlediska velkého množství odpadního materiálu nebo z hlediska spotřeby energie. Hlavním cílem bylo vytvoření technologie, pomocí níž bude možné reprodukovat trojrozměrné předměty v krátkém časovém úseku, s minimálním množstvím dodávané energie a jejich výroba bude ekonomicky výhodná. Od 90. let je 3D tisk neustále vyvíjen a rozšiřován do mnoha odvětví.

Výhodou 3D tiskových technologií jsou nízké vstupní a provozní náklady. Vybranými 3D tiskovými technologiemi lze také připravit struktury, které jinými konvenčními technologiemi zhotovit nelze.

Velmi rozšířenou technologií 3D tisku je FDM tisk, který je jednou z nejdostupnějších a nejjednodušších aditivních technologií. Díky pestré nabídce filamentů, které se při FDM tisku využívají, lze se správným nastavením reprodukovat v podstatě jakýkoliv předmět (matný, lesklý, třpytivý, svítící ve tmě, vodivý). Pro dosažení požadovaného vzhledu lze povrch výtisků dále upravovat například broušením nebo chemickým vyhlazováním. Povrch výtisků je možné také barvit nebo lakovat.

Cílem této bakalářské práce je zhodnocení kvality reprodukováných předmětů v závislosti na nastavené kvalitě tisku – výšce jednotlivých vrstev. Pro porovnání byly výtisky vytištěny ze tří druhů filamentů. Dalším cílem je stanovení optimální doby vyhlazování povrchu výtisku parami acetonu a rovněž zhodnocení vlivu vyhlazování na drsnost a změnu rozměrů jednotlivých struktur.

# 1 Teoretická část

## 1.1 3D tisk

3D tisk je tisková technologie založená na principu vzniku trojrozměrného objektu postupným nanášením materiálu vrstvu po vrstvě. Realizace předmětu probíhá na základě digitálních dat. Pro tvorbu tiskových dat lze vybírat jak z volně dostupných softwarových programů (Tinkercad, Blender, Freecad), tak z programů placených (Autodesk 3ds Max, Fusion 360, Cinema 4D).

Po zhotovení modelu v příslušném CAD programu je zapotřebí objekt importovat do příslušného programu, který umožňuje tzv. slicování objektu (rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy pro tisk). Mezi hojně využívané programy patří PrusaSlicer, Cura, Slic3r a Simplify3d. Ve slicovacím programu lze nastavit různé parametry (například rychlost tisku, teplotu tisku, teplotu podložky, množství výplně objektu či materiál).

V momentě, kdy je objekt rozdělen na jednotlivé vrstvy pro tisk, jsou data exportována v souboru g-kódu vygenerovaným zvláště pro každou tiskovou vrstvu (g-kód obsahuje instrukce pro pohyb tiskové hlavy v osách x, y a z a instrukce pro generování požadovaných vrstev). Data lze do tiskárny dodat s využitím Wi-fi sítě, USB zařízení nebo SD karty.

### 1.1.1 Historie 3D tisku

První zmínky o 3D tisku jsou datovány do 70. let 20. století. Za průkopníka 3D tisku je považován Dr. Hideo Kodama, který roku 1981 popsal aditivní technologii nanášení fotocitlivé pryskyřice vrstvu po vrstvě s následným vytvrzením pomocí UV záření. O pár let později využili stejné technologie francouzští inženýři Alain Le Méhauté, Olivier de Witte a Jean-Claude André, kteří od výzkumu upustili kvůli nedostatku obchodní perspektivy. Ve stejné době zkoumal princip vytvrzování fotocitlivé pryskyřice také americký inženýr Chuck Hull, který si nechal roku 1986 technologii s názvem stereolitografie (SLA) patentovat. O dva roky později se stal Chuck Hull spoluzakladatelem firmy 3D Systems, která je dodnes jednou z největších firem zabývajících se 3D tiskem. Ke konci 90. let firma vytvořila první komerčně dostupné zařízení pro tisk trojrozměrných objektů, známé pod zkratkou SLA-1 [1, 2]. Díky tomuto obrovskému pokroku je Chuck Hull považován za vynálezce 3D tisku.

S příchodem stereolitografie vzrostlo povědomí o 3D tisku a rozrostl se zájem o objevení nových principů 3D tisku. Stejněho roku (tedy roku 1988) byla americkým

vynálezcem Carl Robertem Deckardem objevena 3D tisková technologie se zkratkou SLS (Selective Laser Sintering). V případě technologie SLS vzniká trojrozměrný objekt postupným spékáním práškového termoplastického materiálu s využitím laseru. První komerčně dostupná tiskárna využívající technologii SLS byla vydána roku 2006 [2].

O rok později (roku 1989) byla objevena další 3D tisková technologie se zkratkou FDM (Fused Deposition Modeling). O objev se zasloužil zakladatel společnosti Stratasys Ltd. Steven Scott Crump spolu se svojí manželkou. Technologie FDM funguje na principu tavení pevného termoplastického materiálu za vysokých teplot. Po vytlačení roztaveného termoplastu dochází k jeho okamžitému zatuhnutí [3].

### 1.1.2 Využití 3D tisku

Vznik těchto tří technologií (SLA, SLS a FDM) vedl k rozšíření povědomí o 3D tisku a vývoji nových 3D tiskových principů. 3D tisk našel své uplatnění v mnoha oblastech, například ve zdravotnictví (tisk implantátů, protéz, orgánů, léků), automobilovém průmyslu (součástky, konstrukční díly) nebo průmyslu leteckém. 3D tiskové technologie jsou velmi často využívány například k tisku prototypů, domácích potřeb, hraček, náradí, šperků, jídla, nemovitostí a mnoha dalších předmětů [4]. 3D tisk je považován za velice rychle se rozrůstající technologii, která se vyvíjí každý den.

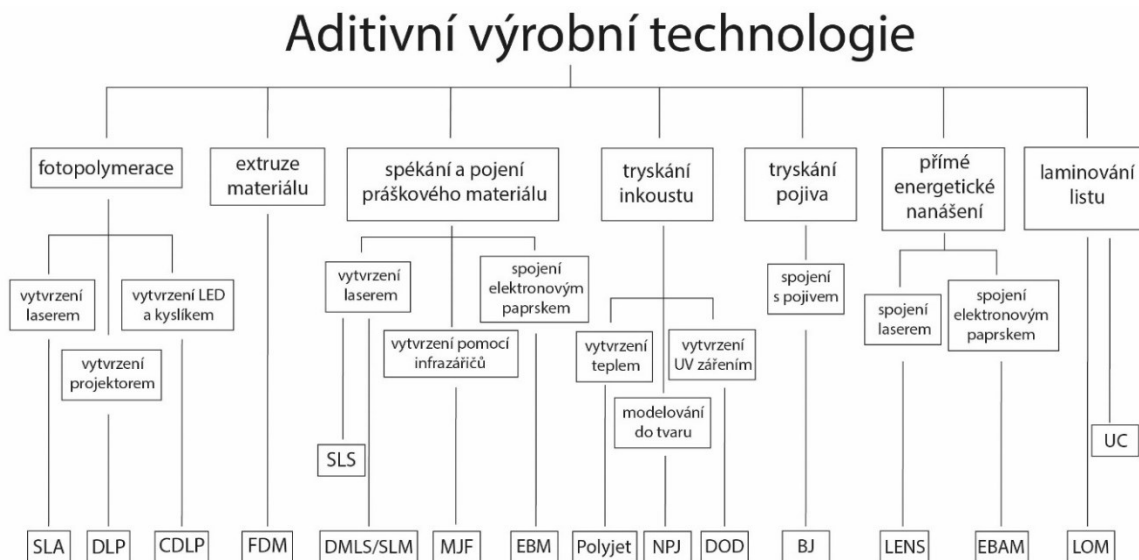
### 1.1.3 Výhody a nevýhody 3D tisku

Výhodami 3D tisku je především jednoduchost, dostupnost a cenová náročnost. 3D tiskové technologie také umožňují tisk složitějších modelů a struktur v relativně rychlém časovém sledu (na rozdíl od klasických výrobních procesů) [5].

Nevýhodou 3D tisku je jisté omezení z hlediska tisku (tisk je možné provádět pouze do určitých rozměrů). Další nevýhodou může být nutnost dokončovacího zpracování vytištěného předmětu (broušení, vyhlazování, odstranění podpurného materiálu, kompletace dílů). Mezi potenciální nevýhody patří také možnost vyhotovení reálných padělků nerozeznatelných od originálních děl [5].

## 1.2 Typy 3D tiskových technologií

V roce 2017 byly 3D tiskové technologie rozřazeny do sedmi kategorií podle principu vzniku trojrozměrného objektu [6]. Toto rozdělení je zobrazené na obrázku 1.



Obrázek 1: Rozdělení 3D tiskových technologií (upraveno z [7])

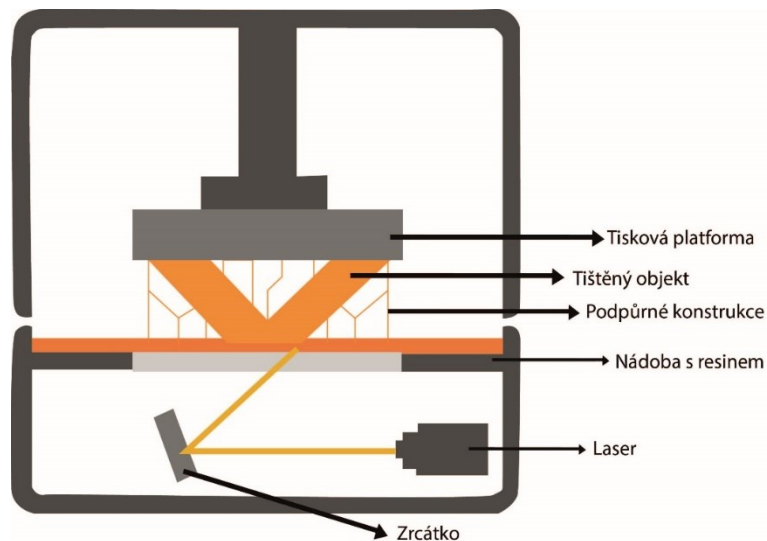
### 1.2.1 Objekty vytvořené fotopolymerací

Polymerace iniciovaná fotoiniciátory (zkráceně fotopolymerace) ve směsi monomerů (oligomerů) je reakcí řetězovou. Důsledkem fotochemických dějů dochází ke vzniku aktivních center. Nejčastěji využívanými fotopolymeracemi jsou fotopolymerace radikálová a kationtová.

Třemi hlavními kroky fotopolymerace jsou iniciace, propagace a terminace. Počátkem fotopolymerace je proces zvaný iniciace, při kterém dochází ke vzniku již zmíněných aktivních center (důsledkem absorpce záření). Následuje propagace, při níž vytvořená aktivní centra reagují s monomerními jednotkami a zapojují se do řetězce pomocí kovalentních vazeb. Posledním krokem je terminace, kdy dochází k zániku aktivních center [8].

První 3D tiskovou technikou v této kategorii je technologie stereolitografie (SLA). Součástí tiskárny využívající tuto technologii je nádoba naplněná tekutou fotopolymerizační kompozicí (tzv. resinem). Kompozice je složena z monomerů, oligomerů a fotoiniciátorů, které absorbují záření v oblasti emise expozičního zdroje. Nejčastěji využívaným zdrojem záření je laser o vlnové délce v rozsahu 355–405 nm. Trojrozměrný objekt pak vzniká selektivním vytvrzováním fotopolymerizační kompozice vrstvu po vrstvě pomocí laserového paprsku. Pro vytvrzení první vrstvy je tisková platforma posunuta pod hladinu fotopolymerizační kompozice

do těsné blízkosti dna nádoby tiskárny. Po expozici je posunuta směrem nahoru o cca tloušťku tiskové vrstvy. Výsledný objekt tedy vzniká vzhůru nohama (zdroj záření může být umístěn i nad nádobou a v tom případě se tisková podložka posouvá směrem dolů, předmět tak vzniká obráceně). Celý postup je opakován do doby vzniku předmětu (do momentu vytvrzení všech vrstev) [9,10]. Schéma principu technologie SLA (s umístěním laserového zdroje pod nádobou) je zobrazeno na obrázku 2.



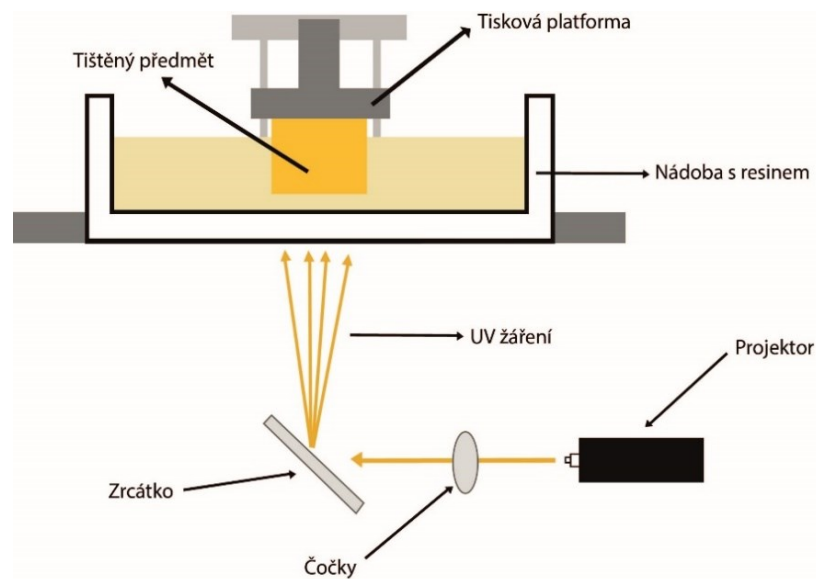
Obrázek 2: Princip technologie SLA (upraveno z [11])

Technologie SLA je považována za nejpřesnější 3D tiskovou technologii. Vytisknuté předměty disponují vysokým rozlišením (u komerčních produktů je uváděné rozlišení 0,025 mm) a ostrými detaily. I kvalita povrchu výtisku je na velice vysoké úrovni. Nevýhodou SLA je nutnost tisku s podpůrnými konstrukcemi a je tedy potřebné zařazení dokončovacího zpracování tisku (vyhlazení chemickými parami, pískování, broušení, galvanické pokovování niklem) [12]. Pro zlepšení mechanických vlastností lze výtisk omýt v isopropylalkoholu, vysušit či dodatečně vytvrdit UV zářením.

Na podobném principu, z hlediska tvorby trojrozměrného předmětu, funguje technologie MSLA (Masked Stereolithography) známá také pod názvem maskovaná stereolitografie. V případě této technologie je namísto laserového paprsku využíván LCD displej, který slouží jako maskovací (strukturovací) prvek [13]. Vrstvy předmětu jsou rozděleny na bílé a černé pixely. Bílé pixely představují místa, na kterých dochází k selektivnímu propuštění UV záření z UV-LED diod. Naopak tmavé pixely záření nepropouštějí a na těchto místech nedochází k tvorbě objektu. Na tomto principu funguje například tiskárna Original Prusa SL1 [14].



Další 3D tiskovou technikou je technologie se zkratkou DLP (Digital Light Processing). Tato technologie využívá stejný princip jako SLA, avšak s rozdílem zdroje záření. Zatímco v případě SLA je zdrojem záření laser, u technologie DLP je jím speciální projektor – DLP chip. DLP chip umožňuje provést strukturovaný osvit UV zářením přímo do fotopolymerní pryskyřice pomocí mikrozrcátka. Díky tomu dochází k ozáření (a tedy vytvrzení) celé tiskové plochy najednou. To dále vede k tomu, že výsledný předmět je vytištěn metodou DLP v kratším časovém úseku. Další výhodou je možnost využití mělčí nádoby s fotopolymerní pryskyřicí (nižší náklady a menší množství odpadu) [9]. Schéma technologie DLP je zobrazené na obrázku 3.



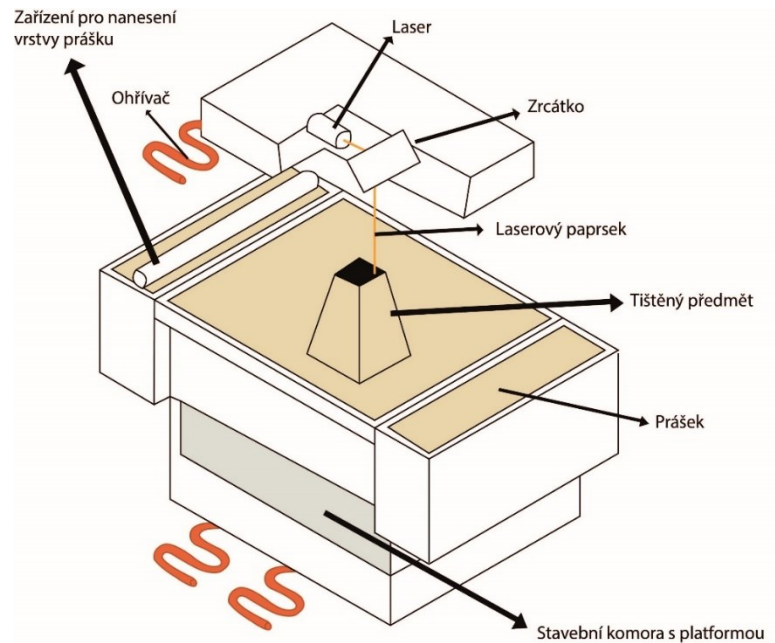
Obrázek 3: Princip technologie DLP (upraveno z [15])

### 1.2.2 Objekty vytvořené spékáním a pojením práškového materiálu

Trojrozměrný objekt je možné dále realizovat s využitím metody bodového spékání polymerního práškového materiálu. Postupným spékáním jednotlivých vrstev prášku vzniká pevný a odolný předmět.

První technologií spadající do této kategorie je metoda se zkratkou SLS (Selective Laser Sintering), kdy princip této metody je patrný z obrázku 4. Zdrojem pro spékání práškového materiálu je u této metody laserový paprsek. Využívány jsou materiály práškové, nejčastěji polyamidové (nylonové) nebo alumidové (směs šedého hliníkového prášku s polyamidem). Prášky mohou také být vyrobeny z materiálů připomínající svou konzistencí pryž (prášky elastomerní) [16]. Nevyužitý polymerní prášek lze použít při dalším tisku. Avšak kvůli jeho částečnému natavení je vhodné prosyť.

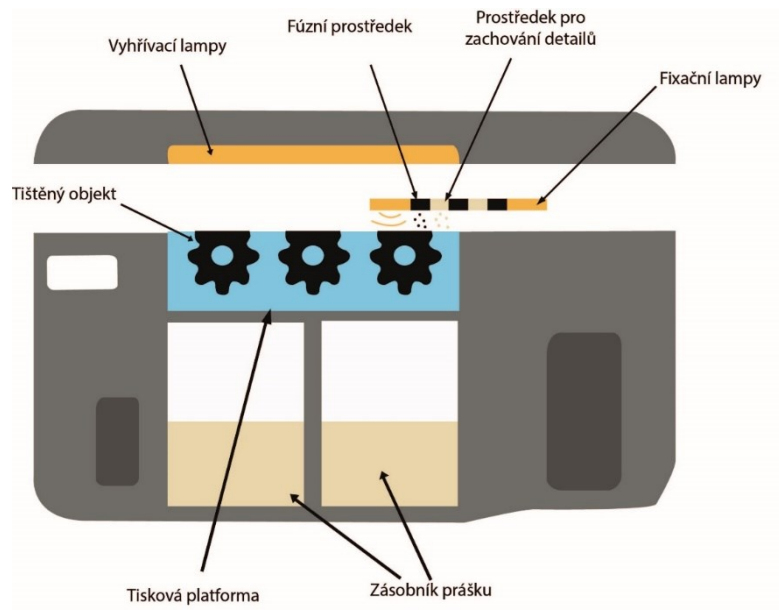
Přední nevýhodou této metody je nutnost očištění tiskového stroje a vytištěného modelu od prášku (pomocí kartáčů a stlačeného vzduchu), což může být problém u výtisků s uzavřenější strukturou [16]. Výhodou u metody SLS je absence podpurných konstrukcí na výtiscích.



Obrázek 4: Princip technologie SLS (upraveno z [17])

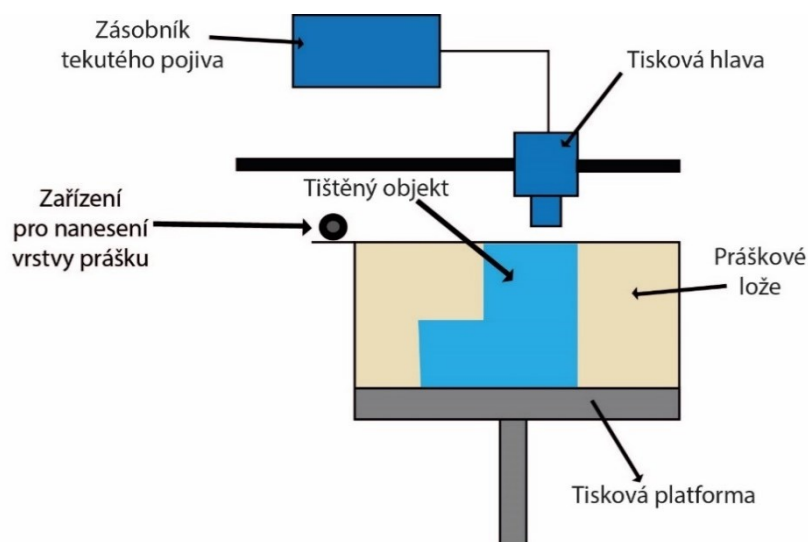
Další technologií využívající ke spékání prášku vysoce výkonný laserový paprsek je technologie SLM (Selective Laser Melting), známá také pod zkratkou DMLS (Direct Metal Laser Sintering) [18]. Od metody SLS se liší využitým materiálem, kterým je u metody SLM prášek s příměsí kovů (nejčastěji oceli, slitiny hliníku, superslitiny niklu, slitiny kobaltu nebo titanu) [19].

K tvorbě trojrozměrného objektu lze dále využít technologii MJF (Multijet Fusion), která je založena na principu inkoustové tiskárny a její princip je zobrazen na obrázku 5. V prvním kroku je pomocí tiskové hlavy po celé vyhřívané tiskové ploše nanesen polyamidový prášek. Následně je na něj nanesen tzv. fúzní prostředek (tmavá barva) a dále prostředek pro zachování detailů (lépe podpírá strukturu objektu). Při ozáření světelným zdrojem dochází na místech naneseného fúzního prostředku k absorpci infračerveného záření. Ozářením dojde k propojení a vytvrzení prášku a nanesených prostředků [20].



Obrázek 6: Princip technologie MJF (upraveno z [21])

Další možností tvorby trojrozměrného předmětu pomocí 3D tiskové technologie je technologie BJ (Binder Jetting), při níž je na tenkou vrstvu naneseného prášku (na bázi keramiky nebo kovu) postupně nanášeno pomocí tiskové hlavy pojivo ve formě kapiček. Po následném vytvrzení je na povrch nanášena další vrstva prášku a celý proces se opakuje do té doby, než vznikne celý předmět. U vytištěného předmětu je vhodné dodatečné vytvrzení v peci [22]. Princip této metody je zobrazen na obrázku 6.

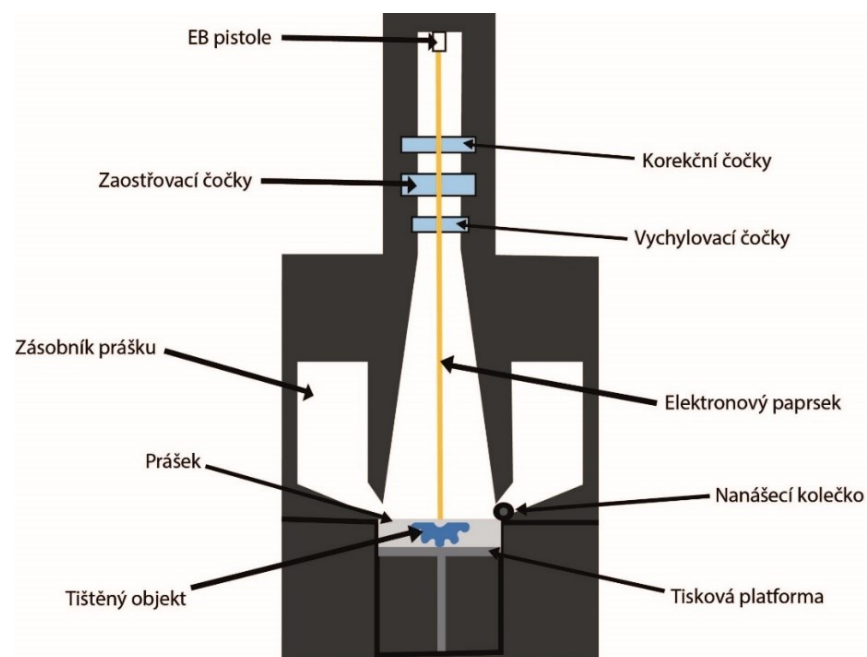


Obrázek 5: Princip technologie BJ (upraveno z [23])

Na principu inkjetové tiskárny je založena také metoda CJP (ColorJet Printing). Prášek, v tomto případě sádrový, je propojen pomocí barevného pojiva. Po následném vytvrzení vrstvy

UV zářením je tisková platforma posunuta směrem dolů a stejný způsob se opakuje až do vzniku výsledného trojrozměrného modelu [24]. Spolu se samotným modelem jsou tištěny podpůrné konstrukce (např. z vosku), které jsou snadno rozpustitelné a odplavitelné [20].

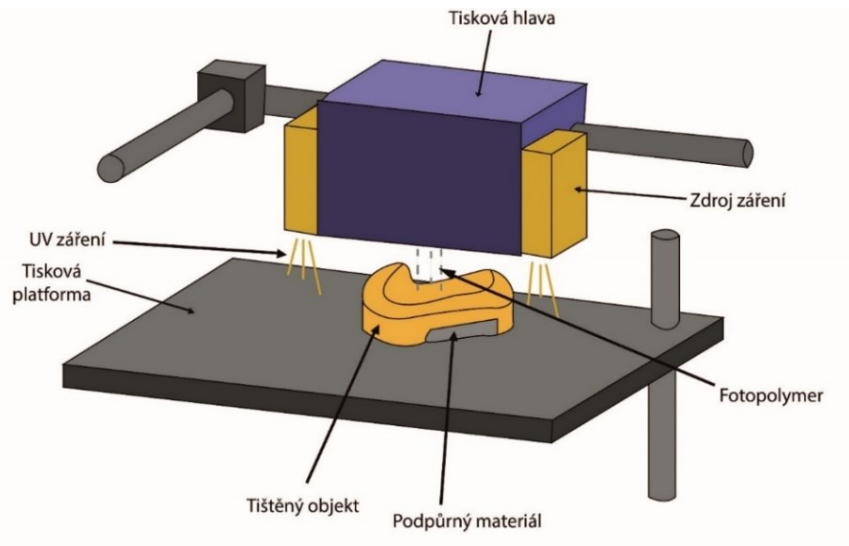
Další metodou využívající princip zapečení práškového materiálu je technologie se zkratkou EBM (Electron Beam Melting). Zdrojem vytvrzování je v případě této metody svazek elektronů. Využívaným materiálem je kovový prášek nebo kovový drát. Celý proces tisku musí probíhat ve vakuové komoře, aby bylo zabráněno nežádoucí reakci s molekulami plynu. Díky tomu lze tisknout z reaktivních prvků, například titanu [25]. Schéma metody EBM je zobrazeno na obrázku 7.



Obrázek 7: Princip technologie EBM (upraveno z [26])

### 1.2.3 Objekty vytvořené přímým inkoustovým tiskem

Princip této metody je založen na vytvrzení vrstev fotopolymerního materiálu, nanesených metodou inkjetového tisku, UV zářením. Tento princip využívá metoda s názvem Polyjet, zobrazená na obrázku 8. Díky absenci práškových částic disponují vytištěné objekty vysokým rozlišením [20]. Při této metodě lze využít různé fotopolymerní materiály – ať už materiály o různé tvrdosti, rozpustnosti (tvorba podpěr) nebo také barevnosti.



Obrázek 8: Princip technologie Polyjet (upraveno z [27])

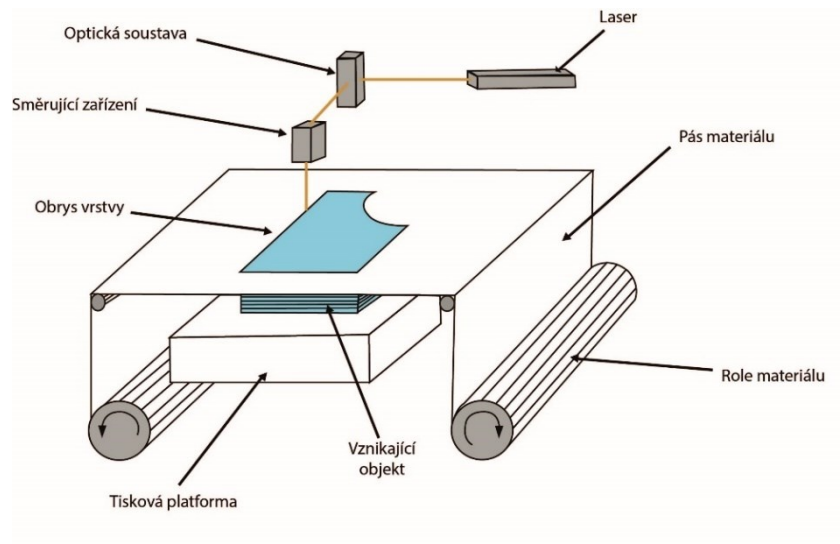
#### 1.2.4 Objekty vytvořené přímým energetickým nanášením (z anglického DED – Direct Energy Deposition)

Do této kategorie lze zařadit dvě technologie, a to metody LENS a EBAM. Technologie LENS (Laser Engineering Net Shaping) využívá k tavení kovového práškového materiálu nebo kovového drátu laserový paprsek. Celý proces probíhá v uzavřené komoře napuštěné inertním plynem (argonem), aby nedošlo k nežádoucí oxidaci [28].

Druhou technologií je metoda EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing), pomocí níž lze realizovat objekty větších rozměrů. EB pistole nanáší kovový drát (vyrobený nejčastěji z tantalu, niklu nebo titanu) vrstvu po vrstvě do té doby, než dojde ke vzniku sítě modelu. Následně je předmět připraven k dodatečnému opracování [25].

#### 1.2.5 Objekty vytvořené laminováním listu

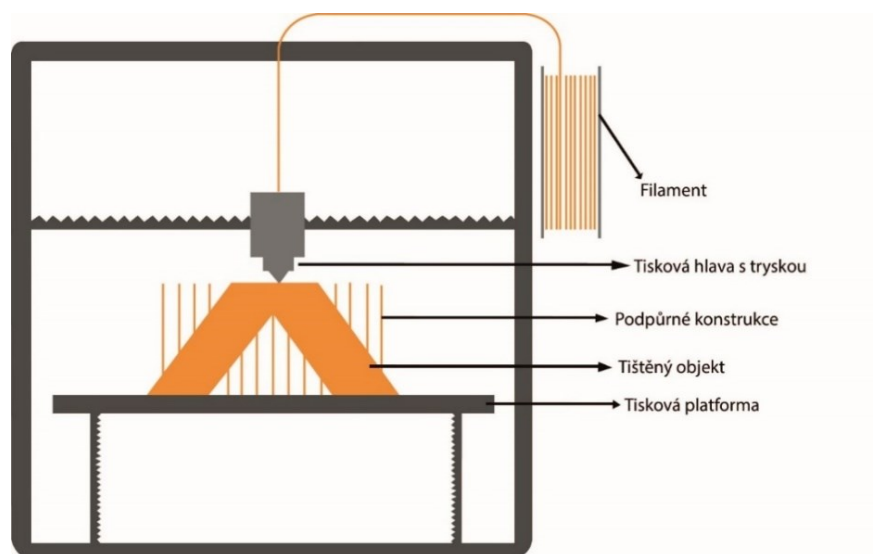
Poslední možností, jakou lze využít pro tvorbu 3D objektu pomocí 3D tisku je metoda laminování listu. Zástupcem v této kategorii je technologie LOM (Laminated Object Manufacturing). Princip vzniku trojrozměrného objektu spočívá ve vrstvení materiálu (nejčastěji polymerní fólie či papíru) na sebe s následným vyříznutím nožem či laserem do příslušného tvaru. Po vyříznutí může být materiál potištěn inkjetem. Na tuto vrstvu je přilepena další vrstva příslušného materiálu a celý proces se opakuje [20]. Princip technologie LOM je zobrazen na obrázku 9.



Obrázek 9: Princip technologie LOM (upraveno z [29])

### 1.3 FDM tisk

Velice hojně rozšířená metoda využívaná při realizaci trojrozměrného objektu je technologie FDM (Fused Deposition Modeling) založená na principu extruze pevného materiálu. Předmět vzniká postupným vrstvením roztaveného termoplastu na sebe, vrstvu po vrstvě. Termoplastický materiál ve formě vlákna je navinut na cívce (používá se také označení filament). Z cívky je filament postupně odvíjen pomocí podávacích koleček a přiváděn do vyhřívané tiskové hlavy (tzv. extrudér). V tiskové hlavě dochází k jeho extruzi a vytlačení na tiskovou podložku do příslušného tvaru. Protože se jedná o termoplast, dochází k jeho samovolnému zatuhnutí ihned po nanesení. Pro zajištění dostatečné adheze filamentu k tiskové podložce je využíváno její vyhřívání na určitou teplotu dle použitého materiálu [30]. Na obrázku 10 je zobrazen princip technologie FDM.



Obrázek 10: Princip technologie FDM (upraveno z [31])

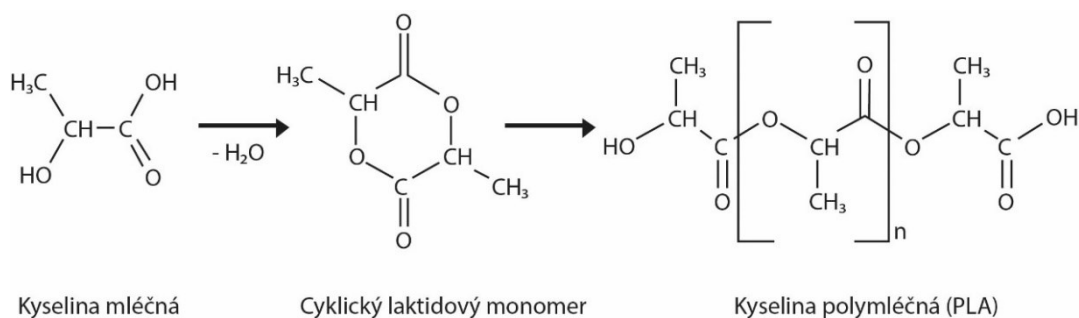
Metodou FDM lze extrudovat nejen materiály termoplastické, nýbrž materiály pastovité či čokoládu. FDM technologie je také velmi často využívána pro tisk kompozitů (je využívána tiskárna vybavená dvěma tryskami, kdy jedna tryska vytlačuje filament polymerní a druhá filament kompozitní – vyrobený z uhlíku nebo kevlaru) [30].

Mezi nejčastěji používané materiály pro tvorbu trojrozměrného předmětu patří PLA (kyselina polymléčná), ABS (akrylonitril-butadien-styren), PETG (polyethyltereftalát modifikovaný glykolem), PA (polyamid) a PC (polykarbonát) [32]. Dalšími velmi oblíbenými materiály jsou ASA (akrylonitril-styren-akrylát), PP (polypropylen), PVB (polyvinyl butyral) nebo také PMMA (polymethylmetakrylát). Na trhu jsou dostupné dokonce i filameny speciální, například svítící ve tmě, kombinované s částicemi kovu nebo dřeva, s obsahem sádry nebo filameny určené pro tisk elektronických zařízení [33].

## 1.4 Tiskové materiály pro FDM tisk

### 1.4.1 Kyselina polymléčná (PLA)

Kyselina polymléčná (z angličtiny polylactid acid, zkráceně PLA) je alifatický polyester vyráběný z kukuřice, cukrové třtiny nebo z řepy [34, 35]. Schéma výroby PLA je prezentováno na obrázku 11. Výhodou PLA je především jeho rozměrová stálost (výtisky se nedeformují), biodegradabilita a zdravotní nezávadnost. Bod tání PLA je kolem 175 °C, což je v porovnání s ostatními filameny nízká teplota tání. Díky tomu je možné tisknout při nižších teplotách a bez vyhřívání podložky. Další výhodou PLA je její nízká pořizovací cena a jednoduchost při manipulaci. Její nevýhodou je nízká odolnost vůči vyšším teplotám, UV záření a mechanickému namáhání [35].



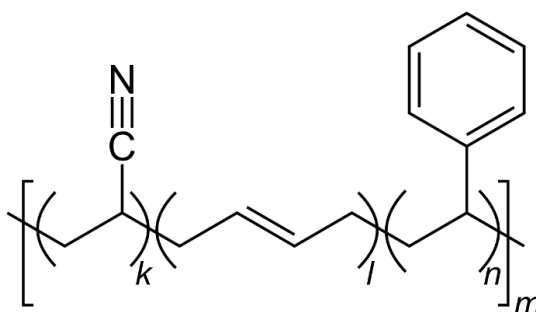
Obrázek 11: Schéma výroby PLA (upraveno z [36])

Protože je technologie FDM založena na vrstvení vlákna na sebe, výsledný povrch vytištěných předmětů je strukturovaný. Strukturovanost lze odstranit jak mechanicky

(obroušením povrchu), tak chemicky (naleptáním povrchu chloroformem, horkým benzenem nebo tetrahydrofuranem). Pro spojování jednotlivých PLA výtisků lze využít aceton [35].

#### 1.4.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Dalším, velice využívaným filamentem, je ABS. Jedná se o termoplastický amorfní polymer vyráběný ze tří monomerů, a to z akrylonitrilu (tepelná a chemická odolnost), butadienu (tažnost a mechanická odolnost) a styrenu (snadnost zpracování a snížení nákladů) [37]. Na obrázku 12 je zobrazena struktura ABS.



Obrázek 12: Chemická struktura ABS (upraveno z [38])

ABS je materiál, který je díky své tepelné odolnosti a pevnosti vhodný pro tisk mechanicky namáhaných dílů. Jeho přední nevýhodou je kroucení a smršťování (o 1–2 % z původní velikosti). Předpokladem pro kvalitní tisk z ABS je tisk na tiskárně, která je uzavřena v plastovém boxu (zamezení teplotních výkyvů). Vytiskované předměty by měly být ponechány na tiskové podložce do té doby, než dojde k jejich dostatečnému zatvrdnutí. Díky vysokému obsahu styrenu v ABS je možné povrch předmětu vyhladit acetonovými parami. Z hlediska mechanické úpravy lze provést broušení produktu za sucha i za mokra [39].

#### 1.4.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA)

ASA je dalším zástupcem vysoce tvrdého a odolného filamentu. Odolný je především vůči teplotě a záření (tedy i UV záření). Díky svým vlastnostem, srovnatelným s ABS, je považován za jeho nástupce. Avšak oproti ABS filament ASA méně zapáchá a je odolnější. Nevýhodou ASA je jeho kroucení, ačkoliv šance na jeho projevení je oproti ABS méně pravděpodobnější. Jednou z možností, jak zamezit kroucení, je tištění při vyšších teplotách [40]. Oproti ABS je ASA také odolnější vůči povětrnostnímu stárnutí. Tato odolnost je způsobena tím, že při výrobě filamentu ASA je namísto butadienového kaučuku využito kaučuku akrylátového [41]. Stejně jako v případě ABS lze výsledný povrch upravit mechanicky (broušením za sucha i za mokra) nebo chemicky (vyhlazení acetonovými parami) [40].



## 1.5 Dokončovací zpracování 3D tištěných objektů

Téměř každá 3D tisková technologie vyžaduje pro zlepšení mechanických a vizuálních vlastností výtisku jeho dodatečné opracování (tzv. post-processing). Do dokončovacího zpracování lze zařadit několik úprav, mezi které patří například odstranění nosné konstrukce, sekundární vytvrzování, lepení, barvení, natírání nebo zjemnění drsnosti povrchu (broušením nebo vyhlazováním).

### 1.5.1 Odstraňování nosné konstrukce

Nevýhodou při tisku předmětů kulovitého či nepravidelného tvaru, převisů nebo složitějších tvarů je nutnost tisku nosných konstrukcí (tzv. podpěr), které jsou tištěny najednou spolu se vznikajícím 3D objektem. Po vytištění může být proto složitější tyto podpory odstranit. Další nevýhodou tisku s podpěrami je to, že podpěry zanechávají na vytištěném předmětu nevzhledné artefakty.

Způsob, který usnadňuje odlamování nosné konstrukce zasahuje již do samotného výběru materiálu. Podpěry lze tisknout z odlišného materiálu, než kterým je vytištěn samotný předmět. Při výběru lze zvolit filament PVA (polyvinylalkohol), který je snadno rozpustný ve vodě. Podpůrné konstrukce lze také vytisknout pomocí speciálních filamentů (tzv. breakaway support filaments), které jsou koncipovány přímo pro tisk podpěr a zajišťují jejich snadné odstranění z výtisku [42].

V případě, že je předmět vytištěn z materiálu ABS, lze pro tisk podpůrných konstrukcí zvolit materiál HIPS (High Impact Polystyrene), který je rozpustný v lemonsolu. A naopak, pokud je předmět vytištěn z materiálu HIPS, lze pro tisk konstrukcí použít ABS, který je rozpustný v acetonu [43].

### 1.5.2 Broušení výtisku

Broušením povrchu výtisku lze vytištěný předmět zbavit přebytečných vyčnívajících kousků filamentu (např. zbylé úlomky z podpůrné konstrukce) a jiných nedokonalostí či defektů. Pro broušení se využívají abrazivní materiály, nejčastěji brusný papír a elektronická ruční bruska. V případě broušení brusným papírem je vhodné proces započít brusným papírem s hrubšími zrny a následně postupovat k papírům o nejjemnější zrnitosti [44].

Dalším nástrojem, který lze pro obroušení výtisků využít, je již zmíněná elektronická ruční bruska (pro předměty větších rozměrů). Mezi další možné nástroje patří brusný blok

či jemný pilník. Kvůli nežádoucímu zahřívání povrchu při broušení je vhodné aplikovat tzv. mokré broušení, kdy je brusný předmět namáčen do vody [45].

### 1.5.3 Vyhlazování povrchu výtisku parami rozpouštědla

Pro vyhlazení povrchu výtisku lze využít nejen cestu mechanickou, nýbrž chemickou. Při chemickém vyhlazování dochází k zacelení povrchu vytištěného předmětu jeho částečným naleptáváním. Na omak je povrch hladký a ucelený. Touto metodou lze odstranit z povrchu výtisku strukturovanost, která vzniká důsledkem vrstvení roztaveného materiálu. Další výhodou, kterou vyhlazení parami rozpouštědla nabízí, je zvýšená odolnost výtisku vůči propouštění kapaliny do struktury výtisku [44].

Existuje několik metod, jak lze vytištěný předmět chemicky vyhladit. Rozpouštědlo je možné nanášet pomocí štětce přímo na výtisk, lze jej nad předmětem rozprašit nebo výtisk do rozpouštědla přímo ponořit. Avšak nejčastěji využívanou metodou je vystavení předmětu parám rozpouštědla.

Pro úspěšné chemické vyhlazení je podstatná správná volba rozpouštědla. Ke každému materiálu je určené rozpouštědlo, které materiál naleptává. Účinnost rozpouštědel pro jednotlivé filamenty je uvedena v tabulce 1, přičemž bližší vysvětlení barevného značení je vypsáno v tabulce 2.

Tabulka 1: Chemická odolnost materiálů pro 3D tisk (upraveno z [46])

|  | PLA | PVB | PETG | ASA | ABS | PC | PA | PP |
|--|-----|-----|------|-----|-----|----|----|----|
| Voda (H <sub>2</sub> O)  | A   | A   | A    | A   | B   | A  | A  | A  |
| IPA 75% (Isopropylalkohol, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)              | C   | D   | A    | B   | B   | B  | A  | A  |
| IPA 99% (Isopropylalkohol, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)              | C   | D   | B    | B   | B   | B  | A  | A  |
| Kyselina octová 8% (ocet, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) | B   | C   | A    | A   | B   | A  | C  | A  |
| Chlorid sodný 10% (sůl, NaCl)  | B   | B   | A    | B   | A   | A  | A  | A  |
| Kyselina citronová (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> )       | B   | B   | A    | A   | -   | A  | B  | A  |
| Kyselina chlorovodíková 37% (HCl)  | C   | -   | A    | C   | C   | A  | D  | A  |
| Peroxid vodíku 30% (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )                      | B   | -   | A    | A   | A   | A  | D  | A  |
| Kyselina fosforečná 85% (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )                | C   | -   | C    | -   | A   | A  | D  | A  |
| Kyselina dusičná 69% (HNO <sub>3</sub> )                                 | D   | -   | D    | -   | A   | D  | D  | A  |
| Kyselina sírová 96% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                    | D   | -   | D    | -   | -   | D  | D  | A  |
| Fridex * (Ethylenglykol, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )  | B   | B   | A    | A   | -   | A  | -  | -  |
| Savo ** 1:10 (NaClO)   | B   | B   | A    | A   | -   | B  | A  | A  |
| Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O)                                | C   | D   | B    | B   | A   | B  | A  | A  |
| Aceton (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)                                 | D   | D   | C    | D   | D   | C  | A  | A  |

Tabulka 2: Vysvětlivky k tabulce 1

| Označení | Odolnost     | Projevení  |
|----------|--------------|--|
| A        | Velmi vysoká | žádné bobtnání, změna hmotnosti a rozměrů o méně než 1 %                       |
| B        | Dobrá        | mírné bobtnání, změna hmotnosti a rozměrů o 2 – 3 %                            |
| C        | Špatná       | výrazné bobtnání, změna hmotnosti a rozměrů o 4 – 5 %                          |
| D        | Velmi špatná | silné bobtnání, možné zničení vlákna, změna hmotnosti a rozměrů o více než 5 % |

Pro naleptávání 3D výtisků je nejčastěji využívaným rozpouštědlem aceton. Aceton (propan-2-on nebo také dimethylketon) je bezbarvé aromatické rozpouštědlo s teplotou varu kolem 56 °C. Jedná se o nejjednodušší keton mísitelný s vodou a většinou organických rozpouštědel [47].

Metoda vyhlazování výtisků pomocí acetonových par je použitelná pouze u materiálů, se kterými rozpouštědlo reaguje adekvátním způsobem (nejčastěji ABS a ASA). Aceton lze také použít pro vyhlazení předmětů vytištěných z PVB (polyvinilbutyral), avšak proces zabere více času [48].

Nutností při procesu vyhlazování je zvolení vhodné plastové nádoby, která je proti rozpouštědлу (v tomto případě acetonu) odolná. Pro rovnoměrné vyhlazení je doporučené výtisk zavěsit do prostoru [44]. Zavěšením předmětu do prostoru je zabráněno jeho destrukci a poničení spodní strany výtisku (pokud se výtisk dotýká podložky, dochází na spodní straně k naleptání povrchu a následnému přilepení na podložku).

Dalším krokem je samotné naleptávání povrchu výtisku. Jednou z možností vystavení objektu acetonovým parám je namočení tkaniny (ubrousků) v acetonu. Nasáklý substrát je poté rozestavěn uvnitř nádoby kolem výtisku. V uzavřené nádobě dochází při pokojové teplotě k nasycení vzduchu parami rozpouštědla, vytvořené páry reagují s materiálem a dochází k vyhlazení povrchu výtisku [44]. Jelikož se acetonové páry drží spíše u dna, je tato metoda vhodná spíše u menších a drobnějších předmětů. U větších výtisků nemusí dojít k dostatečnému vyhlazení, především ve vrchní části výtisku [48].

Druhým způsobem vyhlazení výtisku pomocí acetonových par je vyhlazování pomocí menší nádoby (misky) naplněné acetonem. Tato nádobu lze umístit na dno plastového boxu a tedy pod samotné výtisky. Aceton nemusí být nalit pouze v misce, nýbrž přímo na dně plastové nádoby. Díky těkavosti acetonu dochází k jeho samovolnému vypařování a tedy

i vyhlazování povrchu výtisku. Vypařování rozpouštědla může být podpořeno zvýšením okolní teploty. Při vyšší teplotě dochází ke zvýšení tenze par rozpouštědla, což má za následek zvýšení rychlosti vyhlazování. Ke zvýšení teploty lze použít vodní lázeň, která je vyhřívána na určitou teplotu a dochází tak k nepřímému zahřívání rozpouštědla. Dalším doporučením je využití ventilátoru, který zajišťuje cirkulaci vzduchu a dochází tak k rovnoměrnému rozptýlení acetonových par po povrchu výtisku [48].

Při zahřívání acetonu je nutné, aby nebyla plastová nádoba utěsněna. Utěsnění by vedlo k nárůstu tlaku uvnitř. Dalším doporučením je vytvoření otvorů přímo v plastovém boxu, které bezpečně odvádí výpary rozpouštědla. V případě, že je vyhlazovaný předmět položen na kovové podložce, musí být podložka oproti hladině acetonu vyvýšena o několik centimetrů, aby nedošlo k nežádoucímu namočení výtisku v rozpouštědle. Po dokončení naleptávání je výtisk několik hodin měkký a je snadné ho jakýmkoliv způsobem zdeformovat. Proto je vhodné ponechat výtisk po vyhlazování k dostatečnému zatvrdnutí [48].

Na trhu jsou dostupné vyhlazovací stanice (např. stanice Polymaker Polyspher), které používají pro vyhlazení povrchu výtisků IPA (isopropylalkohol). Avšak pro tisk předmětu musí být použit speciální filament (pro stanici Polymaker Polyspher je to Polymaker PolySmooth filament), který je citlivý na IPA [49].

#### 1.5.4 Barvení a lakování výtisků

Pro zlepšení výsledného vzhledu a odolnosti trojrozměrného objektu lze výtisk obarvit a nalakovat. K nabarvení povrchu výtisku jsou velmi často používány barvy akrylové (na vodní bázi) nebo emailové (na bázi rozpouštědel). Výtisky je možné nabarvit pomocí barev ve spreji. Barvy čiré lze využít pro nalakování výtisku (mohou být ve spreji nebo je lze aplikovat pomocí štětce) [44].

#### 1.5.5 Další typy dokončovacích zpracování

Pro reprodukci věrných a kvalitních předmětů lze využít i další dokončovací operace, které zlepšují výsledný vzhled výrobku a zvýší jeho mechanickou odolnost. Například k vyplnění mezer a dutin ve výtisku je vhodné využití plnidel. Mohou to být plnidla určená pro karoserie nebo speciálně navržená plnidla pro 3D výtisky (plnidlo XTC-3D) [50]. Další možnou úpravou je tzv. žihání, při kterém je výtisk střídavě zahříván a ochlazován, což vede ke zvýšení jeho mechanické odolnosti a rozměrové stálosti [44]. Pro dostatečné zacelení vytištěného povrchu lze výtisk ponořit do voskové lázně [51].

## 2 Experimentální část

### 2.1 Použitá zařízení

Za účelem zhodnocení kvality 3D tiskem vytištěných modelů bylo prvně potřeba navržené testovací obrazce vytisknout. Pro tisk byla využita tiskárna založená na principu FDM technologie, konkrétně 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s průměrem trysky 0,4 mm.

Následně byl zkonstruován vyhlazovací box s ventilátorem, ve kterém byly jednotlivé výtisky vyhlazovány pomocí acetonových par. Pro výrazné urychlení procesu bylo využito třímístné magnetické míchadlo WiseStir SMHS-3 s ohřevem, které mimo zahřívání vodní lázně umožňovalo její promíchávání pomocí vložené magnetické míchací tyčinky.

Po vyhlazování byly všechny výtisky vyfoceny digitálním fotoaparátem Olympus E-PL3. Metodou obrazové analýzy byly ve volně dostupném programu Fiji Is Just ImageJ z pořízených fotografií sledovány změny rozměrů u jednotlivých objektů. Pro komplexní vyhodnocení byly změny rozměrů vyhodnocovány s využitím digitálního posuvného měřítka.

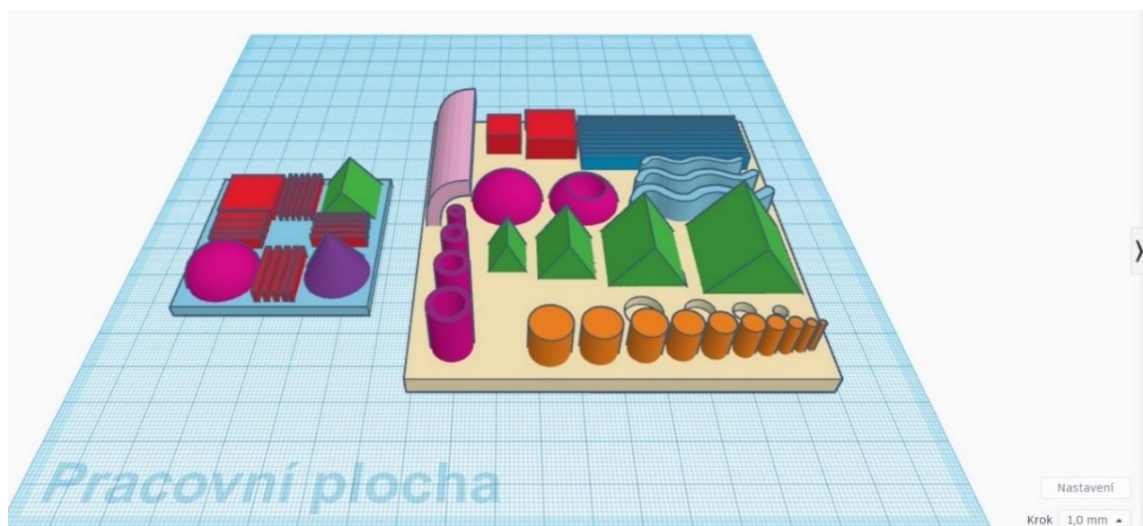
Pro měření drsnosti povrchu hranolu byl využit mobilní 3D mikroskop GelSight, jehož rychlost snímání dosahuje až 100 ms. Zařízení GelSight dokáže snímat povrch s mikronovým rozlišením (v osách x, y rozlišení 6,9  $\mu\text{m}$ , citlivost v ose z menší než 1  $\mu\text{m}$  a přesnost v ose z až 4  $\mu\text{m}$ ) [52].

### 2.2 Použité materiály

Testovací obrazce byly vytištěny celkem ze tří druhů filamentů, a to z PLA (fialová barva), ABS (stříbrná barva) a ASA (tmavě modrá barva). Pro samotné vyhlazování byl zvolen aceton, na něhož jsou materiály ABS a ASA díky obsahu styrenu citlivé.

### 2.3 Tisk testovacích obrazců a hodnocení jejich kvality

K vytvoření 3D modelů byl využit volně dostupný modelovací program Tinkercad. V tomto programu byly vytvořeny celkem dva testovací obrazce (menší a větší). Menší testovací obrazec byl určen ke stanovení optimální doby vyhlazování parami acetonu, větší testovací obrazec pro vizuální zhodnocení kvality pestré škály vytištěných objektů o různých rozměrech. Modely testovacích obrazců jsou vyobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13: Malý (vlevo) a velký (vpravo) testovací obrazec

Po vyexportování testovacích objektů ve formátu .obj byl využit program PrusaSlicer, ve kterém byly nastavovány různé parametry tisku (výška tištěné vrstvy, druh filamentu, výplň výtisku). Prvotním cílem bylo vytištění modelů ve třech různých kvalitách tisku (výškách vrstev filamentu), a to 0,3 mm; 0,15 mm a 0,05 mm. Avšak tiskárna nebyla ani po snížení rychlosti tisku a zvýšení teploty extruze schopna vrstvy o výšce 0,05 mm reprodukovat. Proto byla výška vrstvy 0,05 mm nahrazena za tloušťku 0,1 mm, kterou se již reprodukovat podařilo. Nastavené parametry tisku pro malý testovací obrazec jsou uvedeny v tabulce 3 a pro velký testovací obrazec v tabulce 4.

Tabulka 3: Nastavené parametry tisku pro malý testovací obrazec

| Materiál | Kvalita tisku/výška vrstvy [mm] | Vzor výplně    | Množství výplně [%] | Teplota trysky [°C] | Teplota podložky [°C] | Množství použitého filamentu [g] | Doba tisku [min] | Problémy při tisku |
|----------|---------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|
| ABS      | 0,3                             | Gyroid         | 15                  | 255                 | 110                   | 10,46                            | 44               | Ne                 |
|          | 0,15                            | Gyroid         | 15                  | 255                 | 110                   | 10,01                            | 84               | Ano                |
|          | 0,1                             | Gyroid pláštěv | 20                  | 255                 | 110                   | 9,98                             | 127              | Ano                |
| ASA      | 0,3                             | Gyroid         | 15                  | 260                 | 110                   | 10,38                            | 42               | Ne                 |
|          | 0,15                            | Gyroid         | 15                  | 260                 | 110                   | 9,92                             | 83               | Ne                 |
|          | 0,1                             | Gyroid         | 15                  | 260                 | 110                   | 9,76                             | 121              | Ne                 |

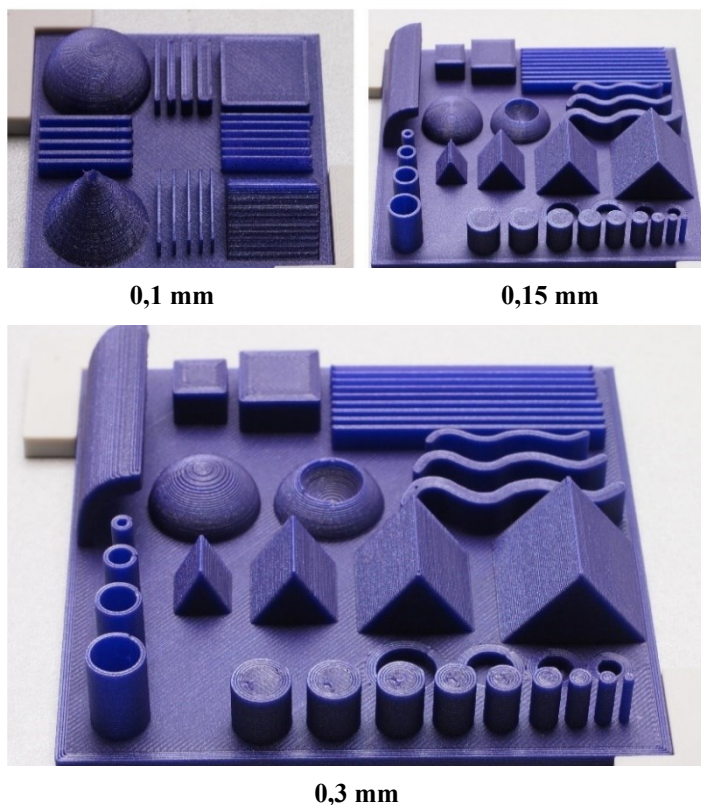
Tabulka 4: Nastavené parametry tisku pro velký testovací obrazec

| Materiál | Kvalita tisku/výška vrstvy [mm] | Vzor výplně | Množství výplně [%] | Počet perimetrů | Teplota trysky [°C] | Teplota podložky [°C] | Množství použitého filamentu [g] | Doba tisku [min] | Problémy při tisku |
|----------|---------------------------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|
| PLA      | 0,3                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 215                 | 60                    | 58,98                            | 183              | Ne                 |
|          | 0,15                            | Gyroid      | 15                  | 4               | 215                 | 60                    | 56,43                            | 375              | Ne                 |
|          | 0,1                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 215                 | 60                    | 53,32                            | 524              | Ano                |
| ABS      | 0,3                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 255                 | 110                   | 51,37                            | 196              | Ano                |
|          | 0,15                            | Gyroid      | 15                  | 4               | 255                 | 110                   | 49,15                            | 376              | Ano                |
|          | 0,1                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 255                 | 110                   | 46,44                            | 525              | Ano                |
| ASA      | 0,3                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 260                 | 110                   | 50,9                             | 196              | Ne                 |
|          | 0,15                            | Gyroid      | 15                  | 4               | 260                 | 110                   | 48,7                             | 375              | Ne                 |
|          | 0,1                             | Gyroid      | 15                  | 4               | 260                 | 110                   | 46,01                            | 524              | Ne                 |

### 2.3.1 Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu PLA

Jako první byly tištěny velké testovací obrazce. V případě tisku s PLA probíhal tisk u modelů s kvalitou tisku 0,3 mm a 0,15 mm bez komplikací. Komplikace nastaly při reprodukci modelů s rozlišením 0,1 mm. Již po několika vteřinách od spuštění tisku došlo k zaseknutí filamentu v tiskové hlavě. Ačkoliv byl tisk opakován vícekrát, i přes snížení rychlosti tisku se nepodařilo velký testovací obrazec o kvalitě 0,1 mm vytisknout. Avšak s rozlišením 0,1 mm se podařilo reprodukovat alespoň malý PLA testovací obrazec. Výsledné vytištěné obrazce jsou zobrazeny na obrázku 14.

Všechny obrazce byly reprodukovány ve vysoké kvalitě a disponují ostrými okraji. Struktury mají na omak velice jemný povrch. Malé nedokonalosti se objevují u dutých válců, kde vzniká nevzhledný šev (místo, kde se tiskárna zastaví při dokončení tahu). I přesto, že u vyplněných válců šev nevzniká, důsledkem nedokonalého zakončení vlákna zůstávají na jejich površích výčnělky. U výtisků s kvalitou tisku 0,15 mm již tento defekt nevzniká. Další nedokonalostí je nevzhledný okraj u prohloubené polokoule, který je patrný u všech výtisků. Viditelnost tohoto defektu se zvyšující kvalitou tisku však klesá.



*Obrázek 14: Velké PLA testovací obrazce*

### 2.3.2 Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu ABS

V průběhu tisku velkých testovacích objektů z filamentů ABS a ASA docházelo k odlepování levého dolního rohu výtisku od tiskové podložky. Následkem byla nevzhledná deformace v místech odlepení. Pro snížení odlepování/deformace výtisků byla snížena rychlost tisku a při tisku byla použita kaptonová páska.

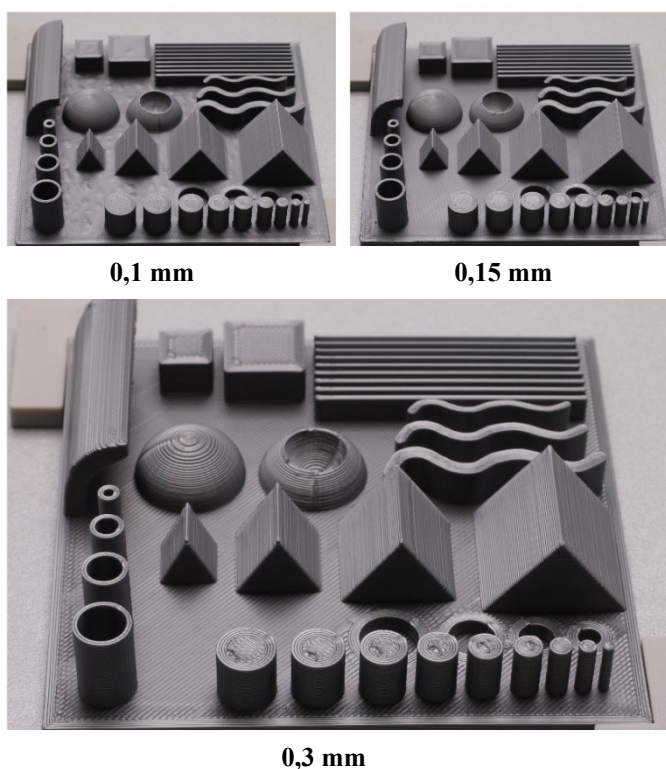
Kaptonová páska je páska vyráběná z polyamidové kaptonové fólie. Po jedné straně je opatřena adhezí vrstvou. Kaptonová páska se vyznačuje vysokou odolností vůči teplotám a chemickým sloučeninám. Při tisku s kaptonovou fólií dochází ke zvýšení adheze tištěného objektu k tiskové podložce a tím je zabráněno deformaci tištěného objektu. Další výhodou tisku s kaptonovou páskou je vyhlazení povrchu, který je s ní v kontaktu [53]. Pro podpoření přilnavosti filamentu k tiskové podložce byl štětcem na povrch kaptonové pásky nanesen nanopolymerní adhezivní roztok.

Výsledné velké ABS testovací obrazce jsou vyobrazeny na obrázku 15. Jak je z fotografií patrné, všechny objekty byly reprodukovány bez větších defektů až na výtisk s rozlišením 0,1 mm. V tomto případě na jeho povrchu vznikly v průběhu tisku nevzhledné boule. Tento defekt mohl být zapříčiněn nevhodnou volbou výplně (tvar i její množství).



Výhodou jsou švy u dutých válců, které jsou oproti výtiskům z PLA méně viditelné. Méně dokonalá je ale oproti PLA výtiskům reprodukce vnitřní části u prohnuté struktury, ve které nedošlo k úplnému přilnutí vlákna na předchozí vrstvy. Výsledkem jsou jednotlivá prohnutá vlákna v prostoru.

Při pohledu na okraje prohloubené polokoule jsou opět patrná nedokonalá zakončení, stejně jako tomu je v případě výtisků z PLA. U velkých ABS testovacích obrazců je také patrná vyšší kvalita výplně u jednotlivých objektů, a to konkrétně v případě vlnek.



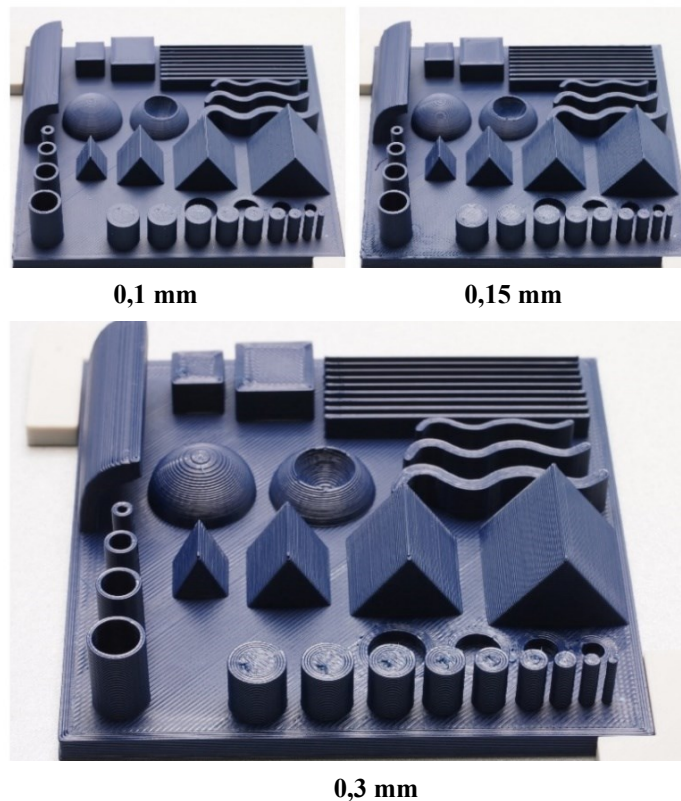
*Obrázek 15: Velké ABS testovací obrazce*

### 2.3.3 Tisk velkých testovacích obrazců z filamentu ASA

Při tisku velkých ASA testovacích obrazců byla při tisku opět použita kaptonová páska spolu s adhezivním roztokem. Na obrázku 16 jsou zobrazeny výsledné výtisky. V případě ASA materiálu byla jediným problémem přilnavost výtisku k tiskové podložce. Následkem bylo mírné odlepení dolního levého rohu výtisku a tedy mírná deformace patrná z fotografie výtisku s rozlišením 0,15 mm.

Tisk z ASA filamentu byla bezproblémový a to i v případě obrazce s kvalitou 0,1 mm. Napříč těmito třemi fotografiemi je viditelný značný vliv výšky vrstvy na výsledném vzhledu výtisku. U výtisku s rozlišením 0,1 mm je povrch velmi jemný a jeho strukturovanost je oproti

výtisku s rozlišením 0,3 mm velmi nízká. Výhodou u ASA testovacích obrazců je absence švů u dutých válců. Stejnou nevýhodou, jako v případě PLA a ABS výtisků je nedokonalost okraje u prohloubené polokoule.

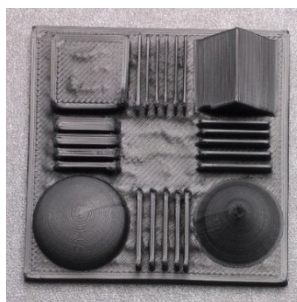


*Obrázek 16: Velká ASA testovací obrazce*

#### 2.3.4 Tisk malých testovacích obrazců z filamentu ABS a ASA

Malé testovací obrazce byly vytištěny z filamentů ABS a ASA. Celkem bylo vytištěno 54 kusů testovacích obrazců, tedy 27 výtisků z ABS a 27 výtisků z ASA. Při tisku byla opět využita kaptonová páska spolu s nanopolymerním adhezivním roztokem.

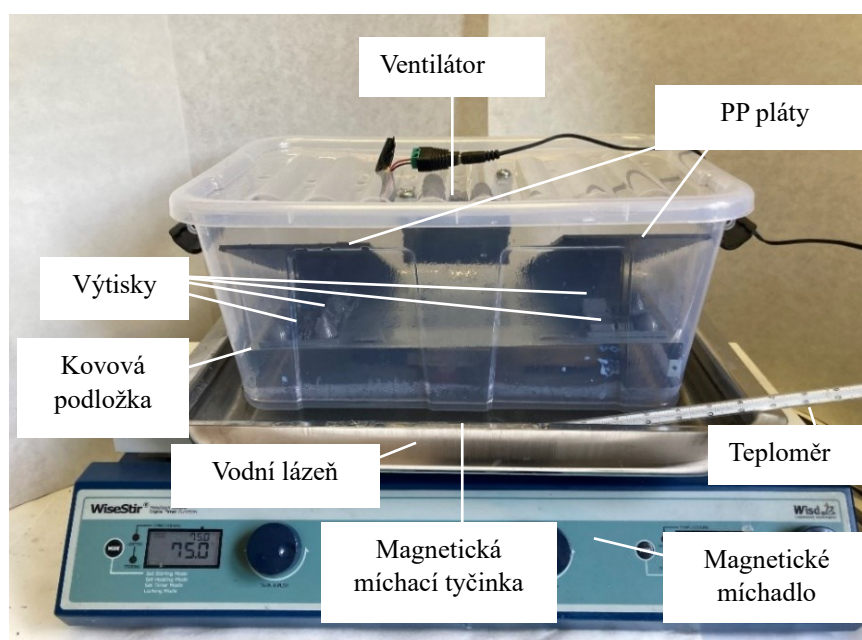
V případě tisku s filamentem ABS byla zvýšena teplota tiskové podložky ze 105 °C na 110 °C a také byla snížena rychlost tisku. Při tisku modelů z filamentu ABS s rozlišením 0,1 mm došlo na povrchu výtisků k propadání vrstev do spodních vrstev. Tento defekt je patrný z obrázku 17. Kvůli tomuto problému byl u tohoto jediného modelu nastaven jemnější vzor výplně a zároveň byla zvýšena hustota výplně z 15 % na 20 %.



Obrázek 17: Zdeformovaný ABS výtisk s kvalitou tisku 0,1 mm

## 2.4 Vyhlazování povrchu modelů acetonovými parami

Pro zbavení se strukturovaného povrchu vytištěných obrazců bylo zvoleno chemické vyhlazování, konkrétně vyhlazování parami acetonu. Vyhlazování povrchu funguje na principu rozpouštění polymeru v parách rozpouštědla. Vzniklý polymerní roztok na povrchu objektu má následně tendenci se rozlévat, čímž dochází k vyhlazení. Prvním krokem vyhlazování bylo zhotovení vyhlazovací stanice, jejíž konstrukce je zobrazena na obrázku 18. Samotné vyhlazování probíhalo v plastovém boxu, do jehož spodní části byl nalit aceton. Uvnitř plastového boxu byla umístěna kovová podložka, na které byly umístěny výtisky. Nad výtisky byla z polypropylenových plátů vytvořena nakloněná rovina pro stékání acetonu, který po odpařování kondenzoval zpět do systému. Aby bylo zajištěno rovnoměrné rozptýlení acetonových par, byl box doplněn o ventilátor. Pro podpoření a urychlení procesu vyhlazování byl aceton nepřímě zahříván skrze vodní lázeň, která byla zahřívána přibližně na teplotu 56 °C (kontrolováno rtuťovým teploměrem umístěným přímo v lázni).



Obrázek 18: Proces vyhlazování výtisků acetonovými parami

Jednotlivé testovací obrazce byly vyhlazovány po dobu 3, 5, 10, 15, 20, 30, 60 a 120 minut. Po uplynutí dané doby byly výtisky ze systému postupně vyjímány a ponechány k zatvrdnutí.

#### 2.4.1 Vyhlazování povrchu u ABS výtisků

Vyhlazené ABS výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm pro jednotlivé časy vyhlazování jsou zobrazeny na obrázku 19. Z hlediska kvality tisku jsou všechny testovací obrazce vytištěny dostatečně kvalitně bez viditelných větších defektů. U kvádrů je patrné mírné ohnutí okrajů. Při pohledu na vytištěné linky je po obou stranách výrazné jejich rozšíření. Nejvíce znatelné rozšíření je u tenkých linek.

Z hlediska vyhlazování je u výtisků již po třech minutách vyhlazování patrná změna celkového lesku povrchu. Po pěti minutách ve vyhlazovacím boxu dochází u nejtenčích linek (linky s tloušťkou 0,2 a 0,25 mm) k jejich zkroucení. Změna z hlediska strukturovanosti povrchu není u žádného objektu patrná. V desáté minutě je zcela zborceno několik tenkých linek (linky s tloušťkou 0,2 až 0,4 mm) a s přibývajícím tloušťkou linek dochází k jejich postupnému kroucení (linky s tloušťkou 0,45 až 0,65 mm). Povrch hranolu, kuželu a polokoule je na omak podstatně hladší, avšak strukturovanost povrchu stále nemizí. Stav jednotlivých linek je vyobrazen v tabulce 5. Patrné je vyhlazení hran objektů, především hran u hranolu. U výtisku, který byl ve vyhlazovací stanici po dobu jedné hodiny dochází k výraznému kroucení podložky a jejímu smrštění. Povrch hranolu a kuželu je na omak velice hladký, avšak jednotlivé tiskové vrstvy jsou stále stejně viditelné. Výtisk, jež ve vyhlazovacím boxu po dobu dvou hodin stále neztratil strukturovanost povrchu a většina tenkých linek (linky s tloušťkou 0,2 až 0,7 mm) je nenávratně zborcena. Nejvíce odolné vůči kroucení jsou linky s tloušťkou 1; 1,5; 2 a 2,5 mm. Na povrchu kvádrů je patrné propadání vrchních vrstev.

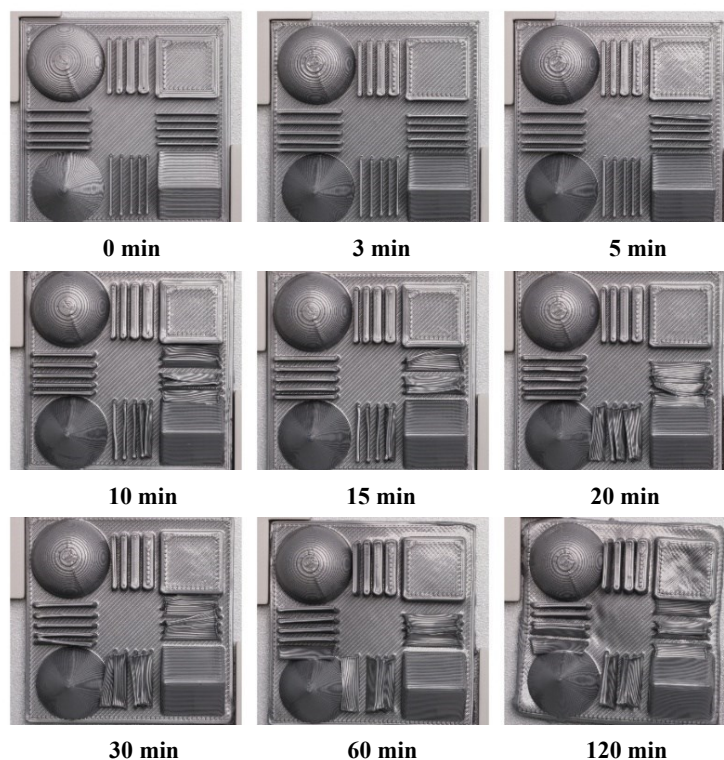
Tabulka 5: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm

| Doba vyhlazování | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 3 min            | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 5 min            | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 10 min           | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 15 min           | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 20 min           | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 30 min           | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 60 min           | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 120 min          | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž    | ž      | ž    | ž      |

žádné deformace

kroucení

kompletní destrukce

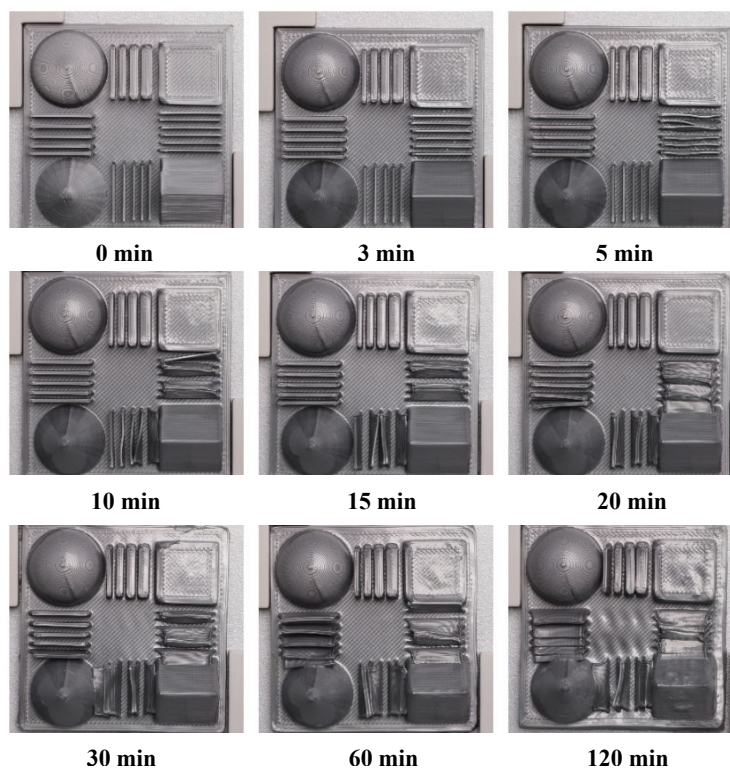
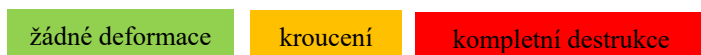


Obrázek 19: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s kvalitou tisku 0,3 mm

V případě ABS výtisků s kvalitou tisku 0,15 mm, jež jsou zobrazeny na obrázku 20, je u jednotlivých objektů znatelná vyšší kvalita a nižší strukturovanost povrchu. Stejným problémem, jako v případě rozlišení 0,3 mm, je i zde viditelné kroucení okrajů u kvádrů. Další defekt se nachází ve spodní části hranolu, kde došlo k prohnutí hrany tohoto tělesa. Již po třech minutách vyhlazování je u hranolu a kužele patrné zacelení povrchu. Po páté minutě vyhlazování došlo u tenkých linek (linky s tloušťkou 0,2 až 0,6 mm) k jejich kroucení a následnému borcení. Stav jednotlivých linek pro různé doby vyhlazování je vyobrazen v tabulce 6. Optimální doba pro vyhlazování ABS výtisků s rozlišením 0,15 mm je dvacet minut, jelikož po třiceti minutách ve vyhlazovacím boxu dochází u výtisků k deformaci podložky. Ačkoliv jsou povrchy všech těles na omak hladké, strukturovanost je stále výrazná. Po šedesáti minutách je kroucení a smrštění podložky znatelné. Na povrchu kuželu vznikají vlivem působení acetonových par kráterky. U hranolu dochází k celkové jeho deformaci a změně jeho tvaru. Výtisk po dvou hodinách vyhlazování vykazuje značné deformace a ve vrchních vrstvách u jednotlivých těles dochází k jejich propadání. Povrchy kuželu a hranolu jsou velmi hladké, avšak na jejich povrchu došlo ke vzniku boulí. Strukturovanost polokoule a kvádrů je stále stejná jako u výtisku bez vyhlazování. Po dvou hodinách jsou všechny tenké linky nenávratně zbořeny, až na tlustší linky s tloušťkou 1; 1,5; 2 a 2,5 mm, které jsou stabilní.

Tabulka 6: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,15 mm

| Doba vyhlazování | 0,15 mm | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 3 min            |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 5 min            |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 10 min           |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 15 min           |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 20 min           |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 30 min           |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 60 min           |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |
| 120 min          |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |      |        |      |        |



Obrázek 20: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s rozlišením 0,15 mm

Na obrázku 21 jsou zobrazeny výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm. Po obou koncích vytištěných linek došlo v průběhu tisku k jejich rozšíření a vzniku nevzhledných zakončení. U některých výtisků jsou ve výplni silnějších linek patrné mezery mezi jednotlivými vrstvami. I nadále je ve spodní části hranolu defekt, jako tomu je u ABS výtisků s rozlišením 0,15 mm. Nicméně celková strukturovanost povrchu je výrazně nižší. K viditelnému vyhlazení povrchu kuželu a hranolu dochází už po třech minutách ve vyhlazovacím boxu. Po pěti minutách vyhlazování nastává kroucení tenkých linek (linky s tloušťkou 0,15 až 0,4 mm), po deseti

minutách jsou tyto linky zcela zborceny. Také u polokoule došlo ke změně povrchu, kdy je nynější povrch hladší a jednotlivé tiskové vrstvy jsou méně patrné. Adekvátní doba pro vyhlazování ABS výtisků s kvalitou 0,1 mm byla stanovena na deset minut.

Po patnácti minutách ve vyhlazovacím boxu dochází u výtisků k jejich celkovému smršťování. Patrné je, především u kvádrů, propadání vrchních vrstev filamentu do spodních částí objektů. Po dvaceti minutách vyhlazování je většina tenkých linek zcela zborcena. I nadále dochází k razantnímu propadání vrstev. Po jedné hodině vyhlazování je u podložky testovacího obrazce patrné smršťení, což vede k celkovému pokroucení výtisku. Postřehnutelná je i změna rozměrů u jednotlivých obrazců a změna délky linek. Nejvíce stabilní jsou linky tlustší (s tloušťkou 1,5; 2 a 2,5 mm). Hrany kvádrů se v tomto momentě začínají ohýbat směrem do vnitřku objektu a propadání vrstev je zde zcela znatelné.

Po dvou hodinách vyhlazování je výtisk zcela zdeformován. Na povrchu výtisku lze rozeznat typ použité výplně. U všech objektů došlo k výrazným změnám jejich rozměrů. Všechny tenké linky (s tloušťkou 0,15 až 0,9 mm) jsou po dvou hodinách vyhlazování zborceny a začíná kroucení linek silnějších. Vzhled v jednotlivých časových úsecích je pro všechny linky zobrazen v tabulce 7. Ačkoliv nedošlo k úplnému odstranění strukturovanosti, povrch všech objektů, mimo kvádrů, je na omak hladší.

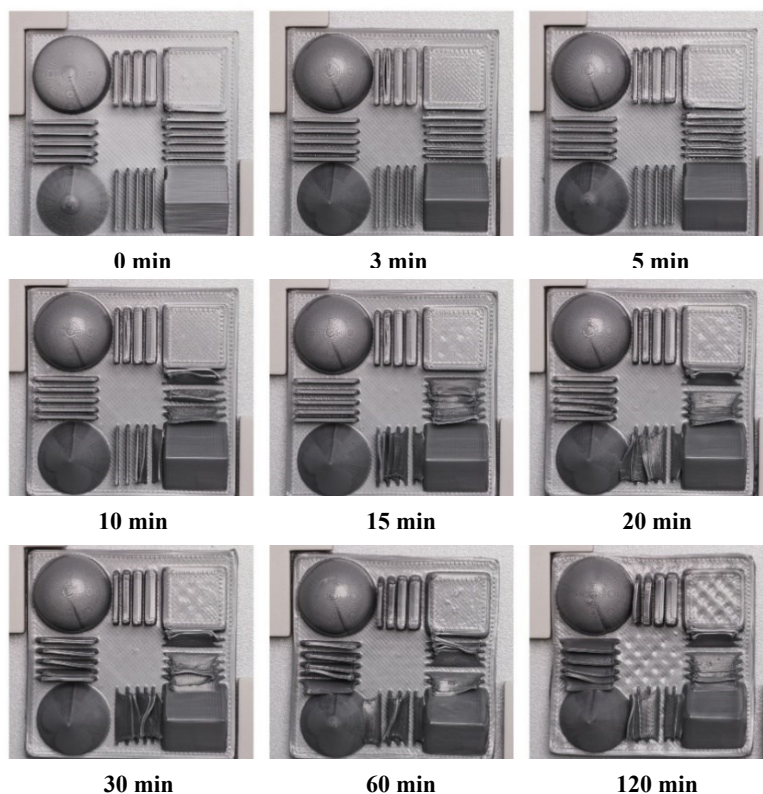
Tabulka 7: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ABS výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm

| Doba vyhlazování | 0,15 mm | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 3 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 5 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 10 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 15 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 20 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 30 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 60 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 120 min          | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |

žádné deformace

kroucení

kompletní destrukce



*Obrázek 21: Vyhlazování malých testovacích ABS objektů s kvalitou tisku 0,1 mm*

#### 2.4.2 Vyhlazování povrchu u ASA výtisků

Testovací obrazce z materiálu ASA s rozlišením 0,3 mm, zobrazené na obrázku 22, byly vytištěny ve stejné kvalitě jako tomu bylo u výtisků z filamentu ABS. Ke značnému vyhlazení povrchu došlo již po třech minutách ve vyhlazovacím boxu. Spolu s vyhlazením vzrostla i lepivost povrchu a tudíž byly výtisky velice náchylné vůči prachovým částicím. Už po pěti minutách vyhlazování ztratil jak hranol, tak kužel ze svého povrchu strukturovanost. Na povrchu polokoule jsou stále lehce rozeznatelné jednotlivé vrstvy, avšak minimálně. Oproti tomu na povrchu kvádrů jsou stále jednotlivé tiskové vrstvy vcelku výrazné. Doba pěti minut byla stanovena pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm jako optimální.

V desáté minutě vyhlazování došlo k úplnému zacelení povrchu u všech vytištěných objektů a jednotlivé vrstvy tisku již nejsou znatelné. Nevýhodou je začínající se kroucení hran kvádrů. Také v průběhu vyhlazování dochází k rapidnímu kroucení linek o tloušťce 0,2 až 0,4 mm. Po patnácté minutě vyhlazování je u jednotlivých výtisků znatelné smršťování, což je viditelné zejména na okrajích podložky. Všechny tenké linky jsou v tomto momentě již nenávratně zborceny. Ve dvacáté minutě vyhlazování dochází k výrazným změnám jak



samotného tvaru objektů, tak změnám v jejich rozměrech. Po třiceti minutách vyhlazování je smršťování stále více výrazné, přičemž u jednotlivých objektů dochází k jejich deformaci a slévání do jednoho celku. V tomto čase jsou stabilní pouze linky silnější, tedy linky s tloušťkou 1; 1,5; 2 a 2,5 mm. Po dvou hodinách vyhlazování je výtisk zcela zdeformován. Nejvyšší smršťení vykazuje kvádr. Také dochází ke vzniku kroucení u silných linek, které v případě tisku z ABS byly stabilní. Stav linek je barevně odlišen v tabulce 8.

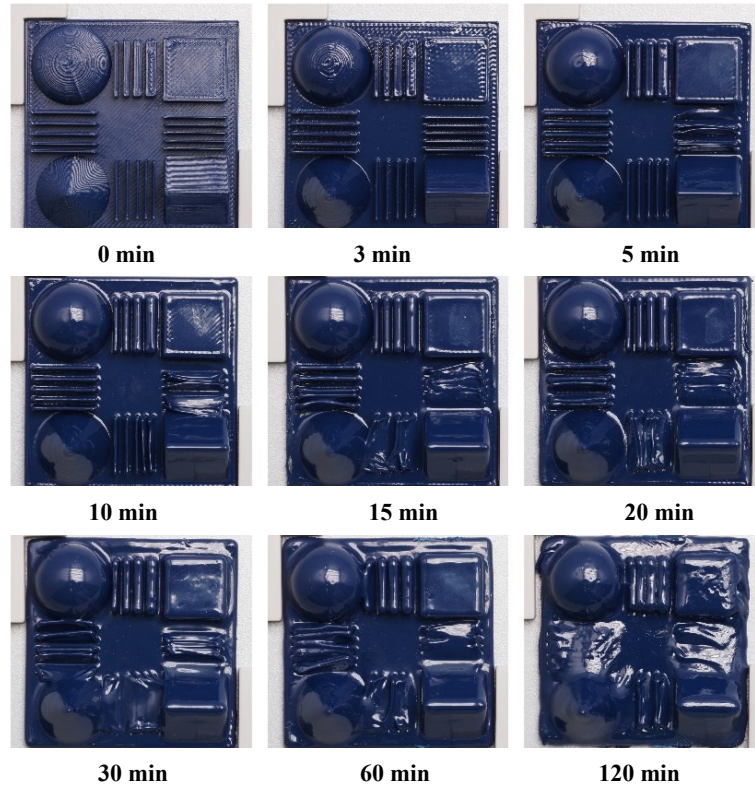
Tabulka 8: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm

| Doba vyhlazování | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 3 min            | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 5 min            | č      | č       | č      | č       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 10 min           | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 15 min           | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 20 min           | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č    | ž      | ž    | ž      |
| 30 min           | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č    | č      | č    | ž      |
| 60 min           | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č    | č      | č    | č      |
| 120 min          | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č       | č      | č    | č      | č    | č      |

žádné deformace

kroucení

kompletní destrukce



Obrázek 22: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s kvalitou tisku 0,3 mm

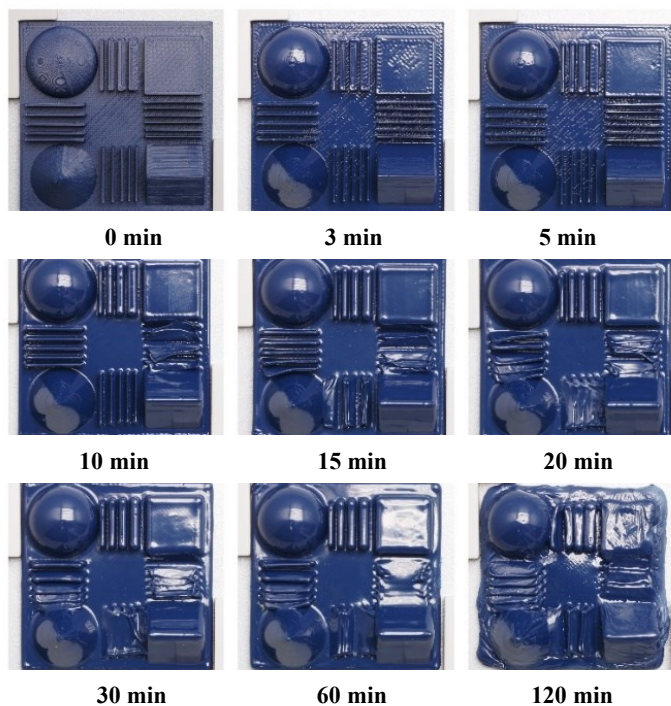
Dalšími výtisky, jejichž povrch byl vyhlazován acetonovými parami, jsou ASA testovací obrazce s rozlišením 0,15 mm. Tyto výtisky jsou zobrazeny na obrázku 23. Oproti ABS výtiskům se stejným rozlišením je povrch jednotlivých objektů kvalitnější a ucelenější. Stejně jako v případě výtisků s rozlišením 0,3 mm dochází u povrchu těchto výtisků ke zvýšení lesku již po třech minutách vyhlazování. V páté minutě leptání je povrch těles více vyhlazený, avšak změna není tolik razantní, jako tomu bylo u ASA výtisků s kvalitou tisku 0,3 mm. Po deseti minutách vyhlazování je povrch hranolu, kuželu i polokoule zcela vyhlazený. I přesto, že povrch kvádrů je více zacelený, stále je možné na jeho povrchu rozeznat jednotlivé tiskové vrstvy. I v tomto případě došlo po deseti minutách ve vyhlazovacím boxu k úplnému zborcení tenkých linek s tloušťkou 0,15 až 0,4 mm. Doba deseti minut byla vyhodnocena jako optimální. Barevné vyobrazení stavu jednotlivých linek je znázorněno v tabulce 9.

U těles dochází po patnácti minutách k výrazné změně jejich rozměrů. Ve třicáté minutě vyhlazování je patrná změna jejich rozměrů. Po třiceti minutách jsou všechny tenké linky (s tloušťkou 0,15 až 0,9 mm) zborceny. U tlustých linek s tloušťkou 1 až 2,5 mm je patrné zkrácení. Při pohledu na podložku je znatelné smršťování, které má vliv na samotné objekty (dochází k jejich postupné deformaci). Po hodině vyhlazování je obtížné rozeznat tenké linky od podložky. Smrštění podložky je čím dál více patrné. Po dvou hodinách je výtisk zcela zdeformován.

Tabulka 9: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,15 mm

| Doba vyhlazování | 0,15 mm | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 3 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 5 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 10 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 15 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 20 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 30 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 60 min           | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 120 min          | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | k       | k      | ž    | ž      | ž    | ž      |

žádné deformace      kroucení      kompletní destrukce



Obrázek 23: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s rozlišením 0,15 mm

U ASA výtisků s výškou vrstev 0,1 mm docházelo ke vzniku tzv. stringování (jev při kterém na výtisku zůstávají malé nitky filamentu). U širších linek je rozeznatelné nedokonalé zakončení vlákna. Vyhlazované výtisky jsou zobrazeny na obrázku 24. Po pěti minutách nastává kroucení tenkých linek, po deseti minutách jejich borcení. V desáté minutě vyhlazování jsou povrchy, s výjimkou kvádrů, zcela vyhlazeny. Optimální doba vyhlazování povrchu výtisku byla stanovena na deset minut. Po patnácti minutách dochází k deformaci podložky a po dvaceti minutách k jejímu smrštění. Ve třicáté minutě jsou všechny tenké linky zborceny, u širších linek je patrná změna jejich délky a na povrchu výtisku se objevují kráterky. Po dvou hodinách je celý výtisk zcela zdeformován a je patrné smrštění objektů (povrch polokoule). Stav linek je vyobrazen v tabulce 10.

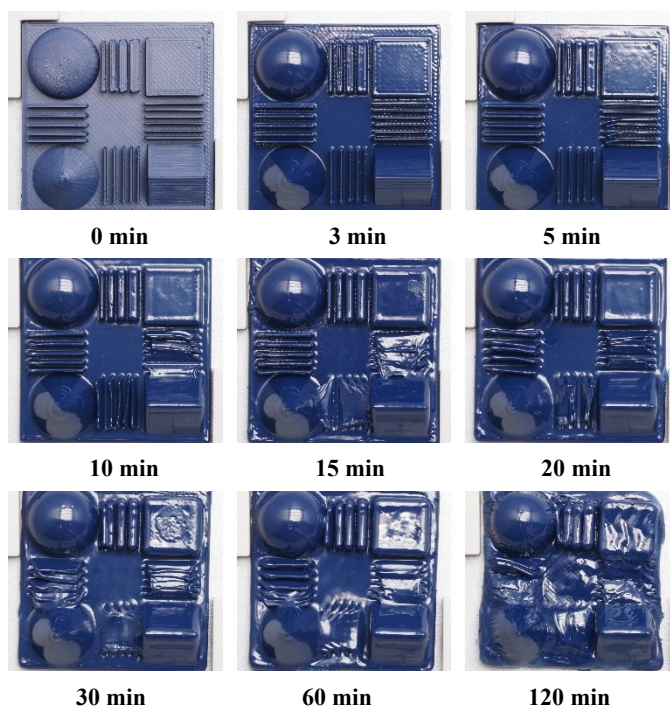
Tabulka 10: Stav linek v průběhu vyhlazování pro ASA výtisky s kvalitou tisku 0,1 mm

| Doba vyhlazování | 0,15 mm | 0,2 mm | 0,25 mm | 0,3 mm | 0,35 mm | 0,4 mm | 0,45 mm | 0,5 mm | 0,55 mm | 0,6 mm | 0,65 mm | 0,7 mm | 0,75 mm | 0,8 mm | 0,85 mm | 0,9 mm | 1 mm | 1,5 mm | 2 mm | 2,5 mm |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 3 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 5 min            | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 10 min           | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 15 min           | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 20 min           | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 30 min           | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 60 min           | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |
| 120 min          | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž       | ž      | ž    | ž      | ž    | ž      |

žádné deformace

kroucení

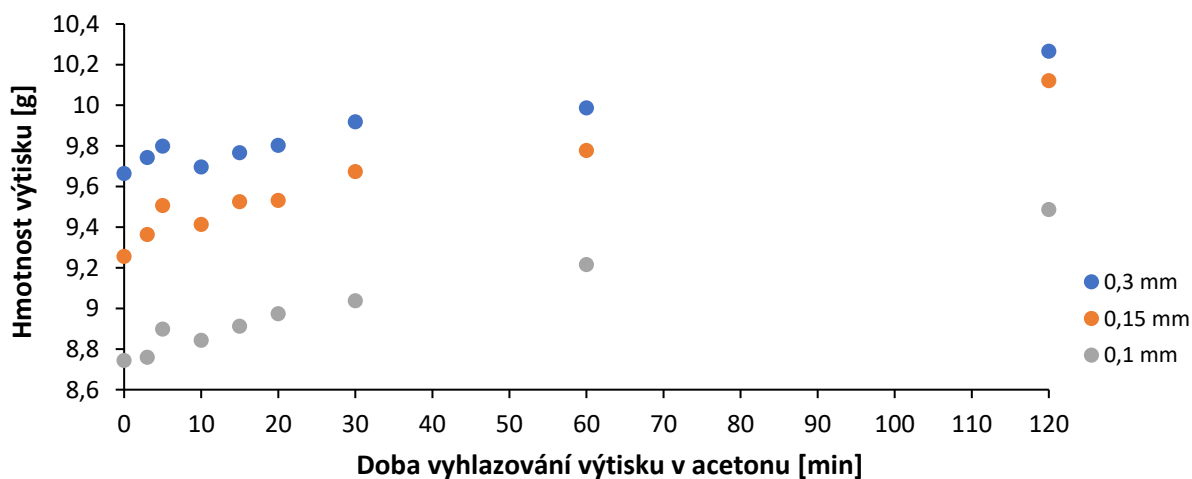
kompletní destrukce



Obrázek 24: Vyhlazování malých testovacích ASA objektů s rozlišením 0,1 mm

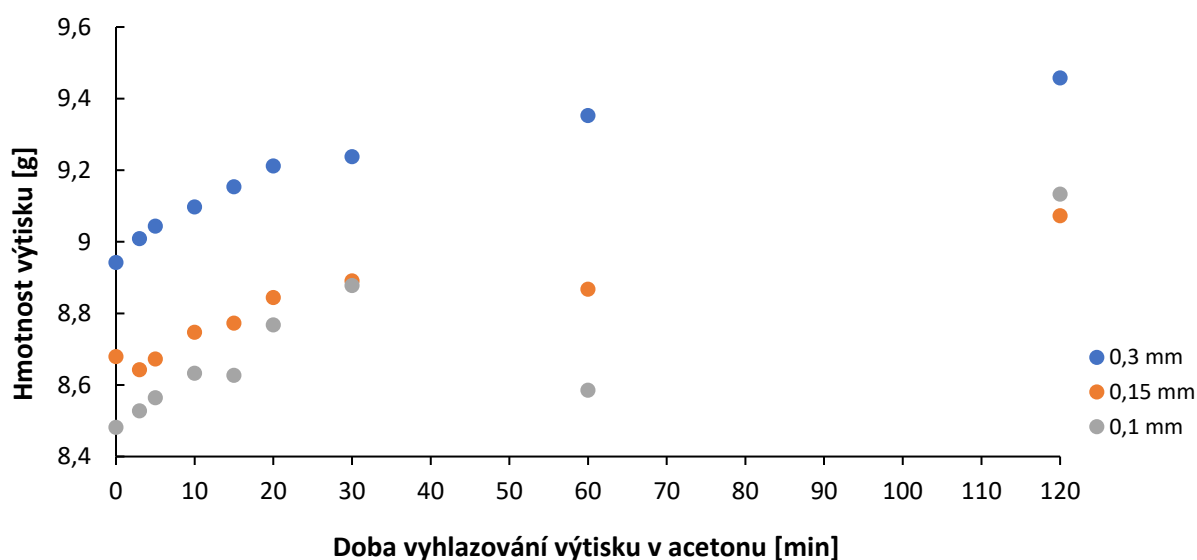
## 2.5 Hodnocení změny hmotnosti vyhlazovaných výtisků

Pro hodnocení změny hmotnosti vyhlazených výtisků byly všechny malé testovací objekty zváženy na analytických vahách. Z obrázku 25 je patrné, že hmotnost se zvyšující dobou ve vyhlazovacím boxu u jednotlivých výtisků stoupala. Růst hmotnosti je zapříčiněn absorpcí acetonových par do polymeru. Pro všechny nastavené kvality tisku je patrné, že čím nižší je rozlišení tisku, tím nižší je přírůstek hmotnosti výtisku. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena vyšší uzavřeností struktury či nižší mírou hrubosti povrchu u tisků s kvalitou tisku 0,1 mm.



Obrázek 25: Závislost změny hmotnosti ABS výtisků na době vyhlazování

Závislost hmotnosti na době vyhlazování pro ASA výtisky je vyobrazena na obrázku 26. U výtisků s rozlišením 0,3 mm došlo v závislosti na době vyhlazování k postupnému nárůstu hmotnosti. Mírný pokles hmotnosti nastává po jedné hodině vyhlazování, což je pravděpodobně způsobeno tím, že u výtisku došlo při jeho snímání z kovové podložky k deformaci a filament částečně zůstal nalepen na kovovém povrchu. Nejvyšší pokles nastal u výtisků s kvalitou 0,1 mm. Při porovnání výtisků ASA s ABS jsou ASA výtisky průměrně lehčí.



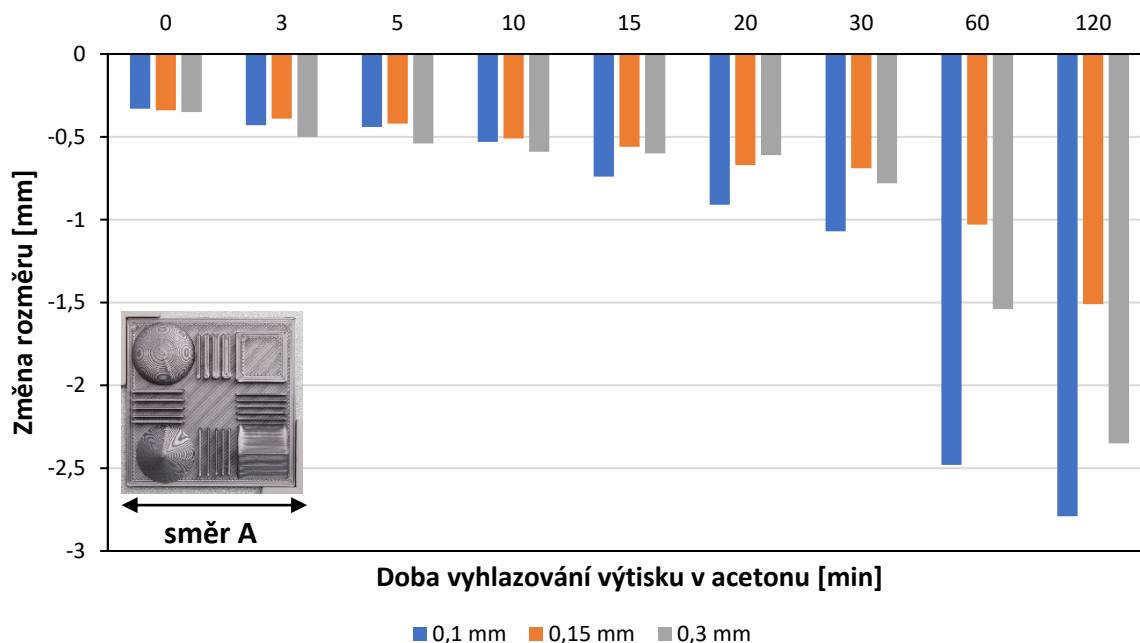
Obrázek 26: Závislost změny hmotnosti ASA výtisků na době vyhlazování

## 2.6 Změna rozměrů u jednotlivých objektů

V závislosti na době vyhlazování acetonovými parami došlo u všech objektů ke změně jejich rozměrů. Pro naměření změn délky a šířky bylo použito digitální posuvné měřítko. Nejvyšší rozměrové změny vykazovaly obecně výtisky zhotovené z materiálu ASA. Pro všechny objekty, vyjímaje linek, jsou vytvořeny grafy závislosti změny rozměrů na době vyhlazování zvláště pro jejich výšku a šířku. Změna rozměrů byla vypočítána jako rozdíl šířky/výšky objektu bez chemického vyhlazování a hodnota šířky/výšky objektu naměřená po určité době vyhlazování.

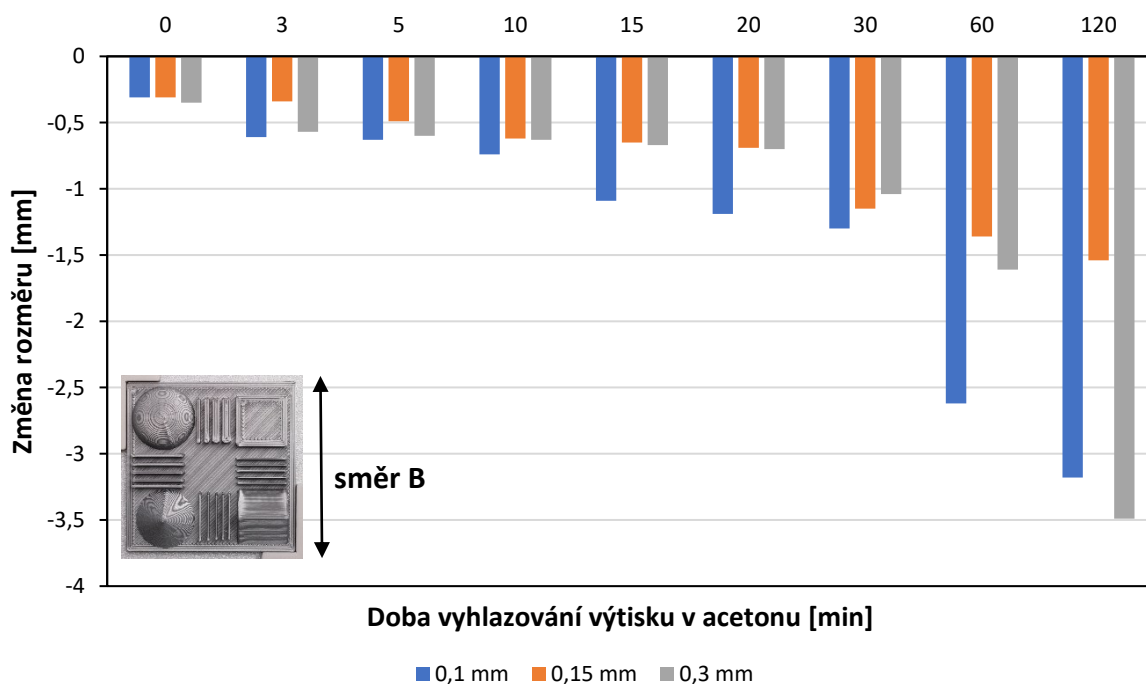
### 2.6.1 Změna rozměrů u ABS výtisků

Jako první byla měřena změna rozměrů podložky. Z grafu 27 je patrné, že čím vyšší je změna rozměru, tím razantnější bylo smrštění podložky. Nejvyšší změna rozměrů podložky byla zaznamenána u výtisků s kvalitou tisku 0,1 mm, nejnižší naopak u výtisků s kvalitou 0,15 mm. Skoková změna rozměrů nastává u výtisku vyhlazovaných po dobu jedné a dvou hodin, kdy došlo u podložky k její celkové deformaci.



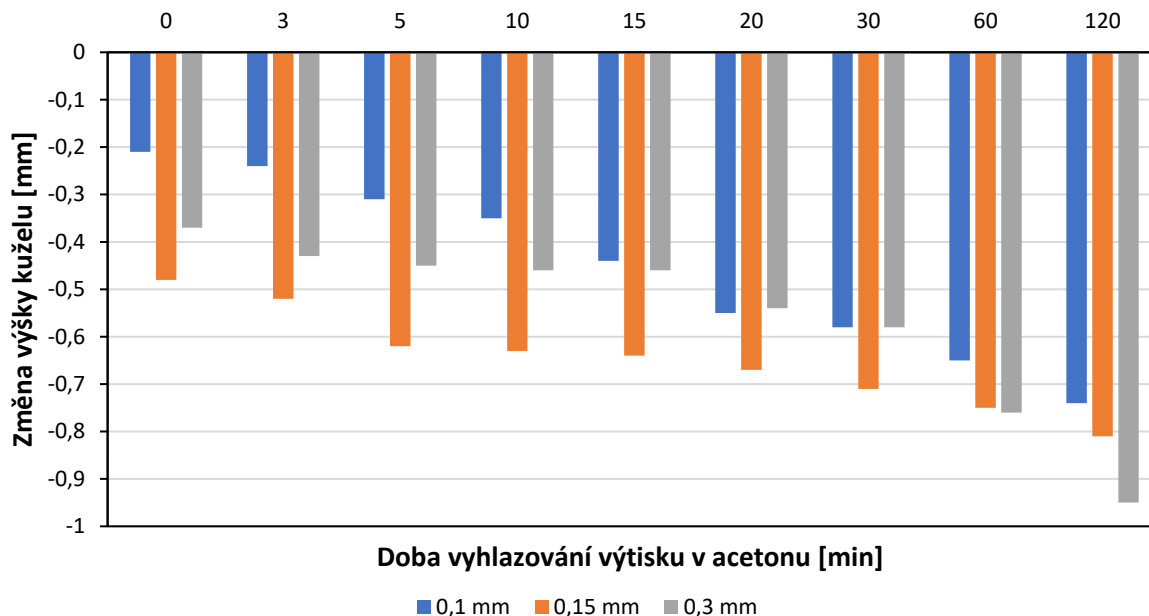
Obrázek 27: Změna rozměru podložky u ABS ve směru A

V grafu 28 je zobrazena změna rozměru podložky ve druhém směru. Opět průměrně nejvyšší změna byla naměřena u výtisků s kvalitou tisku 0,1 mm. Avšak po dvou hodinách vyhlazování byla největší deformace naměřena u výtisku s rozlišením 0,3 mm.



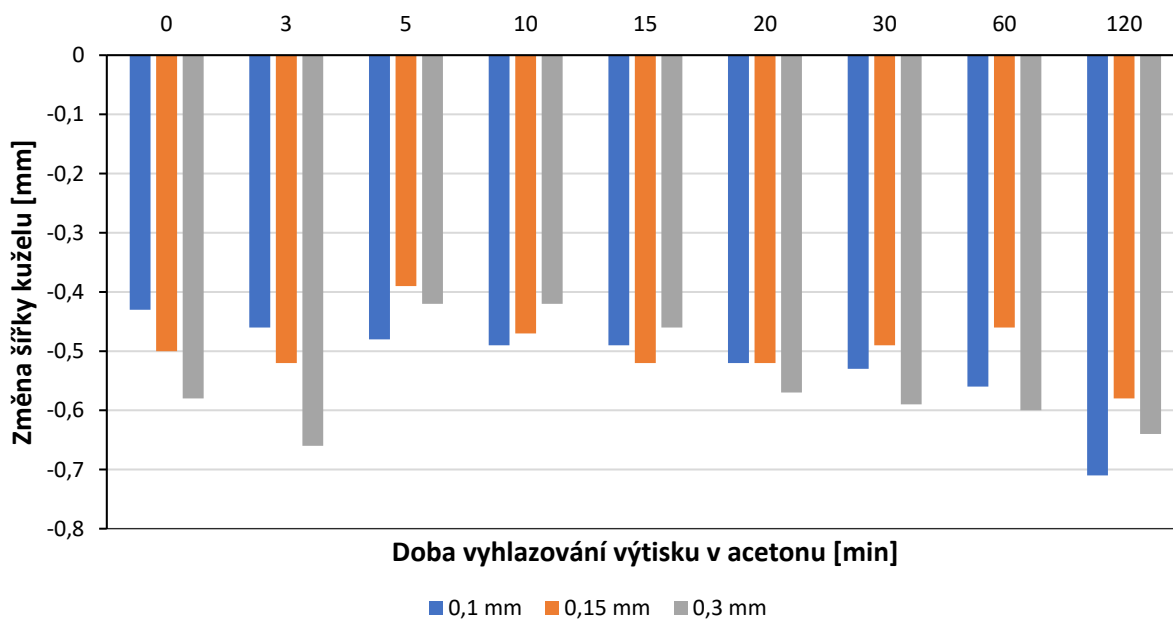
Obrázek 28: Změna rozměru podložky u ABS ve směru B

Další výrazná změna rozměrů je patrná u kuželu. Změna výšky kuželu pro všechny nastavení kvality tisku je vyobrazena v obrázku 29. Z grafu je patrné, že se zvyšující dobou vyhlazování vzorku dochází ke snížení výšky kuželu. Největší změna výšky byla naměřena u výtisků vyhlazovaných po dobu jedné a dvou hodin.



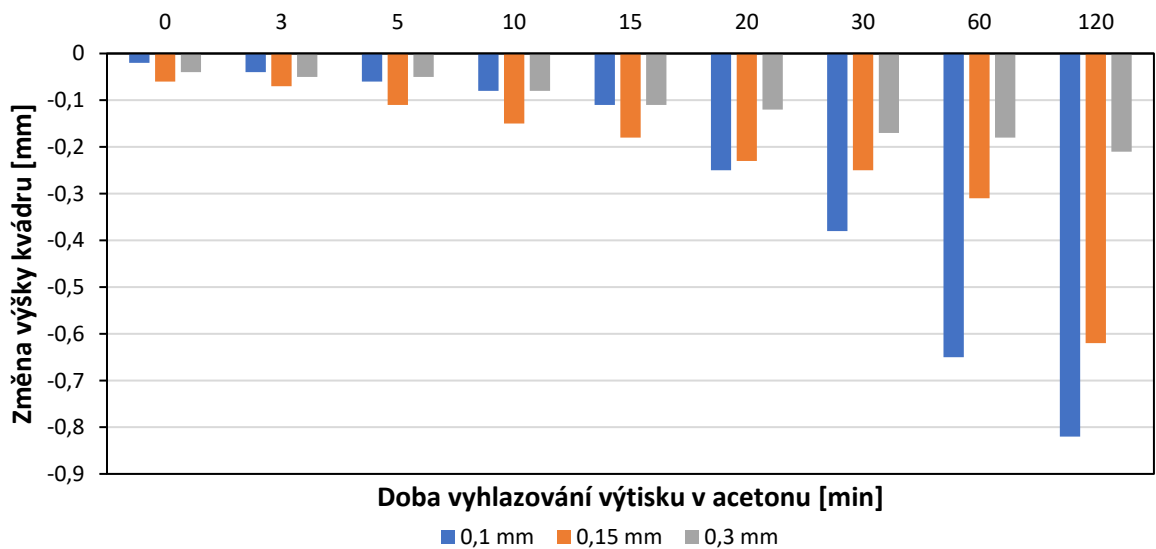
Obrázek 29: Změna výšky kuželu u ABS výtisku

Z obrázku 30 je patrné, že v průběhu vyhlazování došlo u kuželu k jeho postupnému smršťování. To znamená, že hodnota šířky klesala. Nejvíce patrná změna nastává u výtisků s kvalitou tisku 0,1 mm.



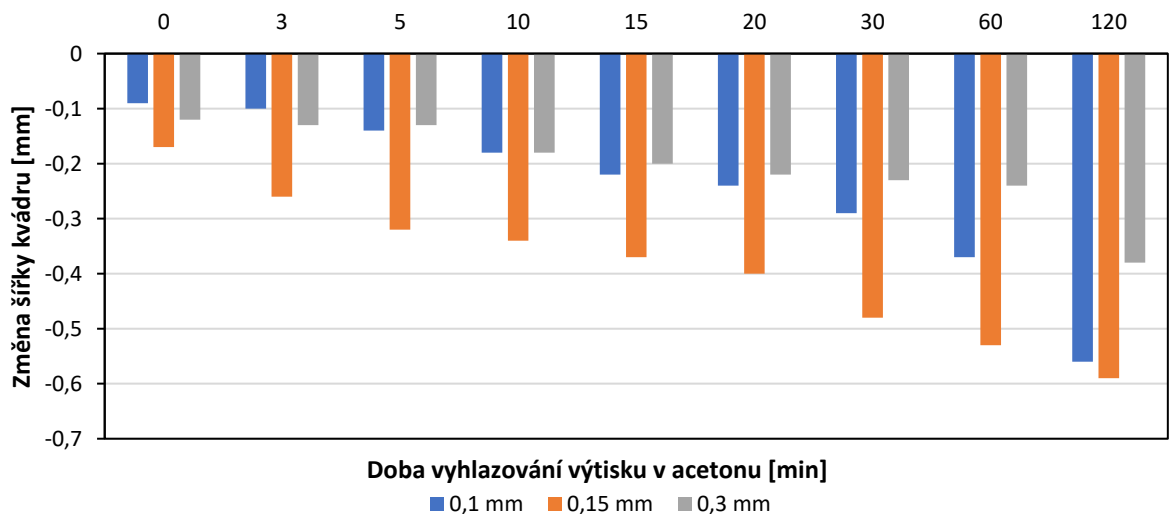
Obrázek 30: Změna šířky kuželu u ABS výtisku

Dalším objektem, u kterého lze vidět změnu jeho rozměrů, je kvádr. V obrázku 31 je vynesena závislost změny výšky kvádrů na době vyhlazování acetonovými parami pro ABS výtisky. V průběhu vyhlazování došlo k postupnému smršťování a propadání vrchních vrstev. To znamená, že výška kvádrů postupně klesala. Největší změna byla naměřena u výtisků s kvalitou tisku 0,1 mm. Naopak nejmenší změnu výšky vykazovaly výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm. Opět výtisky, jejichž povrch byl vyhlazován po dobu dvou hodin, vykazují skokovou změnu výšky především kvůli deformované podložce.



Obrázek 31: Změna výšky kvádrů u ABS výtisku

Při pohledu na obrázek 32, jež zobrazuje změnu šířky kvádrů v závislosti na době vyhlazování je zřejmé, že se zvyšující dobou klesala hodnota šířky kvádrů. U kvádrů tedy došlo k jeho postupnému smršťování. Největší změnu vykazovaly výtisky s kvalitou tisku 0,15 mm a 0,1 mm.

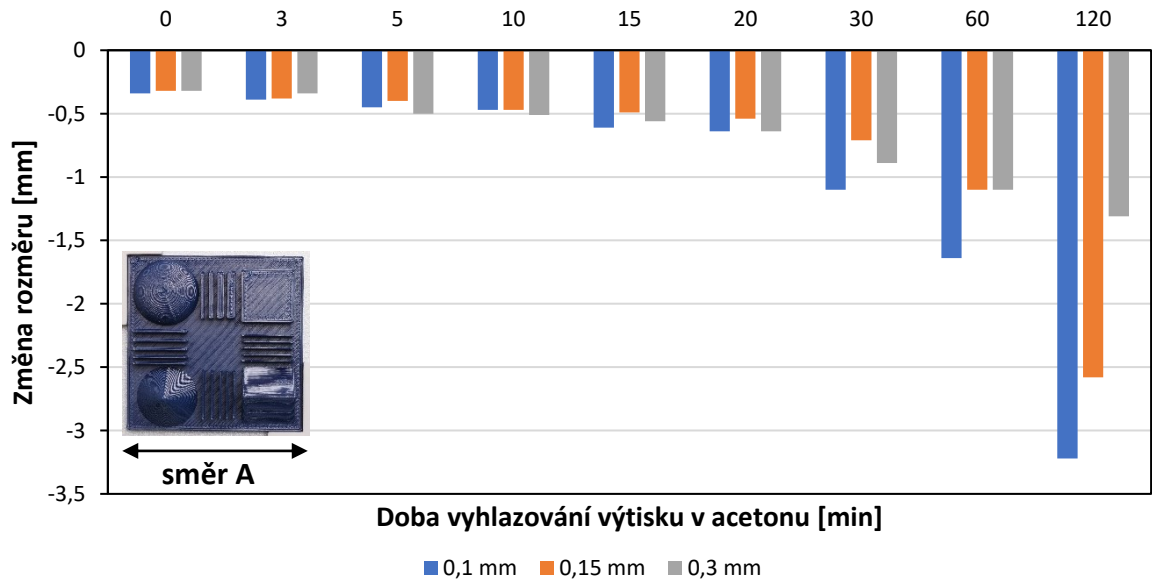


Obrázek 32: Změna šířky kvádrů u ABS výtisku



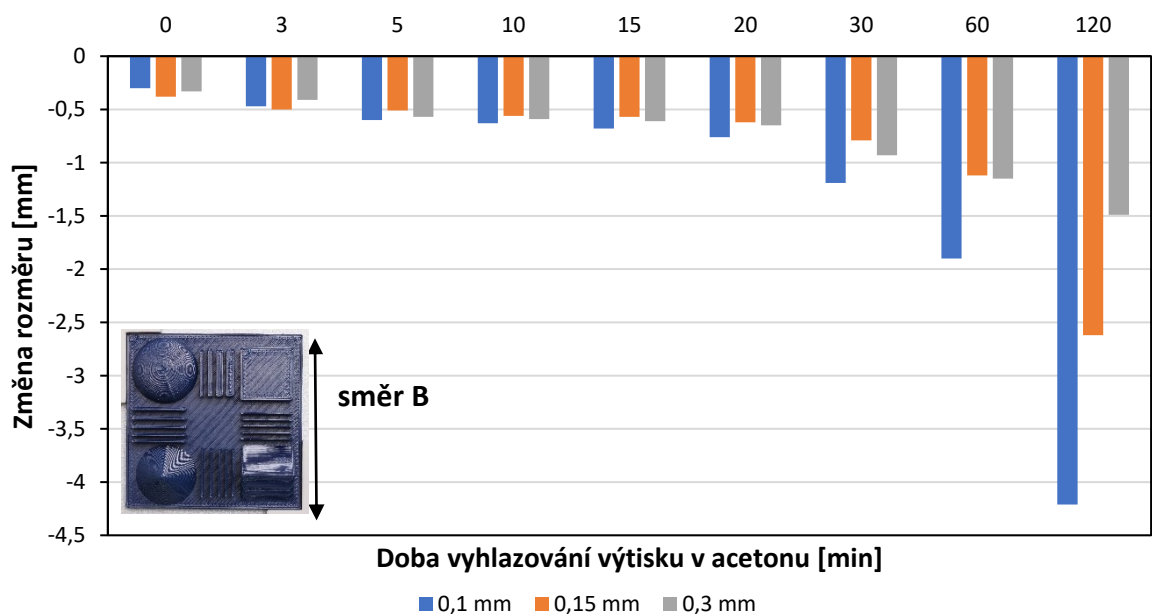
## 2.6.2 Změna rozměrů u ASA výtisků

U výtisku zhotovených z ASA filamentu byly také patrné změny v průběhu vyhlazování. Změna rozměrů ve směru A je zobrazena na obrázku 33. Nejvyšší změna nastává u výtisků s kvalitou tisku 0,15 mm a 0,1 mm. Ke skokové změně došlo u výtisků vyhlazovaných po dobu dvou hodin.



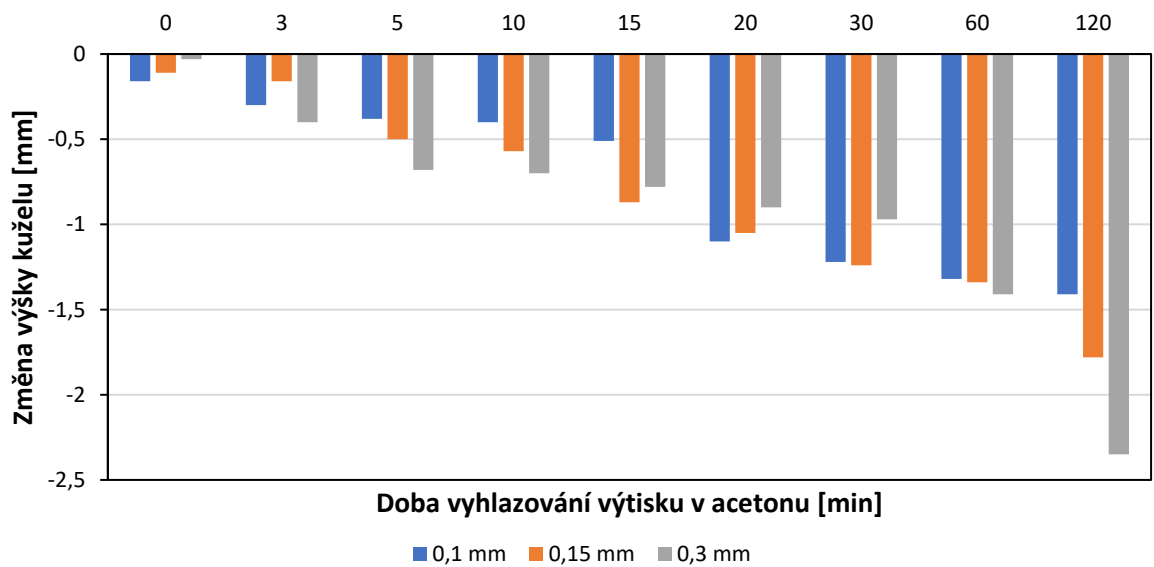
Obrázek 33: Změna rozměrů podložky u ASA ve směru A

Průměrně větší změna rozměrů podložky nastává ve směru B, kdy jsou jednotlivé hodnoty vyobrazeny na obrázku 34. Se zvyšující dobou vyhlazování dochází ke smršťování výtisku a tedy i jeho deformaci.



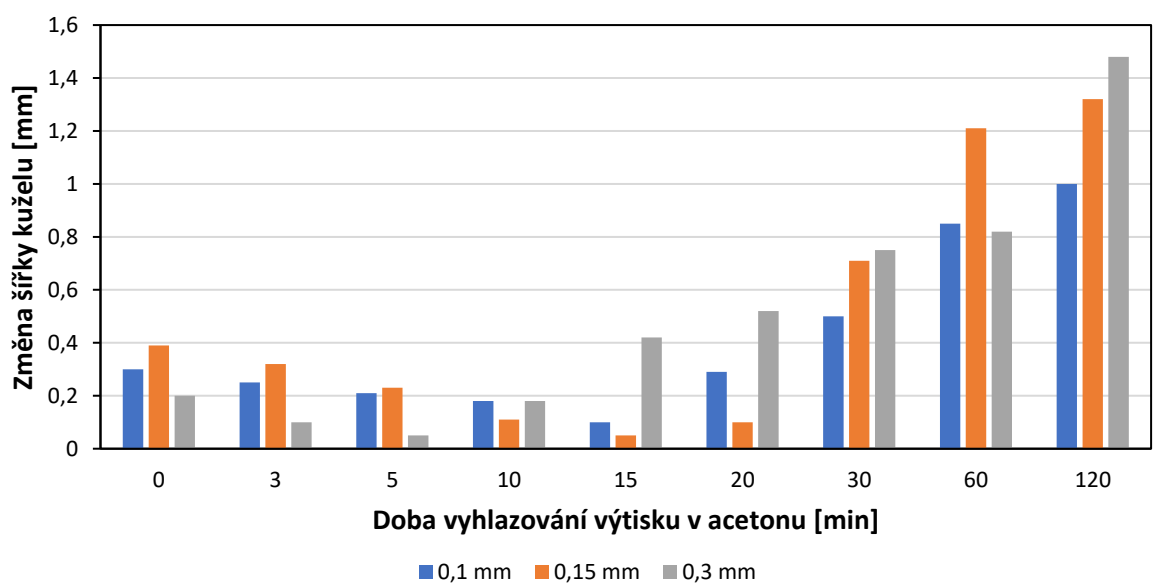
Obrázek 34: Změna rozměrů podložky u ASA ve směru B

Na obrázku 35 je zobrazena závislost změny výšky kuželu pro výtisky vyhotovené z materiálu ASA. Oproti výšce kuželu u výtisků z ABS, kde největší změna rozměrů byla naměřena u výtisků s kvalitou tisku 0,1 mm, zde je největší změna výšky kuželu u výtisků s rozlišením 0,3 mm.



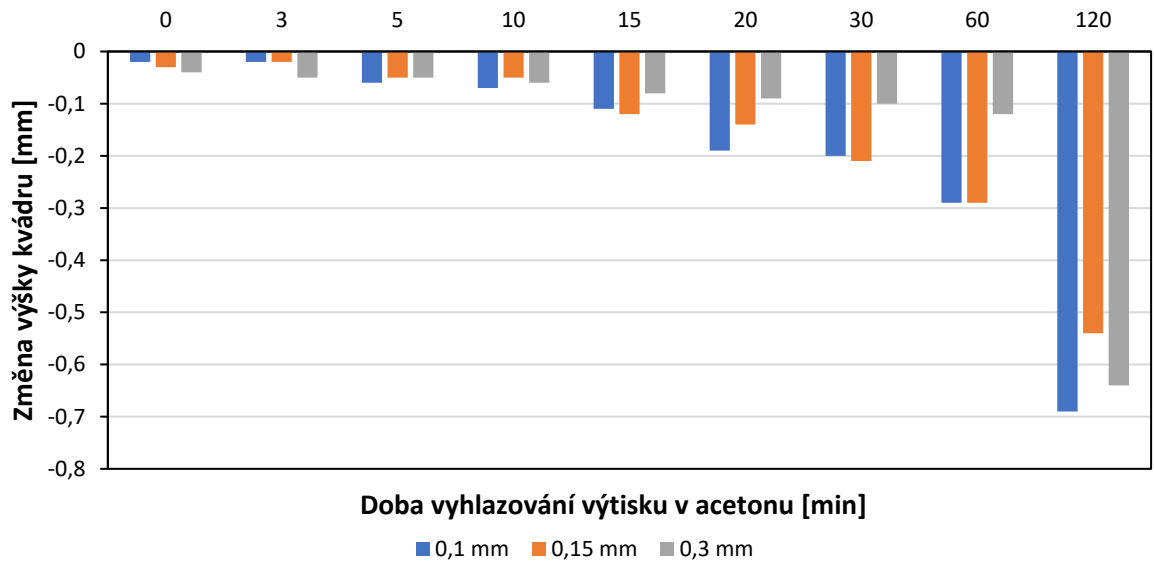
Obrázek 35: Změna výšky kuželu u ASA výtisku

V případě šířky kuželu, kdy je změna zobrazena na obrázku 36, došlo k jejímu zvýšení a tedy kužel se rozšířil. Toto rozšíření je patrné u výtisků s rozlišením 0,3 mm po deseti minutách vyhlazování. Rozšíření u výtisků s kvalitou tisku 0,15 mm a 0,1 mm nastalo až po dvaceti minutách vyhlazování.



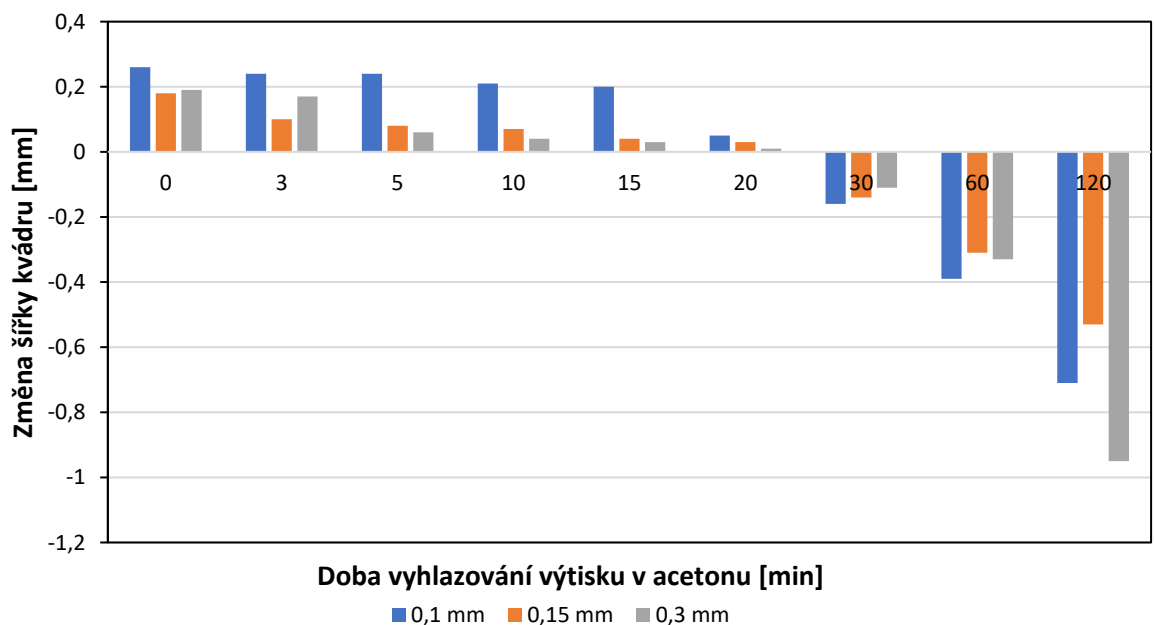
Obrázek 36: Změna šířky kuželu u ASA výtisku

V případě kvádrů u výtisků z filamentu ASA je z fotografií patrné postupné propadání vrchních vrstev do spodních. To stejné lze vyčíst i z obrázku 37, kdy ke skokovému nárůstu změny výšky kvádrů došlo po dvou hodinách vyhlazování.



Obrázek 37: Změna výšky kvádrů u ASA výtisku

V případě změny šířky kvádrů, zobrazené na obrázku 38, je patrný pokles jejího poklesu do dvacáté minuty vyhlazování. Z toho vyplývá, že do dvacáté minuty docházelo u kvádrů k jeho rozšíření a naopak od třicáté minuty byla změna šířky kvádrů vyšší a z toho vyplývá, že u kvádrů došlo k jeho smrštění.



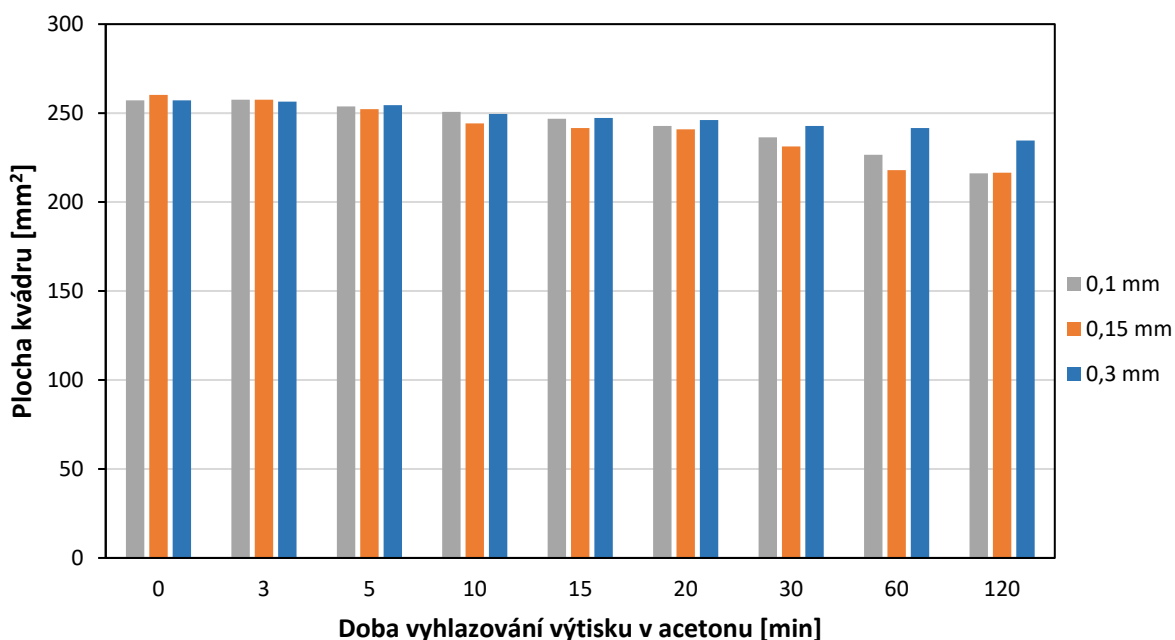
Obrázek 38: Změna šířky kvádrů u ASA výtisku

## 2.7 Změna rozměrů (obrazová analýza)

Další možností, jak lze vyhodnotit změnu rozměrů u jednotlivých obrazců, je využití metody obrazové analýzy. Prvním krokem obrazové analýzy je pořízení kvalitních digitálních fotografií. Následně lze s využitím příslušného software vyhodnotit různé parametry (plochu, délku, obvod a další) [54].

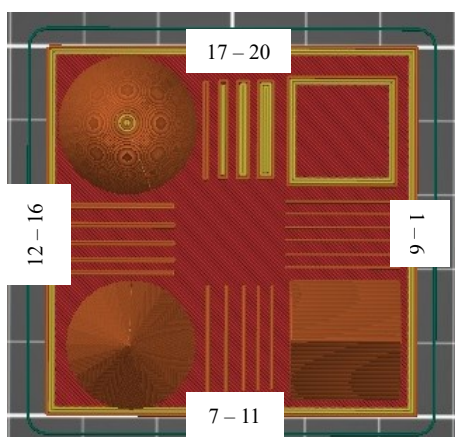
### 2.7.1 Obrazová analýza pro vyhlazované výtisky z filamentu ABS

Prvním měřeným parametrem byla plocha kvádrů u jednotlivých výtisků. Závislost naměřené plochy kvádrů na době vyhlazování pro materiál ABS je patrná z obrázku 39. Z naměřených hodnot vyplývá, že v průběhu vyhlazování došlo u ABS kvádrů ke snižování hodnoty jeho plochy. To znamená, že analýza obrazu potvrzuje smršťování jednotlivých objektů v důsledku působení acetonových par, což je v souladu s měření digitálním posuvným měřítkem. Nejmenší změna plochy kvádrů byla naměřena u výtisků s rozlišením 0,3 mm, nejvyšší naopak u výtisků s rozlišením 0,1 mm.



Obrázek 39: Změna plochy kvádrů u ABS výtisků

Obrazová analýza byla dále využita při měření změny délky a šířky linek. Pro snazší prezentaci výsledků byly jednotlivé linky očíslovány. Samotné očíslování je patrné z obrázku 40. Následně byly rozděleny do čtyř skupin dle počtu průchodů tiskové hlavy (kolik průchodů tiskové hlavy bylo potřeba pro její vznik), což je vyobrazeno v tabulce 11.

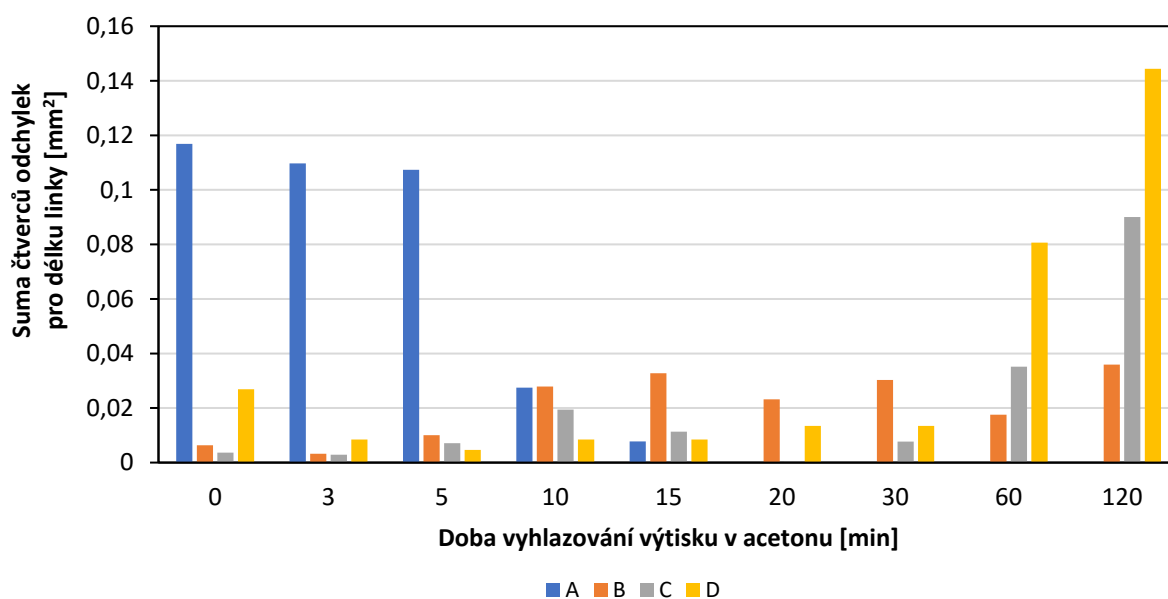


Obrázek 40: Číslování linek

Tabulka 11: Rozdělení linek do skupin A – D

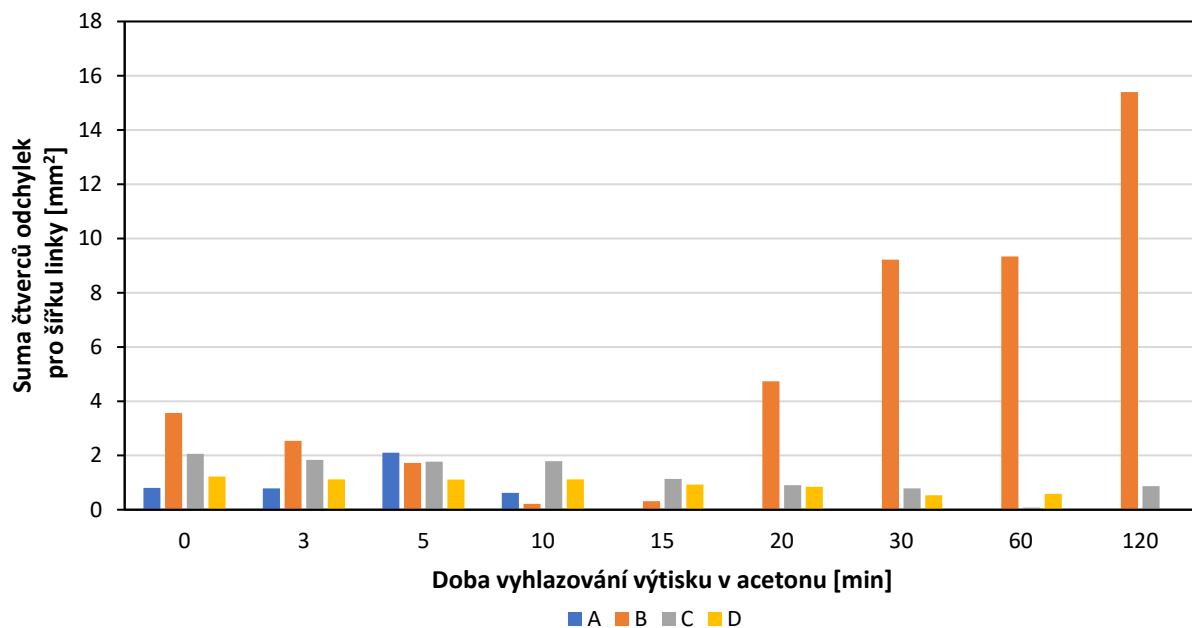
| Číslo linky | Počet průchodů tiskové hlavy | Označení skupiny |
|-------------|------------------------------|------------------|
| 1 až 11     | 1                            | A                |
| 12 až 17    | 2                            | B                |
| 18 a 19     | 4                            | C                |
| 20          | 6                            | D                |

Naměřené hodnoty pro jednotlivé linky a různé časy vyhlazování, získané metodou obrazové analýzy, byly následně odečteny od původních hodnot (hodnoty délky a šířky linek před vyhlazováním). Z těchto rozdílů byly následně vypočítány odchylky zvláště pro tloušťku a délku linek s využitím funkce sumy čtverců (součet druhých mocnin hodnot tloušťky/délky). V obrázku 41 je zobrazena změna délky linek pro výtisky s kvalitou tisku 0,3 mm. U všech linek došlo v průběhu vyhlazování k jejich postupnému smrštění, tedy hodnota jejich délky klesala.



Obrázek 41: Změna délky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm

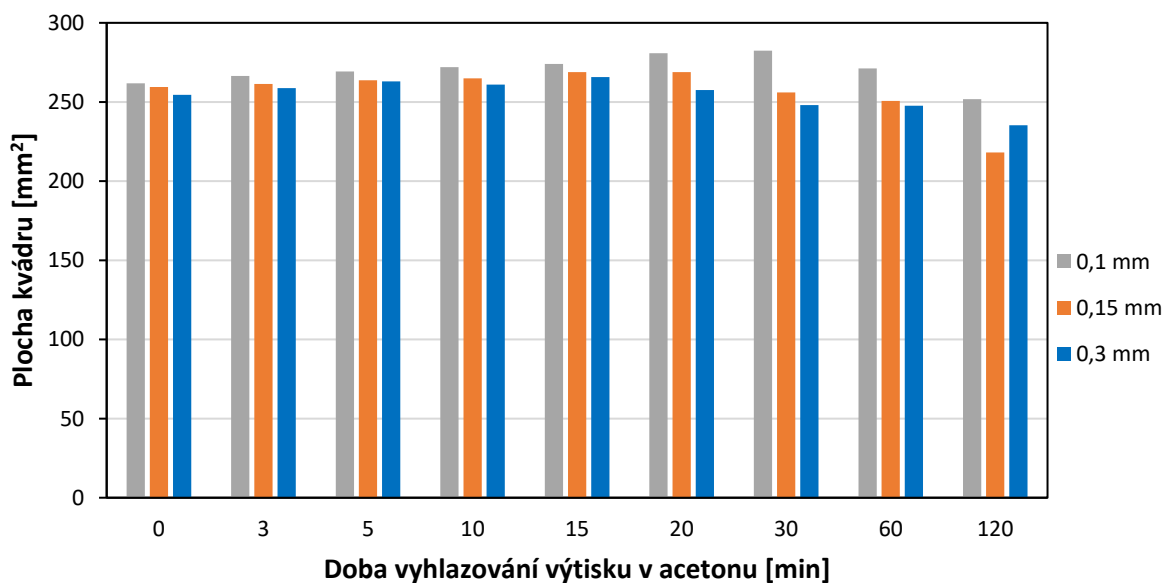
Při pohledu na změnu u tloušťky linek jsou rozdíly velmi málo patrné. Obecně u většiny linek s rostoucí dobou vyhlazování dochází k jejich mírnému rozšiřování vlivem jejich naleptávání. Z obrázku 42 je patrná skoková změna v odchylce od původního rozměru u linek vytištěných dvěma průchody tiskové hlavy. Ke vzrůstu dochází ve dvacáté minutě vyhlazování.



Obrázek 42: Změna tloušťky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm

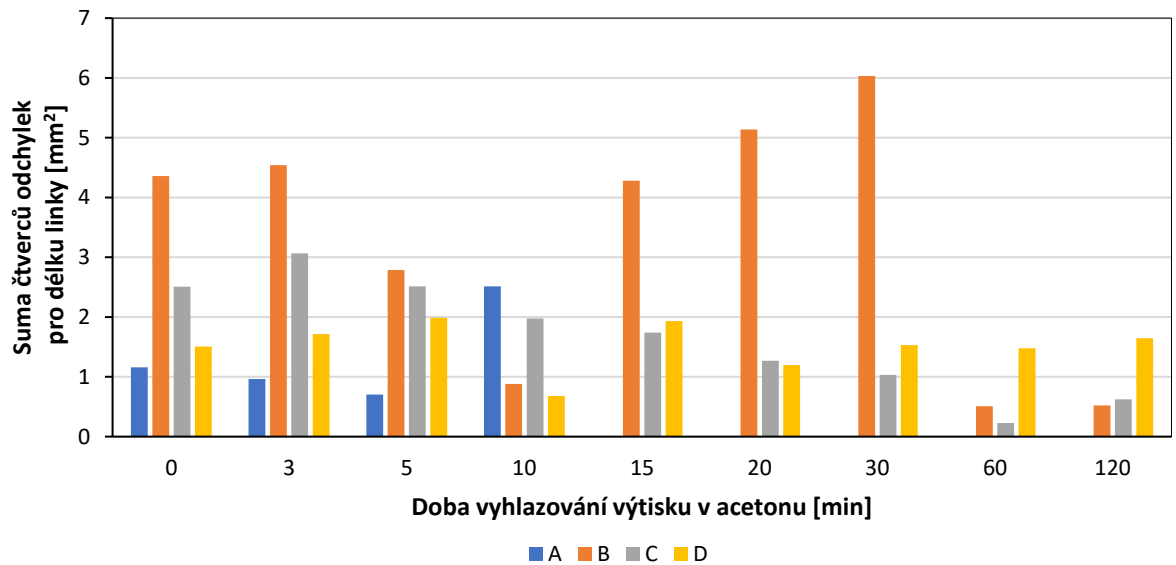
### 2.7.2 Obrazová analýza pro vyhlazované výtisky z filamentu ASA

Metoda obrazové analýzy byla využita také u ASA výtisků. Změna plochy je vyobrazena v obrázku 43. Do třicáté minuty vyhlazování dochází u výtisků s rozlišením 0,1 mm ke zvyšování hodnoty plochy čtverce, v případě výtisků s rozlišením 0,15 mm pouze do minuty dvacáté a u výtisků s rozlišením 0,3 mm jen do patnácté minuty. Následně dochází k postupnému klesání hodnoty plochy kvádrů, což se projevuje ve formě smršťování.



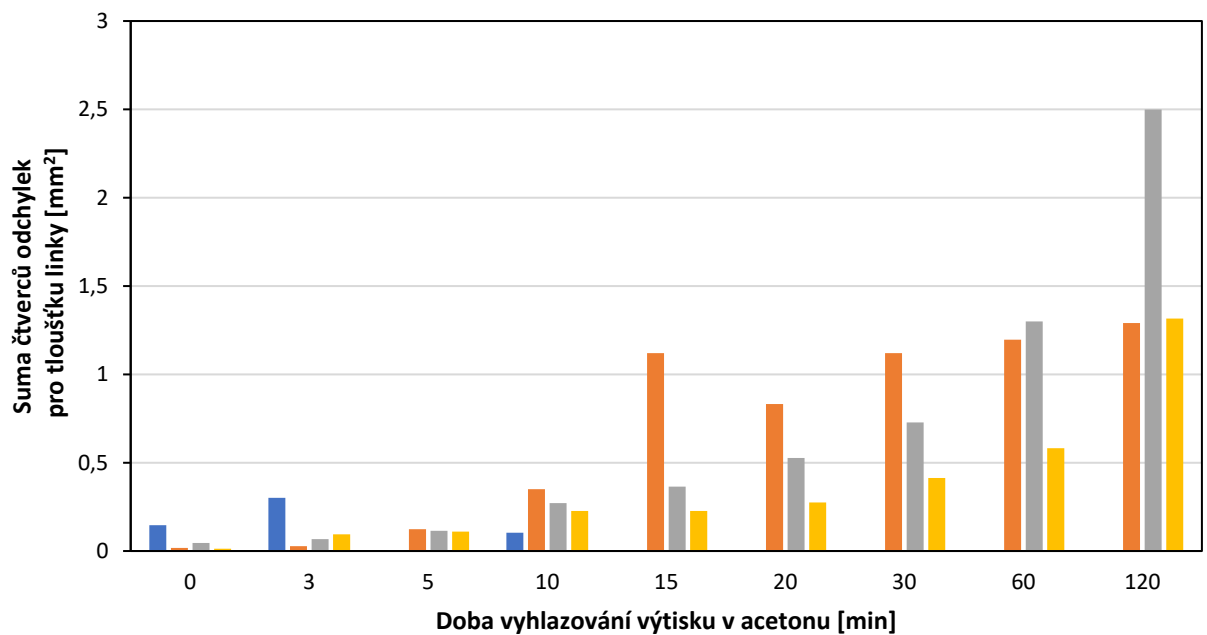
Obrázek 43: Změna plochy kvádrů u ASA výtisků

V případě změny délky linek u ASA výtisků zobrazených v obrázku 44 opět došlo v průběhu vyhlazování k jejich postupnému zkrácení. Míra odchýlení od původního rozměru je zde větší oproti ABS linkám. Největší změna rozměrů nastává průměrně u středních linek, tedy u linek s tloušťkou 0,5 až 0,75 mm. Je velmi zajímavé, že po hodině vyhlazování je míra odchýlení podstatně nižší.



Obrázek 44: Změna délky linek u ABS výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm

Na obrázku 45 je zobrazena změna tloušťky jednotlivých linek. Nejvyšší míra odchýlení byla naměřena u širších linek, a to především u výtisků vyhlazovaných po dobu dvou hodin. Je patrné, že v průběhu vyhlazování došlo u všech linek k jejich postupnému smrštění.

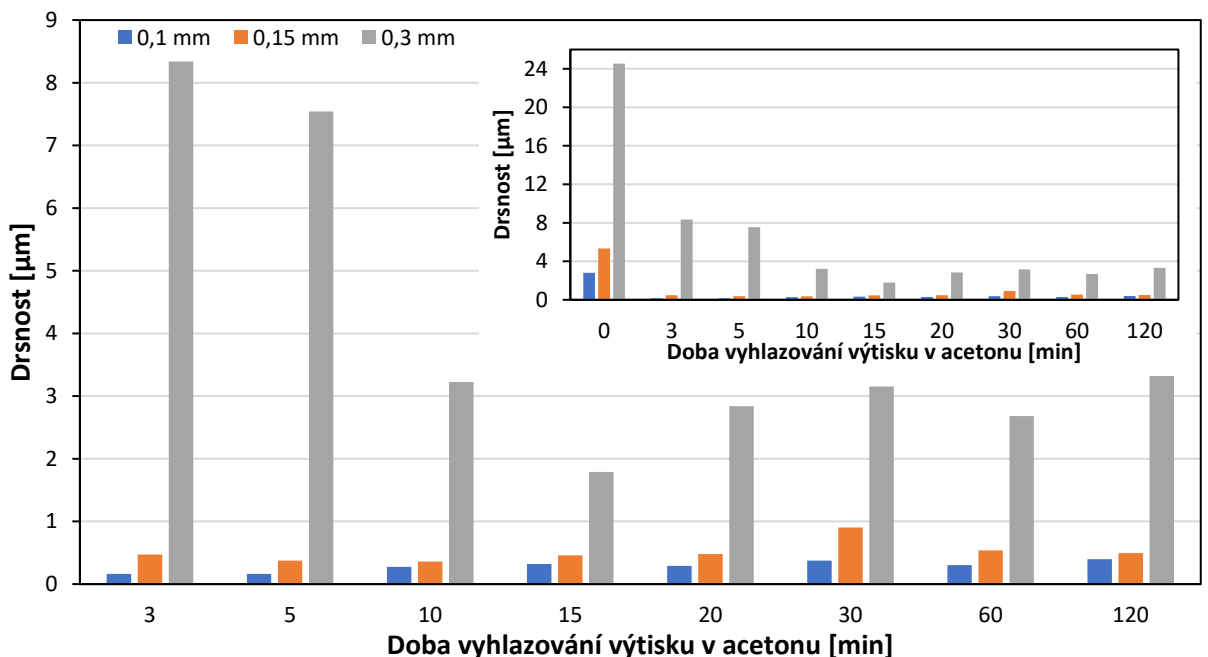


Obrázek 45: Změna tloušťky linek u ASA výtisku s kvalitou tisku 0,3 mm

## 2.8 Drsnost povrchu hranolu

Dalším měřeným parametrem na vyhlazovaných výtiscích byla drsnost povrchu. Zvoleným objektem, na kterém byla drsnost měřena, byla šikmá plocha hranolu. Pro měření drsnosti byl využit mobilní 3D mikroskop GelSight. Zařízení se skládá z průhledného elastomeru, jež je opatřen reflexní vrstvou krycí membrány. V momentě, kdy dojde k přitlačení elastomeru na měřený povrch, dojde u membrány k její deformaci (deformace do tvaru měřeného předmětu). Pro záznam obrazu je využívána kamera se specifickým osvětlení povrchu [55]. Po nasnímání jsou výsledky zobrazovány na tabletu, k němuž je zařízení připojeno. Ve speciálním software je pak možné provedení obrazové analýzy [56].

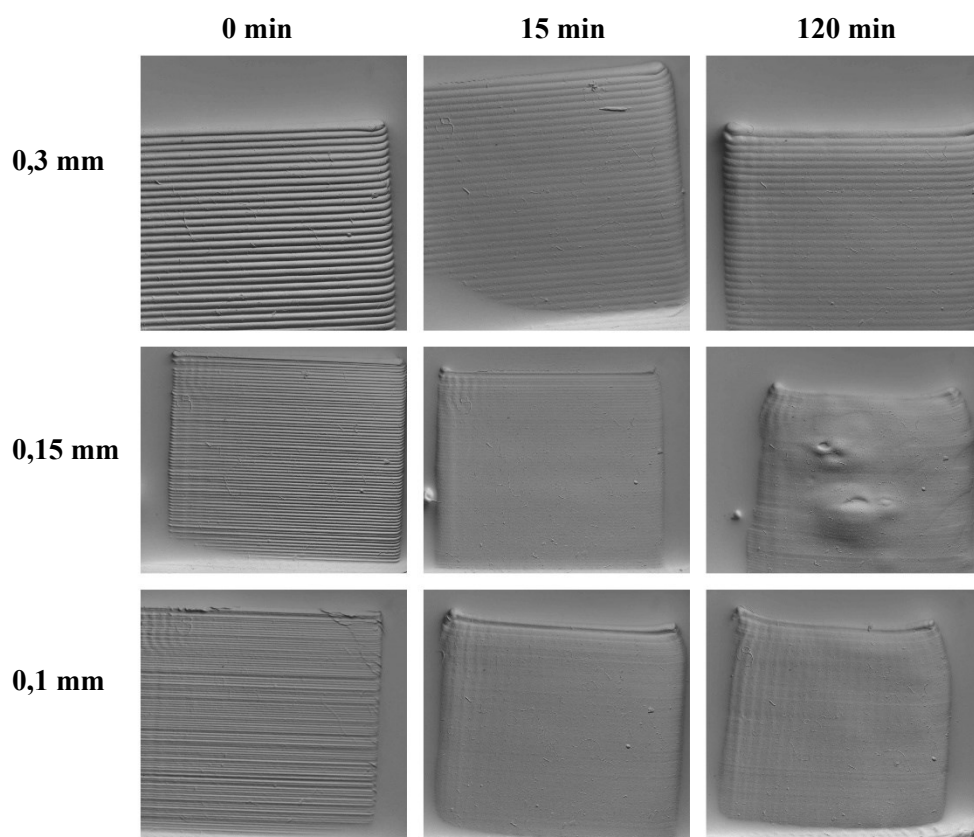
Zařízení dokáže vyhodnotit řadu parametrů, z nichž byly vybrány pouze některé. První je veličinou  $R_a$ .  $R_a$  značí aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu. Další veličinou je  $R_z$ , jež uvádí průměrnou hodnotu z absolutních hodnot pěti maxim a pěti minim profilu křivky. Parametr  $R_a$  je zvláště vyhodnocen pro každý profil a jeho výslednou hodnotou je průměrná hodnota  $R_a$  [57]. V obrázku 46 jsou uvedeny hodnoty průměrné  $R_a$  pro drsnost ABS hranolu. Při vyhodnocování drsnosti byl v obou případech používán parametr průměrné  $R_a$ . Jak je patrné z obrázku, největší změna drsnosti povrchu byla naměřena u výtisků s kvalitou tisku 0,3 mm. V průběhu vyhlazování došlo k viditelnému poklesu drsnosti. Změna drsnosti vyhlazovaného povrchu oproti povrchu nevyhlazovanému je vcelku vysoká, ačkoliv při vizuálním zhodnocení taková výrazná změna nebyla pozorována.



Obrázek 46: Změna drsnosti ABS hranolu v závislosti na době vyhlazování

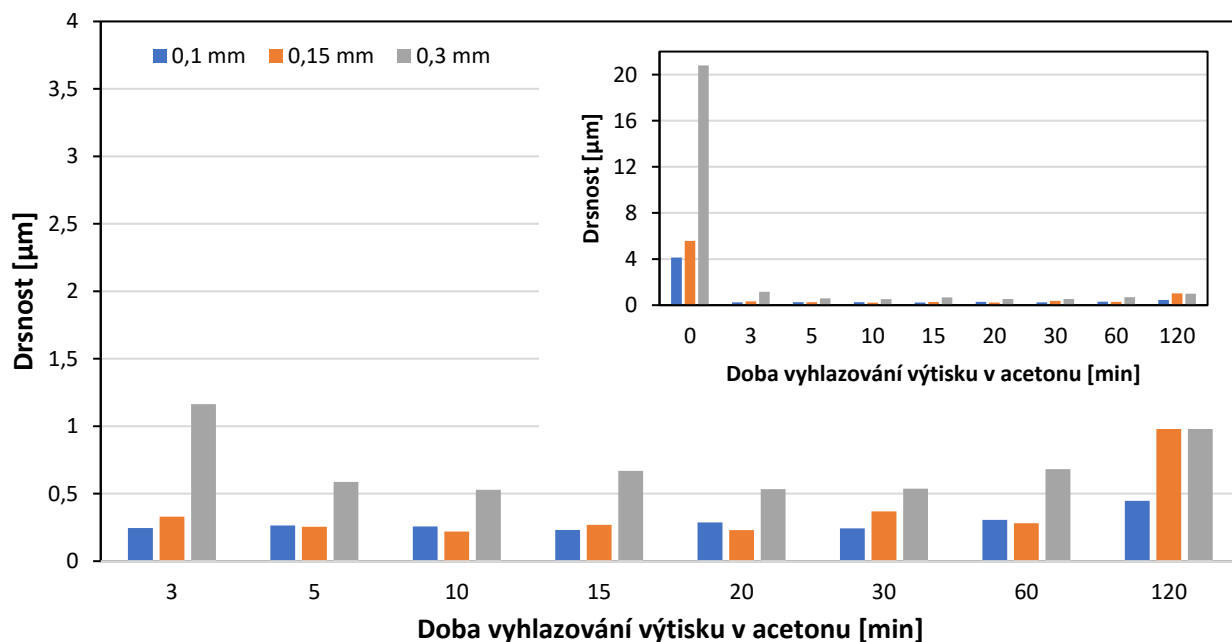


Na obrázku 47 jsou vyobrazeny fotografie povrchů hranolu pro ABS výtisky vystavené parám acetonu po určitý čas. Tyto fotografie jsou pořízeny přímo samotným zařízením GelSight. Ze snímků je patrná změna drsnosti povrchu a také změna tvaru hranolu (ohnuté rohy). V případě hranolu s výškou vrstev 0,15 mm vyhlazovaném po dobu dvou hodin jsou na povrchu zaznamenány vzniklé boule.



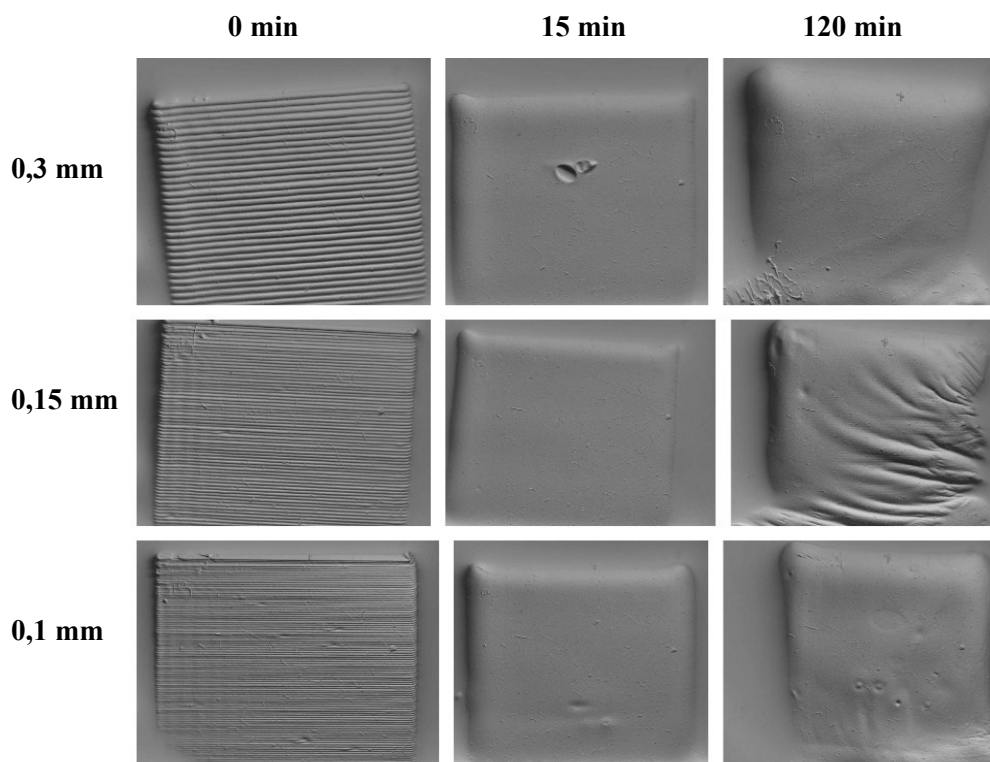
*Obrázek 47: Nakloněná rovina ABS hranolu v průběhu vyhlazování*

Stejným způsobem byla proměřena drsnost povrchu hranolu u ASA výtisků. Změna drsnosti v průběhu vyhlazování je zobrazena na obrázku 48. Při porovnání drsností povrchu u ABS výtisku a drsnosti povrchu ASA výtisku je v případě ASA výtisku znatelná skoková změna drsnosti již po třech minutách vyhlazování. Se vzrůstající dobou vyhlazování se hodnota drsnosti dále příliš nemění.



Obrázek 48: Změna drsnosti ASA hranolu v závislosti na době vyhlazování

Na obrázku 49 je zhotovená koláž topologie povrchu pro ASA výtisky. Při porovnání výtisků s různými výškami vrstev je patrné, že po patnácti minutách vyhlazování je již povrch hranolu zcela vyhlazen, avšak na úkor změny celkového tvaru objektu. Po dvou hodinách je na povrchu výtisků s rozlišením 0,15 mm patrné smrštění. Na povrchu hranolu u výtisku s kvalitou tisku 0,1 mm jsou po stejném čase vyhlazování viditelné kráterky.



Obrázek 49: Nakloněná rovina ASA hranolu v průběhu vyhlazování

### 3 Závěr

V teoretické části této práce jsou popsány principy jednotlivých 3D tiskových technologií a jejich využití v různých průmyslových a aplikačních oblastech. V dané části je pak podrobněji popsána technologie FDM 3D tisku, která byla využita v této práci. Součástí teoretické práce je rovněž popis využívaných materiálu při FDM tisku a také možné dokončovací zpracování 3D výtisků.

Experimentální část se zabývá realizací dvou druhů testovacích obrazců vytištěných ze tří druhů filamentů (PLA, ABS a ASA) s následným zhodnocení kvality reprodukce v závislosti na nastavené kvalitě tisku. Při tisku bylo zjištěno, že nelze vytisknout velký PLA testovací obrazec s rozlišením 0,1 mm a malý ABS testovací obrazec s rozlišením 0,1 mm s výchozím nastavením tiskového profilu. Po korekci typu a množství výplně a také teploty podložky a tiskové hlavy se podařilo malé testovací ABS obrazce reprodukovat. Z pohledu dosažené kvality reprodukováných výtisků měly nejvyšší tiskovou kvalitu výtisky s rozlišením 0,1 mm za cenu delší doby tisku. Avšak velmi často u těchto jemných tisků dochází zároveň k deformaci jednotlivých částí (například linek). Z pohledu na samotný tisk lze konstatovat, že až na problémy s profilem kvality 0,1 mm byl nejméně problémový a velmi kvalitní tisk z filamentu PLA.

V druhé části práce byly malé testovací obrazce z filamentů ABS a ASA vyhlazovány parami acetonu ve vyhlazovacím boxu po dobu 3, 5, 10, 15, 20, 30, 60 a 120 minut. Optimální doba pro vyhlazování ABS výtisků byla stanovena na 15 minut vyhlazování. U ASA výtisků byl čas potřebný pro vyhlazení kratší, a to 10 minut. Při porovnání ABS a ASA výtisků je znatelný rozdíl v dosažené kvalitě vyhlazení povrchu. Zatímco u ABS výtisků nedošlo ani po dvou hodinách ke kompletnímu vyhlazení povrchu, a ASA výtisků byl povrch zcela vyhlazen již po několika minutách. Z hlediska vyhlazování povrchu je vhodnějším tiskovým materiálem filament ASA. Při měření drsnosti je z obrazové analýzy povrchu patrné, že ABS výtisky ani po dvou hodinách nedosahují tak nízkých hodnot drsnosti, jako je tomu u ASA výtisků.

Vlivem vyhlazování acetonovými parami došlo u výtisků také ke změně hmotnosti. Největší přírůstek hmotnosti byl v obou případech vyšší u výtisků s kvalitou tisku 0,3 mm. K nárůstu hmotnosti u výtisků došlo díky absorpci acetonu do struktury výtisků. Důsledkem vyhlazování parami acetonu byla také změna rozměrů u jednotlivých prvků testovacího obrazce. U ABS výtisků došlo ke smršťování objektů a jejich zkracování, či kompletní deformaci. Naopak u ASA objektů došlo ke snížení výšky, ale zároveň ke zvýšení šířky.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SCULPTEO. The history od 3D printing. In: *sculpteo.com* [online] [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [2] BCN3D. When Was 3D Printing Invented? The History of 3D printing. In: *bcn3d.com* [online]. Gavà,.: BCN3D Technologies, 2020 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [3] LENGUA, C.A.G. (2017). History of Rapid Prototyping: Photosculpture. In: Farooqi, K. (eds). *Rapid Prototyping in Cardiac Disease* [online]. Springer, Cham, 2017 [cit. 2023-05-13] Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4_1)
- [4] PREMO. Využití 3D tisku: Co lze vytisknout na 3D tiskárně. In: *premoc.eu* [online]. Staré město: Premo [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.premocz.eu/vyuziti-3d-tisku>
- [5] TWI GLOBAL. What are the advantages and disadvantages od 3D printing? In: *twi-global.com* [online]. Cambridge: TWI [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- [6] ELBL, Jan, Jan MUSELÍK a Aleš FRANC. Využití 3D tisku při přípravě a výrobě léků. *Chemické listy* [online]. CHLSAC, 2019, roč. 113, č. 5, 301–306 [cit. 2023-05-19]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3355>
- [7] Additive Manufacturing Technologies [fotografie]. In: *hubs.com: Additive Manufacturing Technologies* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/get/am-technologies/>
- [8] KUČERA, Vladimír. *Fotopolymerace* [online]. Brno, 2012 [cit. 2023-05-17]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Mgr. František Kučera, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/11836?show=full>
- [9] 3D PRINTING INDUSTRY. The Free Beginner’s Guide. In: *3Dprintingindustry.com* [online]. 2017 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>

- [10] QUAN, Haoyuan, Ting ZHANG, Hang XU, Shen LUO, Jun NIE, Xiaoqun ZHU. *Photo-curing 3D printing technique and its challenges: The techniques of photo-curing 3D printing*. ScienceDirect [online]. Bioactive Materials, 2020, roč. 5, č.1, 110-115 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>
- [11] Stereolitography [fotografie]. In: *making.unsw.edu.au: 3D Printing with SLA Resin Printers* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-sla-resin-printers/>
- [12] 3D SYSTEMS. Stereolitography. In: *3dsystems.com* [online]. Rock Hill: 3D Systems, 2016 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/stereolithography#whyUseSLA>
- [13] GASMANN Stefan, Sathurja JEGATHEESWARAV, Till SCHLEIFER, Hesam ARBABI a Helmut SCHÜTTE. 3D Printed PCB Microfluidics. *Micromamachines* [online]. MDPI, 2022, roč. 470, č. 13 [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi13030470>
- [14] PRUSA RESEARCH. Typy tiskáren a rozdíl mezi nimi. In: *help.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464)
- [15] WU Chenming, Ran YI, Yong-Jin LIU, Ying HE a Charlie C.L. WANG. Working principle of a conventional DLP 3D printer, in which the platform can only move vertically [fotografie]. Daejeon, 2016. In: *semanticscholar.org: Delta DLP 3D printing with large size* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759338>
- [16] DASSAULT SYSTÈMES. Powder bed fusion – DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM. In: *3ds.com* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>
- [17] Schematic of the selective laser sintering process [fotografie]. In: *formlabs.com: Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [18] DUDA, Thomas, L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology: Direct Metal Laser Sintering – DMLS. *ScienceDirect* [online]. IFAC-PapersOnline, 2016, roč. 49, č. 29, 103–110 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>

- [19] FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE. DMLS. In: fs.cvut.cz [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT v Praze [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologii-3dtisk/dmls-3dtisk/>
- [20] JAŠŮREK, Bohumil. *Pokročilé technologie v polygrafii* [přednáška]. Pardubice: Univerzita Pardubice. Fakulta chemicko-technologická. Katedra polygrafie a fotofyziky, 2023 [cit. 2023-06-27]
- [21] The 3D printing process [fotografie]. In: *additive.blog: HP Multi Jet Fusion* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/hp-multi-jet-fusion/>
- [22] DASSAULT SYSTÈMES. Binder jetting – BJ. In: *3ds.com* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/binder-jetting>
- [23] Binder Jetting – Step by Step [fotografie]. In: *Loughborough University: About Additive Manufacturing* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [24] 3FAKTUR. Colorjet 3D Printing. In: *3faktor.com* [online]. Jena: 3Faktur [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/colorjet-3d-printing-technology-overview/#>
- [25] KOLAMROUDI, M. K., Mohammed ASMAEL, Mustafa ILKAN, Naser KORDANI. Developments on Electron Beam Melting (EBM) of Ti-6Al-4V: A Review. *Trans Indian Inst Met* [online]. 2021, roč. 74, č. 4, 783–790 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9>
- [26] Electron Beam Melting [fotografie]. In: *additive.blog: Laser sintering, melting and others – SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/>
- [27] How does Polyjet technology works [fotografie]. In: *xometry.eu: Polyjet 3D Printing: Technology Overview* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://xometry.eu/en/polyjet-3d-printing-technology-overview/>

- [28] DASSAULT SYSTÈMES. Direct energy deposition – DED, LENS, EBAM. In: *3ds.com* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition>
- [29] GROSS C. Bethany, Jayda L. ERKAL, Sarah Y. LOCKWOOD, Chengpeng CHEN a Dana M. SPENCE. Schematic of an LOM 3D printer [fotografie]. 2014. In: *pubs.acs.org: Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ac403397r>
- [30] DASSAULT SYSTÈMES. Material extrusion – FDM. In: *3ds.com* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion>
- [31] What is FDM printing? [fotografie]. In: *making.unsw.edu.au: 3D Printing with FDM Printers* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-fdm-and-thermoplastics/>
- [32] HUBS. What's the ideal filament for FDM printing? 3D printing materials compared. In: *hubs.com* [online]. Amsterdam: Hubs [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [33] MATERIALPRO3D. Tiskové struny – filamenty. In: *materialpro3d.cz* [online]. Brno [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>
- [34] PANG, Xuan, Xiuli ZHUANG, Zhaohui TANG, Xuesi CHEN. Polylactid acid (PLA): Research, development and industrialization: Introduction. *Biotechnology Journal* [online]. 2010, roč. 5, č. 11, 1125–1136 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/biot.201000135>
- [35] PRUSA RESEARCH. PLA. In: *help.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/pla\\_2062](https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062)
- [36] Conversion of lactic acid to polylactid acid [fotografie]. In: *sciencedirect.com: Renewable Resource and Biodegradable Polymers* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/poly-lactic-acid-polymer>
- [37] INEOS. Acrylonitrile butadiene styrene. In: *indeos.com* [online] [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.ineos.com/industry/products/polymers/abs/>

- [38] Chemical structure of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) [fotografie]. In: *kdfeddersen.com: Amorphous Plastic With Very Good Mechanical Properties* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://kdfeddersen.com/competencies/engineering-plastics/polymers/abs/>
- [39] PRUSA RESEARCH. ABS. In: *help.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/abs\\_2058](https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058)
- [40] PRUSA RESEARCH. ASA. In: *help.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/asa\\_1809](https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809)
- [41] PRUSA RESEARCH. Prusament ASA je tady. Jak a co tisknout s nástupcem ABS? In: *blog.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs\\_30636/](https://blog.prusa3d.com/cs/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs_30636/)
- [42] 3DJAKE. PVA a podpůrný materiál – rozpustný filament pro podpůrné struktury. In: *3djake.cz* [online] [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/filament/pva-a-podpurny-material>
- [43] MATERIALPRO3D. HIPS. In: *materialpro3d.cz* [online]. Brno [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/hips/>
- [44] POLYGENYS, Tasos. The Ultimate Guide to 3D Printing Post-Processing Techniques. In: *wevolver.com* [online]. Amsterdam: Wevolver, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/the-ultimate-guide-to-3d-printing-post-processing-techniques>
- [45] SHARPLAYERS. Jak upravit povrch u výtisků z PLA filamentu. In: *sharplayers.cz* [online]. Praha: Sharplayers, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/a/povrchova-uprava-vytisku>
- [46] Prusa Polymers Team. Tabulka chemické kompatibility plastových materiálů a jejich chemické odolnosti [tabulka]. 2021. In: *prusament.com: Chemická odolnost materiálů pro 3D tisk* [online] [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/chemicka-odolnost-materialu-pro-3d-tisk/>
- [47] HOWARD, William. Acetone: Introduction. *Encyklopedia of Chemical Technology* [online]. Wiley Online Library, 2011, 1–15 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471238961.0103052008152301.a01.pub3>



- [48] KOČÍ, Jakub. Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování. In: *blok.prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani\\_36268/](https://blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani_36268/)
- [49] 3DJAKE. Polymaker Polyspher. In: *3djake.cz* [online] [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/polymaker/polyspher-1>
- [50] HUBS. Post Processing for FDM printed parts. In: *hubs.com* [online]. Amsterdam: Hubs [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#sanding>
- [51] 3DEES. Hybridní výroba odlitků 3D tiskem. In: *3dees.cz* [online]. Praha: 3dees.cz, 2022 [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/blog/hybridni-vyroba-odlitku-pomoci-3d-tisku>
- [52] RMI. GelSight Mobile™ Series 2. In: *rmi.cz* [online]. Lázně Bohdaneč: RMI, s.r.o [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <http://www.rmi.cz/mobilni-3D-mikroskop>
- [53] S3DT SVĚT 3D TISKU. Kaptonová páska 50 × 33 m. In: *eshop.svet-3d-tisku.cz* [online]. Praha: Svět 3D tisku [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz/lepidla-a-folie/kaptonova-paska/>
- [54] UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Obrazová analýza. In: *biologie.upol.cz* [online]. Olomouc: Ústav biologie lékařské fakulty UP [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://biologie.upol.cz/mikroskopie/obrazova%20analyza.htm>
- [55] YUAN Wenzhen, Siyuan DONG a Edward H. ADELSON. GelSight: High-Resolution Robot Tactile Sensors for Estimating Geometry and Force. *Sensors* [online]. MDPI, 2017, roč. 2762, č. 17 [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s17122762>
- [56] RMI. Mobilní 3D mikroskop. In: *rmi.cz* [online]. Lázně Bohdaneč: RMI, s.r.o [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <http://www.rmi.cz/mobilni-3D-mikroskop>
- [57] PROINEX INSTRUMENTS. Měření drsnosti povrchu – Drsnoměry Profiloměry. In: *proinex.cz* [online]. Kunčičky: Proinex Instruments, 2022 [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/a/mereni-drsnosti-povrchu-drsnomery-profilomery>