

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE**



**Vliv nastavení parametrů 3D tiskárny na vlastnosti tištěných objektů**

**Evaluation of properties of printed objects based on 3D printer settings**

**Bakalářská práce**

**Sándor Ádám**

**Praha 2019**

**Vedúci práce: Ing. Petr Veselý**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ádám** Jméno: **Sándor** Osobní číslo: **469846**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv nastavení parametrů 3D tiskárny na vlastnosti tištěných objektů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Evaluation of properties of printed objects based on 3D printer settings**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technologiemi aditivní výroby s hlavním zaměřením na metodu 3D tisku FDM, popište principy a výhody, zhodnoťte využití v elektrotechnickém průmyslu.
2. Seznamte se s používanými materiály v technologii FDM, popište jejich vlastnosti a použití.
3. Navrhněte a proveďte experiment na ověření vlivu nastavení vybraných parametrů 3D tiskárny na vlastnosti finálních výrobků pro soubor vzorků z různých materiálů.
4. Výsledky experimentu vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Redwood Ben, Schoffer Filenom, Garret Brian. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 1st ed. 3D Hubs, Amsterdam 2017. ISBN 978-90-827485-0-5  
[2] CANESSA Enrique, FONDA Carlo, ZENNARO Marco. Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development. 1st ed. ICTP, 2013. ISBN 92-95003-48-9  
[3] Ducháček Vratislav. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Petr Veselý  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24.5.2019

Sándor Ádám

## **Poďakovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce, Ing. Petrovi Veselému za odborné vedenie, ochotu, cenné rady a pripomienky. Ďalej za trpezlivosť a morálnu podporu pri vytvorení praktickej časti tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať svojim rodičom za podporu počas štúdia a pri vytvorení tejto práce.

## **Anotace**

Táto práca sa zaoberá s technológiami aditívnej výroby a jej druhmi. Ďalej výhodami a nevýhodami najviac používaných materiálov v 3D tlači, mechanickými a termomechanickými vlastnosťami materiálov, ktoré sú dôležitými parametrami pri výrobe v oblasti 3D tlače. Druhá časť práce je založená na experimentoch testovaní mechanických a termomechanických vlastností, ktoré sú hodnotené z hľadiska optimálnej nastavenia procesu 3D tlače.

## **Klíčová slova**

technológie aditívnej výroby, 3D tlač, mechanické a termomechanické vlastnosti materiálov, PLA, ASA

## **Annotation**

In the first part this thesis examines additive manufacturing technologies and its different types. Furthermore advantages and disadvantages of the most common used materials for 3D printing, also its mechanical and thermomechanical properties are discussed. These properties are important at differentiating the quality of the end product. The second part of this work is based on experiments of mechanical and thermomechanical properties, which are conducted in order to determine the optimal settings of the 3D printing process.

## **Key words**

additive manufacturing technologies, 3D printing, mechanical and thermomechanical properties of materials, PLA, ASA

# OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Technológie aditívnej výroby.....	9
2.1. Fotopolymerizácia .....	9
2.1.1. Technológia SLA (Stereolithography).....	9
2.1.2. Technológia DLP (Direct Light Processing) .....	11
2.2. Powder Bed Fusion (PBF) .....	11
2.2.1. Technológia SLS (Selective Laser Sintering) .....	11
2.2.2. Technológia SLM (Selective Laser Melting) .....	13
2.3. Fúzne depozičné modelovanie (FDM).....	14
2.3.1. Výhody a nevýhody technológie FDM .....	16
2.3.3. Podporná štruktúra.....	17
2.3.4. Výplň a hrúbka .....	17
2.3.5. Vlastnosti najviac používaných filamentov .....	18
2.4. PLA - kyselina polyléččná .....	18
2.4.1. Fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu PLA.....	19
2.5. ASA - Acrylonitrile styrene acrylate .....	19
2.5.1. Fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu ASA.....	20
2.6. Aditívna výroba v elektrotechnike a elektronike.....	20
2.6.1. Súčasná výroba v elektrotechnike a elektronike.....	20
2.6.2. Odolnosť vytlačených štruktúr voči elektrickému poli .....	22
2.6.3. Využitie vo výkonovej elektrotechnike .....	22
3. Mechanické a termomechanické vlastnosti materiálov .....	23
3.1. Pevnosť v ťahu.....	23
3.2. Ťažnosť .....	23

3.3.	Modul pružnosti v ťahu .....	24
3.4.	Termomechanické vlastnosti materiálov.....	25
3.4.1.	Expanzné merania.....	25
3.4.2.	Teplota skleneného prechodu: .....	26
3.4.3.	Teplota topenia.....	26
3.4.4.	CTE - Koeficient tepelnej rozťažnosti .....	26
4.	Experimentálna časť.....	28
4.1.	Návrh a tlač vzoriek pre mechanické skúšky .....	28
4.1.1.	Rozmery vzoriek pre mechanickú skúšku .....	29
4.2.	Nastavenie trhačky pre mechanickú skúšku.....	30
4.3.	Návrh vzoriek pre termomechanické skúšky.....	31
4.4.	Nastavenie TMA pre termomechanické skúšky.....	32
5.	Namerané hodnoty .....	33
5.1.	Namerané hodnoty mechanických skúšok.....	33
5.1.1.	Prehľadové tabuľky nameraných mechanických vlastností.....	39
5.2.	Vyhodnotenie nameraných hodnôt mechanických skúšok .....	41
5.3.	Namerané hodnoty TMA skúšok.....	42
5.3.1.	Predĺženie v závislosti na teplote .....	42
5.3.2.	CTE.....	46
5.3.3.	Namerané hodnoty teploty skleneného prechodu: .....	47
5.4.	Vyhodnotenie nameraných hodnôt termomechanických skúšok.....	48
6.	Záver .....	50
	Literatúra:.....	51

# 1. Úvod

V 3D tlači existujú rôzne technológie výroby, napriek tomu, že sa jedná o veľmi čerstvú oblasť aditívnej výroby. V prvej časti tejto práci sa budem zaoberať s najviac využívanými technológiami, ktoré sú podstatné aj pre elektrotechnológiu. 3D tlač je veľmi perspektívnou oblasťou nie len v elektrotechnike, ale aj v oblasti medicíny, prototypingu a priemyslu. Nastavenie 3D tlačiarne môže mať obrovský vplyv na vlastnosti vytlačených objektov. Hlavným cieľom tejto práci bude skúmať zmeny týchto vlastností na základe rôznych parametrov nastavenia tlačiarne. Predovšetkým budem skúmať mechanické a termomechanické vlastnosti materiálov, najmä na vytlačených vzorkách z PLA a ASA. Tieto dve materiály sú najbežnejším typom polymérov, ktoré sú určené na tlač s technológiou FDM. Mechanické a termomechanické vlastnosti sú podstatnou časťou pri určení parametrov materiálov pri výrobe a podľa nich je možné určiť aj kvalitu výrobkov. Pre skúmanie týchto vlastností budem používať už známe metódy, ako je skúška ťahom na určenie mechanických parametrov materiálov. Na určenie termomechanických vlastností budem používať sofistikovaný prístroj, ktorá je navrhnutá na TMA (Thermomechanical Analysis) skúšky. Tieto merania a ich výsledky v praxi môžu byť užitočné aj pre optimalizáciu výroby, či pre vývoj nových technológií.



## 2. Technológie aditívnej výroby

Výber najvhodnejšieho procesu aditívnej výroby pre konkrétnu aplikáciu môže byť ťažký. Veľmi rozsiahly sortiment dostupných technológií 3D tlače a materiálov často znamená, že niektoré z nich môžu byť životaschopné, ale každý z nich ponúka rozdiely v rozmerovej presnosti, povrchovej úprave a v post-processing požiadavkách. Najviac známymi technológiami sú [1]:

- Fotopolymerizácia (SLA, DLP)
- Powder Bed Fusion SLS, SLM
- FDM – Fúzne Depozičné Modelovanie

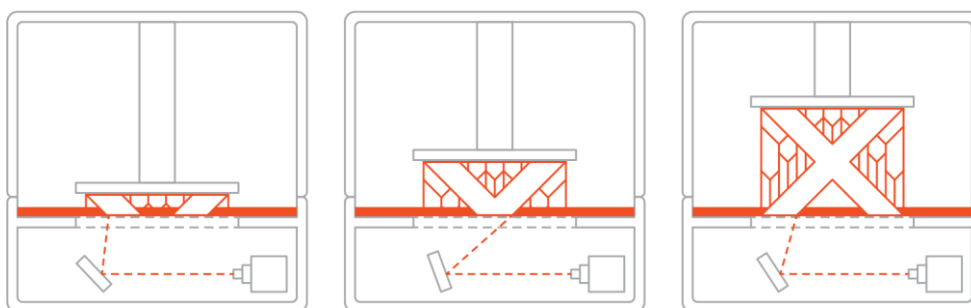
### 2.1. Fotopolymerizácia

Tento spôsob výroby funguje na princípe stvrdzovaní svetelne citlivých polymérov. Svetlo s danou vlnovou šírkou spôsobuje chemickú reakciu v materiálu a tak dôjde k premene z kvapalného do tvrdého stavu skupenstva [1].

#### 2.1.1. Technológia SLA (Stereolithography)

Technológia SLA používa platformu, ktorá sa pohybuje vo vertikálnej ose. Laserové svetlo zospodu postupne stvrdzuje materiál. Po premene materiálu z tekutého stavu do tvrdého sa platforma posune hore, a tým umožní vytvoriť ďalšiu vrstvu materiálu (2.1. Obrázok).

SLA je známa tým, že je prvou technológiou 3D tlače: vynálezca patentoval technológiu už v roku 1986. Ak sú potrebné časti s veľmi vysokou presnosťou, alebo povrchovou hladkosťou, SLA je najlacnejšia dostupná technológia 3D tlače [1].



2.1. Obrázok: Technológia SLA - na obrázkoch vidíme jednotlivé kroky výroby [1]

### **Ako funguje technológia SLA:**

- Výstavba platformy je najskôr umiestnená v nádrži kvapalného fotopolyméru vo vzdialenosti jednej vrstvy pre povrch kvapaliny.
- Potom UV laser vytvorí ďalšiu vrstvu selektívnym stvrdzovaním a stuhnutím fotopolymérovej živice. Laserový lúč je zaostrý na vopred určenú dráhu pomocou sady zrkadiel nazývaných galvos. Celá prierezová plocha modelu sa naskenuje, takže vyrobená časť je plne pevná.
- Po ukončení vrstvy sa plošina pohybuje v bezpečnej vzdialenosti a stierač povrch opracováva. Proces sa potom zopakuje, kým sa daná časť nedokončí.
- Po vytlačení sa materiál nachádza v nedokončenom stave, čo znamená, že nie je úplne vytvrdený a vyžaduje ďalšie spracovanie pod UV svetlom, a to najmä v prípade pokiaľ sa vyžadujú veľmi vysoké mechanické a tepelné vlastnosti.

### **Požiadavky na tlač u SLA:**

V systémoch SLA je väčšina parametrov tlače pevne stanovená výrobcom a nedá sa zmeniť. Jedinými vstupmi sú výška a orientácia časti vrstvy (druhú určuje miesto podpory). Typická výška vrstvy v SLA sa pohybuje medzi 25 a 100 mikrónmi. Nižšie výšky vrstiev presnejšie zachytia zakrivené geometrie, ale zvyšujú čas a pravdepodobnosť neúspešnej tlače. Pre najbežnejšie aplikácie je vhodná výška vrstvy 100 mikrónov. Veľkosť zostavy je ďalším parametrom, ktorý je pre výrobu dôležitý. Veľkosť zostavy závisí od typu zariadenia. Existujú dve hlavné nastavenia stroja SLA: orientácia zhora-nadol a orientácia zdola-nahor. U tlačiarní SLA zhora-nadol umiestňujú laserový zdroj nad nádrž a časť je postavená smerom nahor. Štruktúra platformy začína na samom vrchole nádrže živice a pohybuje sa nadol po každej vrstve [1].



2.2. Obrázok: 3D Tlačiareň Prusa SL1[2]

### 2.1.2. Technológia DLP (Direct Light Processing)

Princíp je podobný, ako u SLA, jediný rozdiel je v tom, že miesto výkonného laseru táto technológia používa svetelnú obrazovku, ako zdroj svetla, ktorý projektuje daný tvar na platformu. Pretože projektor je digitálna obrazovka, obraz každej vrstvy sa skladá zo štvorcových pixelov, výsledkom čoho je vrstva vytvorená z malých obdĺžnikových tehál, nazývaných voxely. Systém DLP dokáže dosiahnuť rýchlejšie časy tlače v porovnaní so SLA pre niektoré časti, pretože každá celá vrstva je naraz vystavená, namiesto použitia lasera [1].

## 2.2. Powder Bed Fusion (PBF)

Technológie PBF vytvárajú postupne vrstvy, podobne ako u ostatných technológiách. Funguje na princípe stvrdzovaní práškoveho materiálu pomocou tepelného zdroja. Väčšina technológií PBF využíva mechanizmy na rozširovanie a vyhladzovanie tenkých vrstiev prášku ako súčasť konštrukcie, výsledkom čoho je finálna zložka zapuzdrená v prášku po dokončení procesu. Hlavné rozdiely v technológiách PBF pochádzajú z rôznych energetických zdrojov (napríklad z laserov alebo elektrónových lúčov) a práškov používaných v procese (plasty alebo kovy) [1].



2.3. Obrázok: 3D tlačiareň PROMAKER P1000 SLS® 3D [3]

### 2.2.1. Technológia SLS (Selective Laser Sintering)

K stvrdzovaní materiálov sa používa výkonný laser, a tak vytvára tenké vrstvy materiálu osobitne. Na začiatku procesu je práškový materiál vynesý na platformu. Platforma sa

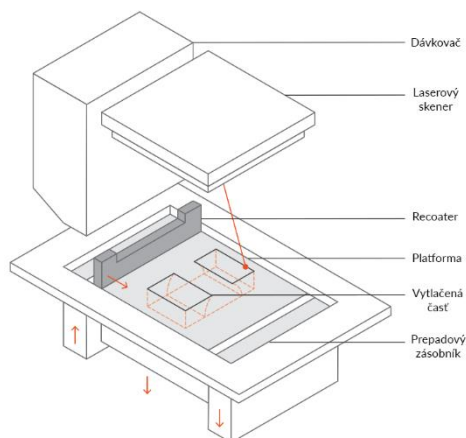
pohybuje po každej jednej vytvorenej vrstve laserom. Aby systém mohol vytvoriť novú vrstvu, musí naniest' na materiál novú práškovú vrstvu. Toto zabezpečuje tzv. recoater [1].

#### Ako funguje technológia SLS:

- Nádoba na prášok a oblasť výstavby sa najskôr zahrejú tesne pod teplotou topenia polyméru a prevrstvovacia lopatka rozdeľuje tenkú vrstvu prášku na plošinu.
- CO2 laser potom prekontroluje obrys ďalšej vrstvy a selektívne spojí častice práškového polyméru. Celý prierez komponentu je naskenovaný, takže vyrobená časť je úplne pevná
- Keď je vrstva dokončená, plošina sa posunie smerom nadol a recoater opätovne pokryje povrch. Proces sa potom zopakuje, kým celá časť nie je dokončená [1].

#### Požiadavky na tlač u SLS:

U SLS takmer všetky výrobné parametre nastavuje výrobca stroja. Predvolená výška vrstvy je 100-120 mikrónov. Kľúčovou výhodou SLS je, že nepotrebuje žiadne podporné štruktúry. Nezasadený prášok poskytuje všetku potrebnú podporu. Z tohto dôvodu sa SLS môže použiť na vytvorenie geometrií volnej formy, ktoré nie je možné vyrobiť inou metódou. Využitie celého objemu zostavovania je veľmi dôležité pri tlači pomocou technológie SLS, a to najmä pri malých dávkových produkciách. Krabica danej výšky bude trvať približne rovnaký čas na tlač, nezávisle od počtu častí, ktoré obsahuje. Je to preto, že krok opätovného povlaku určuje celkový čas spracovania (laserové skenovanie sa vyskytuje veľmi rýchlo) a stroj bude musieť prejsť rovnakým počtom vrstiev. Obaly na zásobníky môžu ovplyvniť dodacie lehoty malých objednávok, pretože operátori zvyčajne čakajú, kým sa zásobník naplní pred spustením tlače.



2.4. Obrázok: Technológia Selective Laser Sintering [1]

### **Odstránenie prášok:**

Pretože SLS nevyžaduje žiaden podkladový materiál, môžu byť diely s dutými profilmi tlačené ľahko a presne. Duté časti znižujú hmotnosť a náklady na časť, pretože sa používa menej materiálu. Únikové otvory sú potrebné na odstránenie nezasadeného prášku z vnútorných častí komponentu. Odporúča sa pridať do dizajnu najmenej 2 únikové otvory s priemerom minimálne 5 mm [1].

Ak sa vyžaduje vysoká tuhosť, musia byť časti vytlačené úplne pevne. Alternatívou je vytvorenie dutého dizajnu, ktorý vynechá únikové otvory. Týmto spôsobom pevne zabalený prášok bude zachytený v časti, čím sa zvýši jej hmotnosť a poskytne sa určitá dodatočná podpora proti mechanickému zaťaženiu bez účinku na čas stavania. Vnútorňa štruktúra mriežky môže byť pridaná do dutého interiéru (podobne ako výplňové vzory použité v FDM), čím sa ďalej zvyšuje tuhosť komponentu. Dierovanie časti týmto spôsobom môže tiež znížiť deformáciu.

### **2.2.2. Technológia SLM (Selective Laser Melting)**

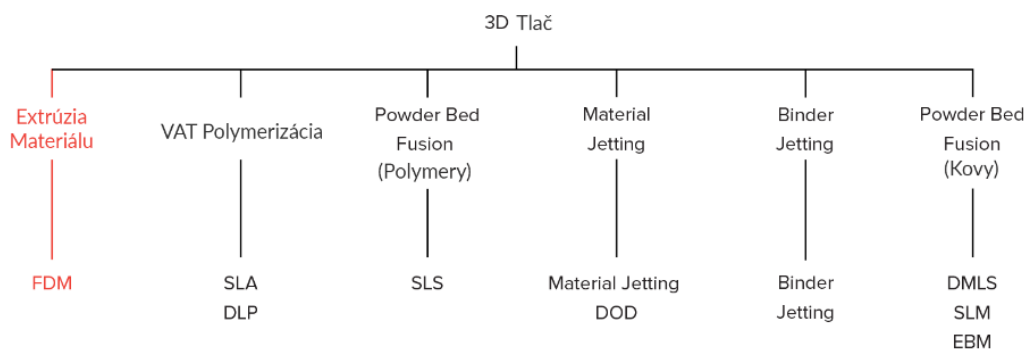
Podobne ako aj u SLS technológii, vytváranie jednotlivých vrstiev prebieha pomocou lasera. Rozdiel tejto metódy je v tom, že SLM úplne roztopí daný prášok. Táto technológia je hlavne požívaná pri výrobe kovových materiálov. Technológia SLM je patentovaná a chránená technológia. Kvôli tomu v SLM prístrojoch môžeme použiť len jeden typ materiálu, tzn. že kompozity sú nekompatibilné pre tento typ výroby v prístrojoch SLM [1].

### **Princíp fungovania:**

Laserový lúč skenuje cez vrchné práškové lôžko a vystavuje plochy zodpovedajúce prierezu časti v určitej výške. Stavba platformy sa zníži po tom, čo bola aktuálna vrstva vystavená laseru. Dávkovacia plošina stúpa, čo umožní, aby sa zostava nožového pláštá pretiahla z pravej strany doľava a rozložila vrstvu kovového prášku cez práškové lôžko. Zberná plošina sa znižuje tak, aby vyhovovala preplnenému prášku, keď sa recoater zametá cez vrch. Tento proces sa opakuje až do úplnej konštrukcie, čo môže vyplývať z vystavenia tisícov vrstiev s hrúbkou mikrónov. Táto výhoda je značným rozdielom od technológie SLS, kde tlač nie je až taká jemná a presná, čo môže spôsobiť vo výrobe chyby [1].

## 2.3. Fúzne depozičné modelovanie (FDM)

Technológia FDM je v súčasnosti najviac používaná technológia. Väčšina 3D tlačiarň funguje na tejto princípe vytváraní materiálov. Je to aditívna metóda, čo znamená že jednotlivé vrstvy vytvára z materiálu, ktorá bola roztopená pomocou vyhrievacej časti tlačiarne. Používané materiály sú polyméry a ich kompozity.



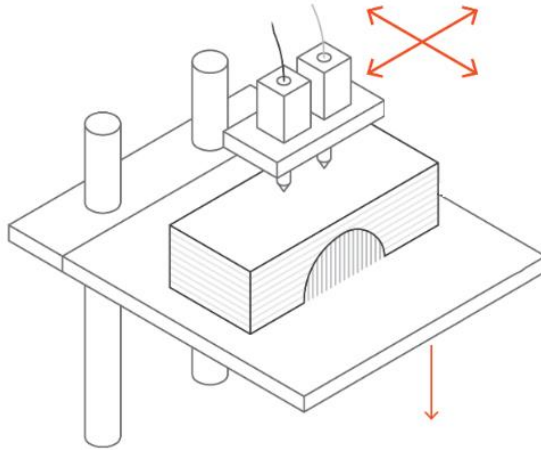
2.5. Obrázok: Rôzne technológie 3D tlače [1]

Keď tryska vytlačí obvod otvoru zvislej osi, môže komprimovať novo vytlačenú vrstvu nadol na existujúce vrstvy vytvárania, čím pomôže zlepšiť priľnavosť. Stláčacia sila z trysky deformuje vytlačený tvar guľatej vrstvy z kruhu do širšieho a plochšieho tvaru. To zvyšuje oblasť dotyku s predtým potlačenou vrstvou (zlepšenie adhézie), ale tiež zvyšuje šírku extrudovaného segmentu. Výsledkom je zníženie priemeru otvoru, ktorý sa vytlačí. To môže byť zvlášť dôležité pri tlači dier s malým priemerom, kde je efekt väčší, vďaka pomeru priemeru otvoru k priemeru trysky [1].

### Princíp fungovania FDM:

- Filament je vložený do dávkovača a do vyhrievacej časti tlačiarne, kde filament je roztopený na požadovanú teplotu. Dávkovač postupne sťahuje materiál smerom k tryske, kde takto roztopený materiál postupne vytvára vrstvu na platforme.
- Platforma a aj samotná vyhrievacia časť a tryska sa pohybuje v požadovanej ose. Jednotlivé vrstvy sú vytvorené po jednom a vždy podľa predefinovanej polohy programu. Tlačiareň môžeme naprogramovať podľa požiadavku výroby.
- Aby materiál bol aj mechanicky odolný používa sa aj vyplnenie dier a upevnenie pomocou rôznych tvarov vrstiev.

Väčšina FDM systémov umožňuje zmeniť viacero parametrov pri tlači, napr.: teplotu trysky, teplotu platformy, rýchlosť a rozlíšenie tlače (výška jednej vrstvy). Najviac používané rozlíšenie sú medzi 50 až 400 mikrometrov. Menšie rozlíšenie spôsobuje hladší povrch materiálu, naopak väčšie rozlíšenie má výhodu v rýchlosti tlače a v cene [1].



2.6. Obrázok: Technológia FDM v praxi [1]



2.7. Obrázok: 3D tlačiareň ORIGINAL PRUSA I3 MK3S [2]

### 2.3.1. Výhody a nevýhody technológie FDM

#### Výhody:

- FDM je nákladovo najefektívnejší spôsob výroby vlastných termoplastických častí a prototypov.
- Doby dodania FDM sú krátke kvôli vysokej dostupnosti technológie.
- K dispozícii je široký sortiment termoplastických materiálov vhodných pre prototypovanie, aj pre niektoré nekomerčné funkčné aplikácie.

#### Nevýhody:

- FDM má najnižšiu rozmerovú presnosť a rozlíšenie v porovnaní s inými technológiami 3D tlače, takže nie je vhodná pre časti so zložitými detailmi.
- Súčasti FDM majú často viditeľné vrstvomé čiary, takže je potrebné ich dodatočne spracovanie na hladké dokončenie.
- Mechanizmus prílnavosti vrstvy spôsobuje, že časti FDM sú vo svojej podstate anizotropné.

### 2.3.2. Adhézia vrstiev

Adhézia vrstiev je veľmi dôležitou vlastnosťou výroby. Počas procesu výroby tryska roztopí už aj existujúcu vrstvu a tak umožňuje aby novo vytvorená vrstva sa prilepila a vytvorila adhézny spoj. Väzba medzi jednotlivými vrstvami je vždy menšia ako samotná pevnosť materiálu. To znamená, že FDM objekty sú anizotropické [4], ich pevnosť v Z-ovej ose je vždy menšia ako v X-Y-ovej rovine [1].



2.8. Obrázok: Vrstvy vytlačeného objektu [1]



### 2.3.3. Podporná štruktúra

Podporná štruktúra je základom pre vytváranie geometrií s prevismi v FDM. Roztavený termoplast sa nemôže nanášať na tenkom vzduchu. Z tohto dôvodu niektoré geometrie vyžadujú podpornú štruktúru [1].

Povrchy vytlačené na podpore majú všeobecne nižšiu povrchovú kvalitu ako zvyšok časti. Z tohto dôvodu sa odporúča, aby bola časť navrhnutá takým spôsobom, aby sa minimalizovala potreba podpory [1].

Podpora sa zvyčajne vytlačí z rovnakej materiáli ako hlavná časť. Podporné materiály, ktoré sa rozpúšťajú v kvapaline, existujú, ale používajú sa predovšetkým v high-end desktopových alebo priemyselných 3D FDM tlačiarňach. Tlač na rozpustné podklady výrazne zlepšuje povrchovú kvalitu výrobku, ale zvyšuje celkové náklady na tlač, ako napr. špeciálny stroj (s dvojitém vytláčaním), kde náklady na rozpustný materiál sú pomerne vysoké [1].

### 2.3.4. Výplň a hrúbka

Výrobky z technológie FDM zvyčajne nie sú vytlačené s úplnou výplňou, aby sa skrátil čas tlače a ušetril materiál. Namiesto toho je vonkajší obvod sledovaný pomocou niekoľkých priechodov, nazývaných škrupiny, a interiér je naplnený vnútornou štruktúrou s nízkou hustotou nazývanou výplň.

Výplň a hrúbka škrupiny výrazne ovplyvňujú pevnosť materiálu. Pre FDM je predvolené nastavenie nasledovné: 25% hustota výplne, čo je dobrý kompromis medzi pevnosťou a rýchlosťou pre rýchle výtlačky. V našom experimente sme používali 100 % hustotu výplne.



2.9. Obrázok: Rôzne výplne vytlačeného objektu [1]

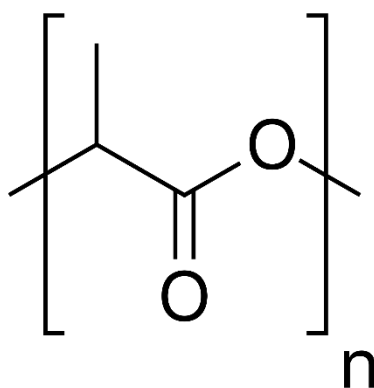
### 2.3.5. Vlastnosti najviac používaných filamentov

- **ABS:**
  - silná väzba materiálu
  - dobrá tepelná rezistivita
  - viac sa odlepuje, ako ostatné materiály
- **PLA:**
  - dobrý vizuálny vzhľad
  - tlačenie je jednoduché
  - slabá väzba materiálu
- **Nylon:**
  - veľmi vysoká pevnosť
  - veľmi dobrá chemická odolnosť
  - vlhkosti nie je veľmi odolná
- **ASA:**
  - vykazuje nízke zmrštenie
  - má vyššiu odolnosť voči praskaniu v prostredí
  - môže byť navarená na seba alebo na iné plasty
- **PET:**
  - bezpečné pre potraviny
  - vysoká mechanická pevnosť, tuhosť, tvrdosť
  - Má výbornú rozmerovú stálosť

[1], [5]

## 2.4. PLA - kyselina polyléčná

Najbežnejšou cestou k PLA je polymerizácia laktidu s rôznymi kovovými katalyzátormi (typicky cínoktoátom cínu) v roztoku, v tavenine alebo, ako suspenzia. Kovovo katalyzovaná reakcia má tendenciu spôsobovať racemizáciu PLA, čím sa znižuje jej stereoregularita v porovnaní s východiskovým materiálom [6]. Na 6. obrázku vidíme schému materiálu PLA.



2.10. Obrázok: Chemická schéma PLA [4]

Ďalšou cestou k PLA je priama kondenzácia monomérov kyseliny mliečnej. Tento proces sa musí vykonávať pri teplote nižšej ako 200 °C. Nad touto teplotou sa vytvára entropicky zvýhodnený laktidový monomér. Reakcia generuje jeden ekvivalent vody pre každý krok kondenzácie (esterifikácie). Kondenzačná reakcia je reverzibilná a podlieha rovnováhe, takže na vytvorenie vysokomolekulárnych druhov je potrebné odstránenie vody. Odstránenie vody aplikáciou vákua alebo azeotropickou destiláciou je potrebné na riadenie reakcie smerom k polykondenzácii [6].

#### **2.4.1. Fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu PLA**

PLA polyméry sa pohybujú od amorfného sklovitého polyméru až po polokryštalický a vysoko kryštalický polymér [5]. PLA má teplotu skleneného prechodu 60 - 65 °C, teplotu topenia 173 - 178 °C a modul pružnosti v ťahu 2,7 - 3,5 GPa [7] [8]. Tepelne odolná PLA odolá teplotám 110 °C. Základné mechanické vlastnosti PLA sa pohybujú medzi polystyrénom a PET [5].

### **2.5. ASA - Acrylonitrile styrene acrylate**

Akrylonitril-styrén-akrylát (ASA), tiež nazývaný akrylo-styrén-akrylonitril, je termoplast vyvinutý ako alternatíva akrylonitril-butadién-styrénu (ABS), ale so zlepšenou odolnosťou voči poveternostným vplyvom a je široko používaný v automobilovom priemysle. Používa sa na všeobecné prototypovanie v 3D tlači, kde jeho odolnosť voči UV žiareniu a mechanické vlastnosti z neho robia vynikajúci materiál na použitie v modelovacích tlačiarňach s taveným a nanášaním [9].

ASA je štrukturálne veľmi podobná k ABS. Sférické častice mierne zosieťovaného akrylátového kaučuku, ktoré fungujú ako modifikátor nárazu, sú chemicky dotované kopolymérmi styrén-akrylonitrilového kopolyméru a vložené do matice styrén-akrylonitrilu. Akrylátový kaučuk sa líši od kaučuku na báze butadiénu neprítomnosťou dvojitych väzieb, čo dáva materiálu približne desaťnásobnú odolnosť voči poveternostným vplyvom a odolnosť voči ultrafialovému žiareniu. ASA má vyššiu dlhodobú tepelnú odolnosť a lepšiu chemickú odolnosť, než ABS. ASA je výrazne odolnejšia voči environmentálnemu stresu ako ABS, najmä voči alkoholom a mnohým čistiacim prostriedkom. Vo výrobe sa používa n-butylakrylátový kaučuk, ale môžu sa vyskytnúť aj iné estery, napr. etylhexylakrylát [10].

### **2.5.1. Fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálu ASA**

V porovnaní s PLA má ASA vyššiu odolnosť voči praskaniu v prostredí a vykazuje vyššie žltnutie vo vonkajších aplikáciách. V porovnaní s polypropylénom má ASA nižšie zmrštenie, vyššiu tuhosť, odolnosť voči nárazom, teplotu tepelného skreslenia a odolnosť voči poveternostným vplyvom. ASA má teplotu skleneného prechodu 100 - 110 ° C, teplotu topenia 210 - 240 ° C a modul pružnosti v ťahu 1785 – 2480 MPa [10], [9].

## **2.6. Aditívna výroba v elektrotechnike a elektronike**

Niektoré výhody sa môžu vzťahovať na elektroniku viac ako na iné oblasti, a to z dôvodu relatívnej jednoduchosti tlače elektronických súčiastok. Pretože elektronické súčiastky môžu byť konštruované s použitím radu špecializovaných atramentov, a nie priemyselných materiálov, ako sú kovové prášky a spojivá, je oveľa jednoduchšie mať tlačiareň na účely 3D tlače.

To znamená, že je oveľa menej potrebné kupovať a skladovať diely vopred v očakávaní niektorých možných budúcich potrieb. Schopnosť vytlačiť 3D elektronické súčiastky podľa potreby znamená, že zdroje môžu byť oveľa flexibilnejšie využívané.

Schopnosť reagovať na dopyt skôr než na zložky zásob je oveľa ekonomickejší spôsob práce. V porovnaní s bežnými technickými technikami je oveľa menej plytvania, pretože akékoľvek materiály v tlačiarni, ktoré zostali nevyužitú, sa dajú jednoducho využiť pri ďalšom projekte.

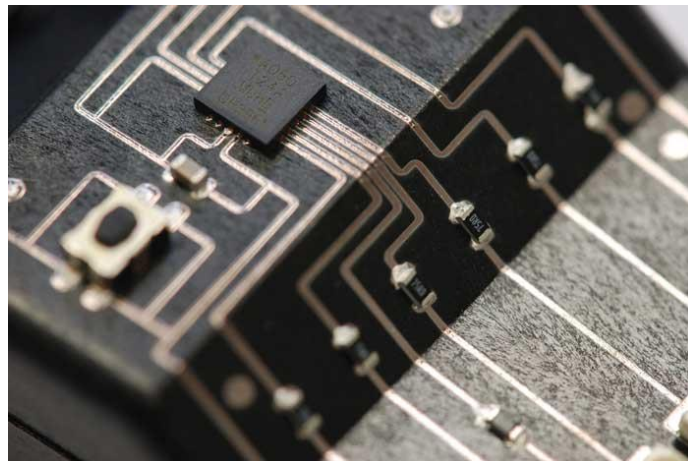
Tento proces tiež vyžaduje menej ľudského vstupu, čo aj šetrí peniaze, pretože sa vyžaduje len rýchla pravidelná kontrola, aby sa zabezpečilo, že všetko je na správnej ceste. Takto sme schopní vytvoriť skutočne inovatívny produkt a rýchlo ho uviesť na trh, čo prináša svoje vlastné výhody. Tento proces je rýchly a umožňuje rýchly obrat nového konceptu, čím sa obchádza zdĺhavý proces, než by sa konvenčnejší dizajn vyvíjal [11].

### **2.6.1. Súčasná výroba v elektrotechnike a elektronike**

V súčasnosti súťažia mnohé rôzne tlačové techniky, aby sa stali životaschopnými pre aditívnu výrobu elektroniky. Organické tenkovrstvové tranzistory získali pozornosť o ich potenciáli znížiť náklady na výrobu veľkoplošnej elektroniky v aplikáciách, ako sú ploché panelové displeje, obrazové snímače, rádiový frekvenčné identifikačné štítky a čipové karty. Jet tlač je atraktívny proces pre elektrotechniku, pretože má nízku cenu, je aplikovateľná na spracovanie

veľkých kusov, kompatibilná s flexibilnými substrátmi a môže byť prispôbená vysoko výkonným výrobným procesom, ako sú metódy roll-to-roll. Táto technika poskytuje digitálny litografický proces bez potreby fyzických masiek a materiál sa používa len tam, kde je to potrebné, čo znižuje náklady na materiál a vplyv na životné prostredie [11].

Atramentová tlač umožnila tenkovrstvové tranzistorové (TFT) obvody, väčšinou na rovinných podkladoch [11]. Aerosolový prúd umožňuje komfortnú tlač na zložitých plochách vďaka dlhšej pracovnej vzdialenosti [12]. Tieto techniky sú ideálne na vytvorenie jemných funkcií potrebných pre elektroniku. Inkjet sa tiež používa v 3D tlači plastových častí, avšak vrstva po vrstve vedie k hromadeniu rôznych chybových faktorov a anizotropii v celej konštrukcii [13]. Vytváranie elektroniky s vysokým rozlíšením v rámci týchto vrstevných štruktúr je preto náročné. Napriek tomu pokračujú pokroky v zlepšovaní riešenia po spracovaní alebo nepretržitou spätnou väzbou počas celého procesu budovania [14]. Fúzne depozičné modelovanie (FDM) alebo extrúzne procesy môžu byť efektívne na tlač rôznych materiálových systémov za sebou, pretože pracujú s materiálmi s vysokou viskozitou. Tieto techniky sú však vo svojej podstate obmedzené v rozlíšení, a preto môžu riešiť iba obmedzený počet typov zariadení, ako sú prepojovacie vedenia alebo základné snímače.



2.11. Obrázok: Obvod vytlačení technológiou aditívnej výroby [15]

### **2.6.2. Odolnosť vytlačených štruktúr voči elektrickému poli**

V oblasti elektrotechnológie sú dielektrické vlastnosti materiálov veľmi dôležitým parametrom. Experimenty ukazujú, že u materiáloch PLA permitivita mierne klesá s vyššou hodnotou šírky jednej vrstvy. Hodnoty permitivity u rozlíšeníach 50 až 200 mikrometrov sa pohybujú medzi 2,36 až 1,92, pri meraní frekvenciu 100 Hz. Dielektrická pevnosť týchto materiálov u rozlíšeníach 50 až 200 mikrometrov sa pohybuje medzi 34,1 až 25,8 kV/mm. Z týchto hodnôt vidíme, že PLA je vhodný ako izolant pre nízko napäťové prístroje. Vyššie hodnoty rozlíšení jednotlivých vrstiev sa prejavuje aj v lepších vlastnostiach dielektrickej pevnosti [15].

### **2.6.3. Využitie vo výkonovej elektrotechnike**

Výroba izolantov technológiou FDM prináša veľa výhod. Návrh, vývoj a optimalizácia izolačného systému môže byť oveľa rýchlejší, ako pri bežných technológiách. FDM môže byť výhodná napríklad keď chceme kombinovať niekoľko rôznych materiálov naraz a vrstviť ich, čo inými technológiami ide len veľmi obťažne. Z ekonomického a environmentálneho hľadiska tlač takýchto materiálov má nižšiu výrobnú cenu.

U SLM technológie, s ktorým je možné tlačiť aj kovové objekty sú možnosti širšie z hľadiska využitia, ale v súčasnosti tento spôsob výroby je ešte v štádiu vývoja.

### 3. Mechanické a termomechanické vlastnosti materiálov

Pri mechanických skúškach budeme sledovať 2 základné veličiny, a to silu, ktorá bola aplikovaná na danú vzorku a relatívne predĺženie vzorky voči pôvodnej dĺžky. Relatívne predĺženie (elongácia) alebo pomerné predĺženie je bezrozmerná fyzikálna veličina. Je to pomer medzi pôvodnou dĺžkou a novou dĺžkou. Predĺženie môže byť spôsobené pôsobiacou silou alebo zmenou teploty. Môžeme ho vypočítať nasledovne [16],

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

kde  $l_0$  je vychádzajúca dĺžka materiálu.

Ďalšou dôležitou veličinou je aplikovaná sila na vzorku. Túto veličinu potrebujeme, aby sme mohli určiť napätie v ťahu  $\sigma$ . Napätie v ťahu je premenná veličina a udáva pomer sily k prierezu vzorky. Môžeme určiť nasledovne:

$$\sigma = \frac{F_x}{S_0}$$

kde  $F_x$  je aplikovaná sila v danom okamžiku, a  $S_0$  je prierez materiálu [16].

#### 3.1. Pevnosť v ťahu

Pevnosť v ťahu alebo konečná pevnosť je za daných podmienok najväčšie možné napätie v materiáli pri ťažení, ktorému materiál ako celok odoláva bez toho aby sa porušil.

Udáva maximálnu silu, ktorá bola dosiahnutá na vzorke pri danom priereze.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

kde  $F_{max}$  je maximálna sila, ktorá bola aplikovaná a  $S_0$  je prierez materiálu [16].

#### 3.2. Ťažnosť

Ťažnosť alebo duktilita je schopnosť materiálu byť plasticky natiahnutý. Plasticky znamená, že nevznikajú trhliny a materiál ostane rozťahnutý. V momente pretrhania je relatívne predĺženie materiálu maximálna. Väčšinou sa udáva v %.

Môžeme určiť nasledovne:

$$A = \varepsilon_{max} = \frac{\Delta l_{max}}{l_0} [-]$$

$$A = \frac{\Delta l_{max}}{l_0} * 100 [\%]$$

kde  $\Delta l_{max}$  je maximálne predĺženie materiálu a  $l_0$  je vychádzajúca dĺžka materiálu [16].

### 3.3. Modul pružnosti v ťahu

Youngov modul alebo aj modul pružnosti v ťahu je číslo, ktoré charakterizuje správanie materiálu zataženého ťahovým napätím. Čím je Youngov modul vyšší tým treba väčšie napätie (pri rovnakom priereze väčšiu silu) na dosiahnutie rovnakej deformácie (predĺženia).

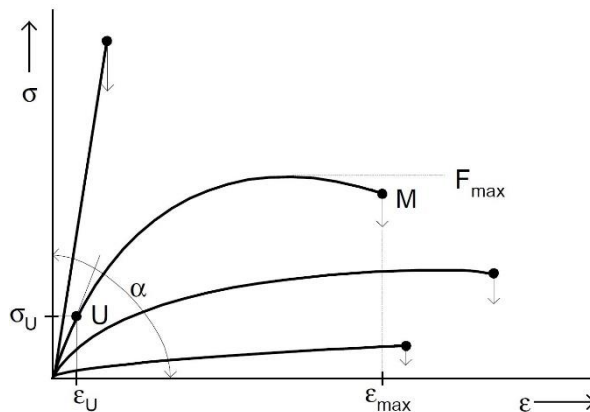
Youngov modul vystupuje ako konštanta v Hookovom zákone. Označuje sa písmenom E a udáva sa v jednotkách napätia – v pascaloch [Pa]. Pre jeho vysoké hodnoty je praktickejšie používať násobnú jednotku gigapascal [GPa]. Modul je pre daný materiál závislý od teploty, s narastajúcou teplotou môže klesať [16].

Modul je definovaný priamo z Hookovho zákona ako pomer napätia v ťahu a pomernej deformácie v oblasti malých napätí.

Experimentálne sa dá zmerať z ťahového diagramu – závislosti napätia od predĺženia. Je úmerný smernici (tg uhla sklonu) lineárnej časti krivky od nulového napätia po medzu proporcionality.

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} [\text{N/m}^2]$$

kde  $\sigma_x$  je napätie v ťahu a  $\varepsilon_x$  je relatívne predĺženie [16], [17].



3.1. Obrázok: Závislosť  $\sigma = f(\varepsilon)$  pre rôzne materiály [17]



### 3.4. Termomechanické vlastnosti materiálov

Experimenty v oblasti termomechaniky sa hlavne zaoberajú s tým, ako sa dané materiály chovajú v rôznych teplotných prostrediach. Jedna najviac známa metóda je tzv. termomechanická analýza (thermomechanical analysis), alebo TMA. V tejto práci sa budem zaoberať hlavne s touto metódou, ktorá má veľmi široké využitie v praxi. Materiály budeme postupne ohrievať a pritom budeme sledovať ich predĺženie v Z-ovej ose. Táto časť merania udáva ohrevnú vetvu nášho experimentu. Ďalej budem pozorovať aj to, ako sa zmení predĺženie materiálu pri ochladzovaní.

Naše TMA je typu TMA Q400 od TA Instruments (3.1. Obrázok) [4].



3.2. Obrázok: TMA Q400 od TA Instruments [18]

#### 3.4.1. Expanzné merania

Expanzné merania určujú koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu (CTE), teplotu skleného prechodu a modul kompresie. Na vzorku sa umiestni štandardná expanzná sonda s plochým hrotom (môže sa použiť malá statická sila) a vzorka sa podrobí teplotnému programu. Pohyb sondy zaznamenáva rozšírenie alebo kontrakciu vzorky. Tento režim sa používa u väčšine pevných vzoriek. Ak je materiál heterogénny alebo anizotropný, bude mať rôzne tepelné rozšírenia v závislosti od smeru, v ktorom bol meraný. Zmes kvapalných kryštálov a polyesterov vykazuje značný rozdiel medzi smermi. Táto orientácia kryštálov môže byť určená práve pomocou TMA. Podobne orientované vlákna a filmy majú inú tepelnú rozťažnosť v smere orientácie než v kolmom smere. To sa zvyčajne rieši zaznamenávaním CTE v smeroch x, y a z [18].

### 3.4.2. Teplota skleného prechodu:

Teplota skleného prechodu  $T_g$  materiálu charakterizuje rozsah teplôt, počas ktorých nastane sklenený prechod. Táto teplota je stále nižšia, ako teplota topenia  $T_m$  kryštalického stavu materiálu.

Tvrde plasty, ako je polystyrén a polymetylmakrylát, sa používajú tesne pod ich teplotami skleného prechodu. Ich hodnoty  $T_g$  sú výrazne vyššie ako teplota miestnosti, obidva pri teplote okolo 100 ° C. Kaučukové elastoméry ako polyizoprén a polyizobutylén sa používajú nad ich  $T_g$ , to znamená v gumovom stave, kde sú mäkké a pružné [19].

### 3.4.3. Teplota topenia

Teplota topenia  $T_m$  (alebo len zriedkavo, bod skvapaľovania) látky je teplota, pri ktorej sa mení stav z tuhej na kvapalnú. V bode topenia existuje tuhá a kvapalná fáza v rovnováhe.

Ak sa berie do úvahy teplota spätnej zmeny z kvapaliny na tuhú, označuje sa ako bod tuhnutia alebo bod kryštalizácie. Z dôvodu schopnosti niektorých látok superochladzovať sa bod tuhnutia nepovažuje za charakteristickú vlastnosť látky.

Z hľadiska termodynamiky je v bode tavenia zmena Gibbsovej voľnej energie ( $\Delta G$ ) materiálu nula, ale entalpia ( $H$ ) a entropia ( $S$ ) materiálu sa zvyšujú ( $\Delta H, \Delta S > 0$ ). Fenomén topenia nastáva, keď sa Gibbsova voľná energia kvapaliny stane menšou, ako voľná energia danej látky v tuhom stave. Pri rôznych tlakoch sa to deje pri určitej teplote. Platí nasledovné:

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T}$$

kde  $T$ ,  $\Delta S$  a  $\Delta H$  sú teplota v bode topenia, zmena entropie tavenia a zmena entalpie tavenia [20].

### 3.4.4. CTE - Koeficient tepelnej rozťažnosti

Koeficient tepelnej rozťažnosti opisuje, ako sa mení veľkosť objektu so zmenou teploty. Konkrétne meria zlomkovú zmenu zmeny teploty na jeden stupeň pri konštantnom tlaku. Bolo vyvinutých niekoľko typov koeficientov: objemové, plošné a lineárne. Voľba koeficientu závisí od konkrétnej aplikácie a ktoré rozmery sa považujú za dôležité. V prípade pevných látok by sa dalo uvažovať iba o zmene pozdĺž dĺžky alebo o určitej oblasti.

Dĺžkový koeficient tepelnej rozťažnosti je najzákladnejší koeficient tepelnej rozťažnosti a najrelevantnejší pre kvapaliny. Vo všeobecnosti sa látky zmenšia alebo sa zväčšia, keď sa ich teplota zmení, pričom expanzia alebo kontrakcia nastáva vo všetkých smeroch. Látky, ktoré expandujú rovnakou rýchlosťou v každom smere, sa nazývajú izotropné. Pre izotropné materiály je plocha a objemový koeficient tepelnej rozťažnosti približne dvakrát a trikrát väčšie, ako koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti.

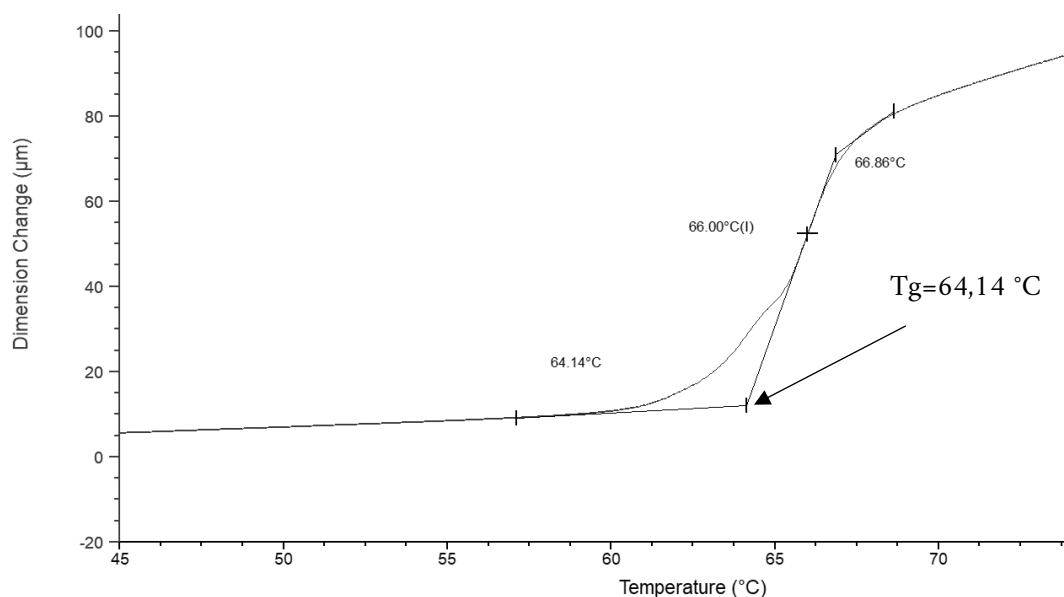
Lineárna expanzia znamená zmenu v jednom rozmere (dĺžka). Na prvé priblíženie sa zmena merania dĺžky objektu v dôsledku tepelnej rozťažnosti týka zmeny teploty pomocou "koeficientu lineárnej tepelnej rozťažnosti", ďalej ako CTE. Je to zlomková zmena dĺžky na stupeň zmeny teploty. Za predpokladu zanedbateľného tlaku môžeme napísať:

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$$

kde L je konkrétna nameraná dĺžka a  $dL/dT$  je rýchlosť zmeny tohto lineárneho rozmeru na jednotku zmeny teploty [18].

### Určenie bodu $T_g$ z krivky predĺženia v závislosti na teplote:

S programom nájdeme medzi dvoma označenými bodmi na krivke predĺženia bod, ktorý je priesečníkom smerníc krivky nakreslených ku krivke v týchto dvoch bodoch, ktoré sú nad a pod teplotou  $T_g$ .

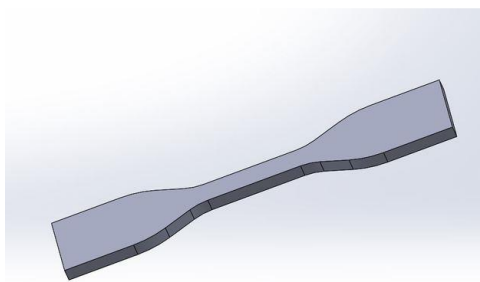


## 4. Experimentálna časť

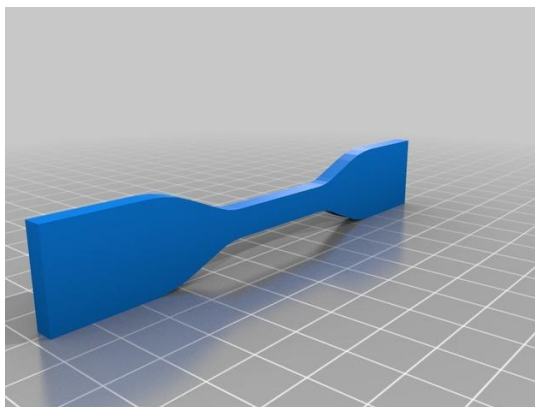
Mechanické a termomechanické skúšky boli jedny z hlavných úlohách tejto práce. Cieľom merania je zistiť aké vlastnosti majú vzorky, ktoré boli vytlačené na 3D tlačiarňi a následne určiť z nich tú najvýhodnejšiu metódu, pri ktorej daný materiál bol vyrobený.

### 4.1. Návrh a tlač vzoriek pre mechanické skúšky

Pomocou programu Slic3r Prusa Edition boli jednotlivé vzorky umiestnené a nastavené pre 3D tlač. Bolo nutné nastaviť teplotu tlače, rozlíšenie jednotlivých vrstiev, rýchlosť, vyplnenie, podpornú vrstvu apod. Pri meraní som pripravil 8 sady vzoriek z PLA a ASA s rôznymi rozlíšeniami jednotlivých vrstiev v danej sade. Vzorky mali rozlíšenie 50, 100, 150 a 200  $\mu\text{m}$ . V každej sade bolo 15 vzoriek, celkovo 120 vzoriek bolo mechanicky testované v trhačke. Infill vzoriek bol plný, vnútorné vrstvy uzatvárali na osy X a Y uhol  $45^\circ$  a jednotlivé vrstvy boli na seba kolmé. Súbor sme nakonfigurovali a vytlačili na 3D tlačiarne typu Original Prusa i3 MK3 (Obrázok 2.7.).



4.1. Obrázok: Vzorka ťahovej skúšky podľa normy ASTM D638 [21]

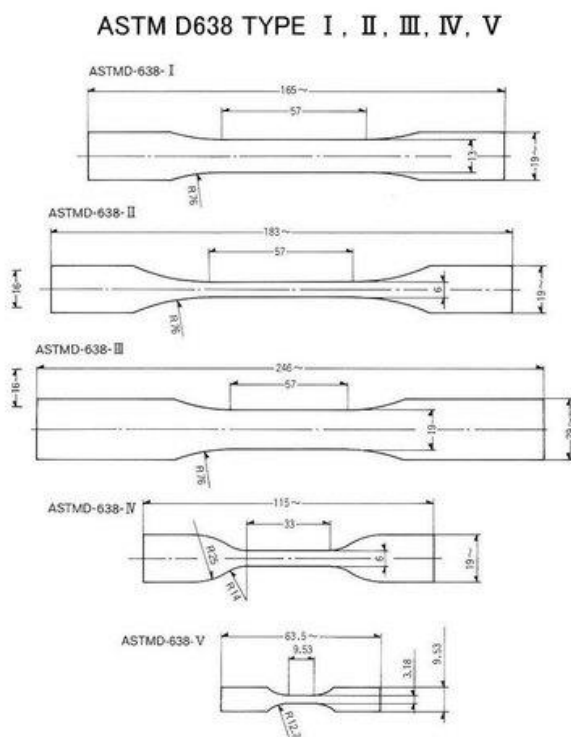


4.2. Obrázok: Vzorka ťahovej skúšky podľa normy z boku v programe Slic3r

#### 4.1.1. Rozmery vzoriek pre mechanickú skúšku

Mechanické skúšky v tejto práci boli prevedené na vzorkách, ktoré odpovedajú norme ASTM D638 [21]. Táto skúšobná norma je navrhnutá tak, aby sa získali údaje o vlastnostiach v ťahu na kontrolu a špecifikáciu plastových materiálov.

Naše vzorky boli typu V podľa normy ASTM D638 [21]. Rozmery, ktoré boli použité vo výpočtoch sú nasledovné: 9,53 x 3,18 x 2,44 mm. Rozmery boli overené aj s posuvným meradlom, ktorá mala presnosť 0,1 mm.



4.3. Obrázok: Rozmery vzoriek podľa normy ASTM D638 [21]

## 4.2. Nastavenie trhačky pre mechanickú skúšku

Jednotlivé vzorky boli mechanicky testované na školskej trhačke (5.4. Obrázok) DEFORM 02 od firmy PEMAR spol. s r.o. Tento prístroj má nasledujúce parametre [22].

Presnosť posunu	10 $\mu\text{m}$
Krok posunu	0,5 $\mu\text{m}$
Vzdialenosť čelisti	0,2 – 250 mm
Frekvencia merania	3 sps
Prevodník	24bit
Hmotnosť trhačky	43 kg
Veľkosť [š x v x h]	420×670×390 mm
Napájanie	230 V
Príkion v kľúdu	15 W
Príkion maximálny	800 W
Presnosť meranej sily	0,3 %
Silové rozsahy	10, 50, 100, 500, 1000, 3000 N
Pripojenie k PC	ethernet zásuvka

4.1. Tabuľka: Parametre trhačky [22]

Trhačka sa ovláda programom na počítači, ku ktorej je prístroj pripojený. Samotný program umožňuje užívateľovi nastaviť jednotlivé merania, sledovať priebeh mechanickej skúšky, vynieť grafické priebehy apod. Pri mojom experimente som trhačku nastavoval aby sa posúval smerom na hôr s rýchlosťou 1mm/min a celkovým posuvom 5 mm. Upevnenie jednotlivých vzoriek prebiehala kliešťami, s ktorou daný prístroj disponoval. Kliešte bolo potreba pevne utiahnuť, aby som predišiel prípadnému pošmyknutia vzoriek pri meraní, čo by spôsobovalo nepresnosti v dátach. Jednotlivé vzorky boli vždy upevnené v rovnakej polohe s rovnakým spôsobom. Dáta boli ukladané do [.txt] súborov, ktoré boli pozdejšie vyhodnotené a importované v programu Excel.

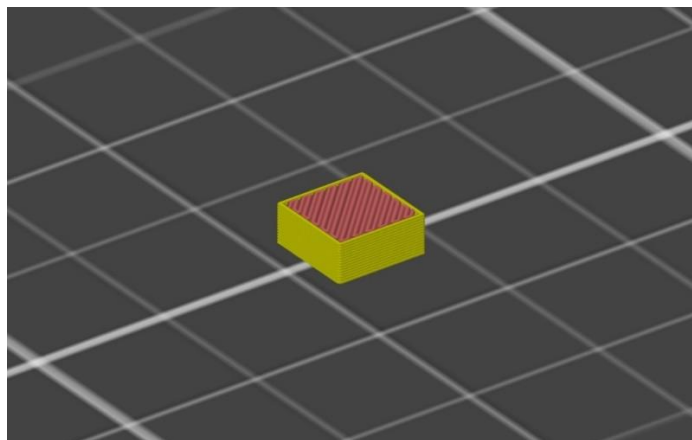
V tejto práci boli dôležité 2 parametre merania, a to **predĺženie vzorku** a **sila**, ktorá spôsobila na vzorku. Tieto dve hodnoty boli použité vo výpočtoch pevnosti v ťahu, ťažnosti a modulu pružnosti v ťahu.



4.4. Obrázok: Trhačka DEFORM 02 [22]

### 4.3. Návrh vzoriek pre termomechanické skúšky

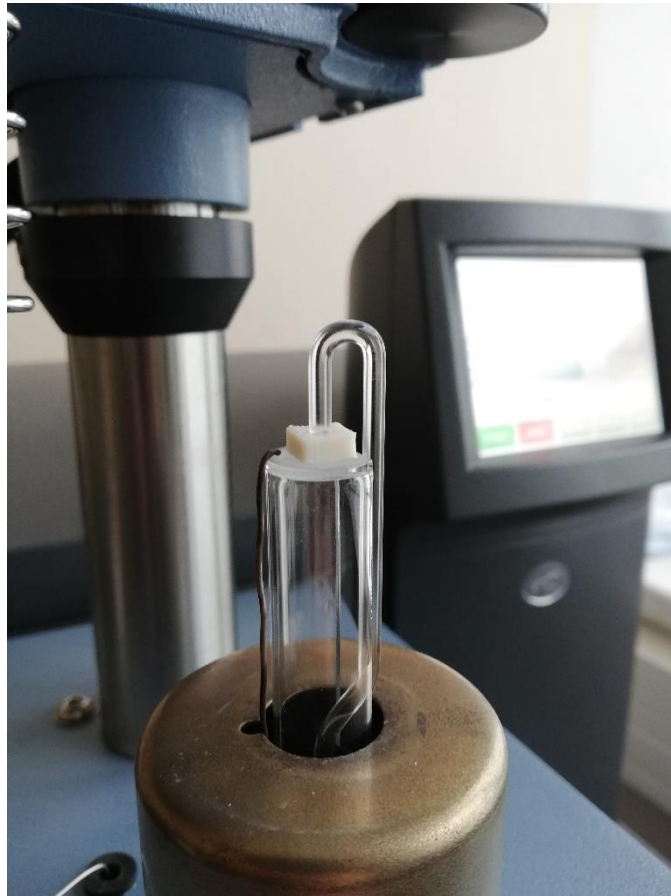
Vzorky pre termomechanické skúšky (TMA) som navrhol v programe Tinkercad od firmy Autodesk. Vzorky mali rozmery 7 x 7 x 3 mm. Vzorky boli z materiálov PLA a ASA, rozlíšenie jednej vrstvy bolo 150 mikrometrov. Pri meraní boli testované materiály s odlišnou teplotou trysky. Pre PLA 200-240 °C a pre ASA 250-280 °C. V každej sade pri danej teplote trysky boli skúmané dve vzorky. Výplň vzoriek bola podobne ako u vzoriek ASTM D638 plná, vnútorné vrstvy uzatvárali na osy X a Y uhol 45 ° a jednotlivé vrstvy boli na seba kolmé.



4.5. Obrázok: Navrhnutá vzorka pre termomechanické skúšky v programe Slic3r

#### 4.4. Nastavenie TMA pre termomechanické skúšky

Pri meraní termomechanických skúšok bola najprv dosiahnutá ustálená hodnota teploty komory 35 °C, ktorá trvala 5 minút. Potom bola postupne zvyšovaná teplota až do 170 °C v prípade materiálu ASA a do 150 °C u materiálu PLA. Celý proces prebiehal pri teplotnej rampe 5°C/min. Podobne pri vychladzovaní sa vzoriek teplota klesala až do 35 °C. Pri meraní bol použitý prietok dusíku do priestoru ohrievania 100ml/min. Sila ktorá bola aplikovaná na meranú vzorku mala hodnotu 0,01 N. Na začiatku každého merania bolo nameraná dĺžka materiálu s presnosťou 0,001 μm a po zatvorení priestoru ohrievania bolo ešte raz overená dĺžka materiálu. U ďalších meraní som zdroj tepla ochladil ventilátorom, aby koncová teplota z predchádzajúceho merania nemala vplyv na ďalšie namerané hodnoty.



4.6. Obrázok: Expanzná sonda umiestnená na meranom vzorke, ktorá sa nachádza na podložke



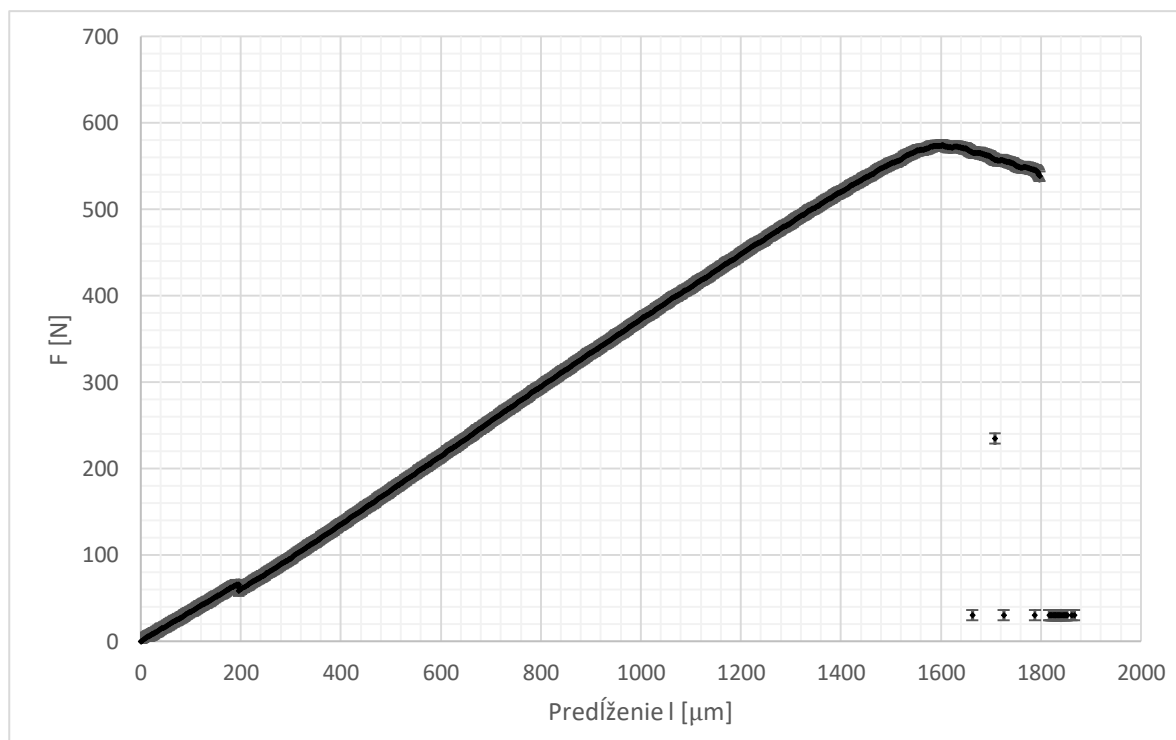
## 5. Namerané hodnoty

### 5.1. Namerané hodnoty mechanických skúšok

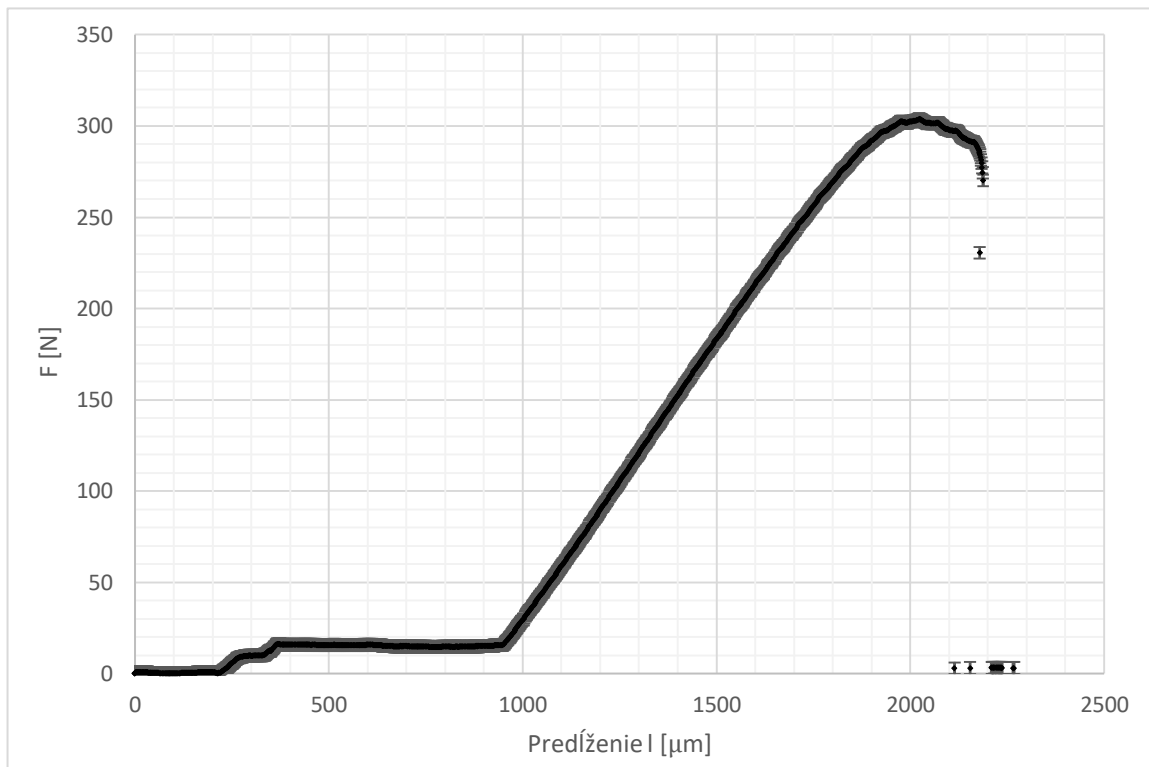
Jednotlivé namerané hodnoty boli spracované do tabuliek, kde nasledovne boli vypočítané tri pre nás dôležité veličiny - pevnosť v ťahu, ťažnosť a modul pružnosti v ťahu. Tieto vypočítané veličiny boli vynesené do grafov s priemernou hodnotou danej veličiny, aby bolo vidno zásadný rozdiel medzi rôznymi rozlíšeniami vzoriek. V niektorých prípadoch namerané hodnoty neboli dostatočne vyhovujúce na vyhodnotenie. Tieto hodnoty nie sú uvedené v grafoch a ani v celkovom hodnotení merania. Jednalo sa o prípady keď daná vzorka sa predĺžila ale sa nepretrhla, a to kvôli šmyku v upevňovacích kliešťoch. Následne tieto vzorky už boli nepoužiteľné, keďže materiál bol zdeformovaný a opätovné meranie by prinieslo iné hodnoty mechanických vlastností.

Namerané hodnoty boli spracované a porovnané s tabulkovými a očakávanými hodnotami z predchádzajúcich výskumov, ktoré sa venujú danej problematike.

V nasledujúcich grafoch sú vynesené namerané hodnoty trhačkou – a to sila v N, ktorá bola aplikovaná na danú vzorku a relatívne predĺženie materiálu v  $\mu\text{m}$ .



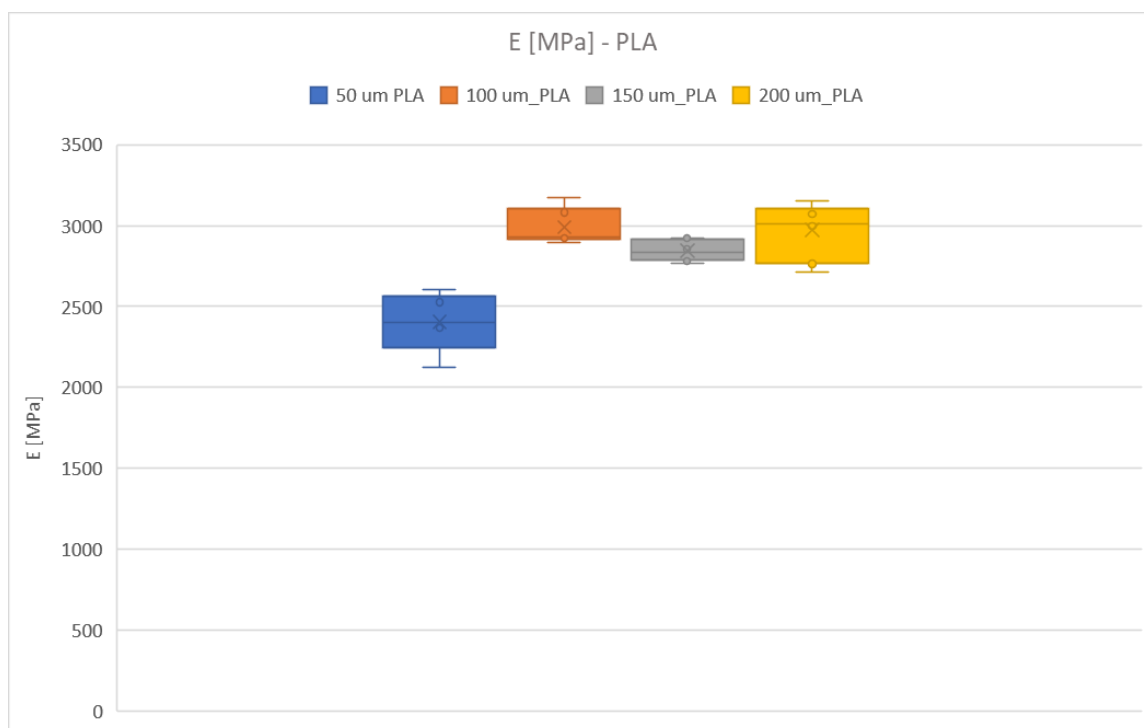
5.1. Graf: Predĺženie materiálu PLA 200 $\mu\text{m}$  v závislosti aplikovanej sily



5.2. Graf: Predĺženie materiálu PLA 50μm v závislosti aplikovanej sily

Z grafov môžeme usúdiť, že maximálna sila, pri ktorej daná vzorka sa pretrhla bola oveľa nižšia v prípade nastaveného rozlíšenia 50 μm ako u 200 μm u materiálu PLA. V grafe 6.2. vidíme na začiatku krivky konštantnú silu pri ktorej sa vzorka predlžovala. Táto časť krivky ukazuje dobu, keď ešte daná vzorka nebola pevne uchytená v prístroje a pohyb sa uskutočnil len v horných kliešťach, tzn. že na vzorku priamo nebola aplikovaná žiadna sila. Hodnoty modulu pružnosti boli vypočítané už z lineárnej časti charakteristiky, kde už neboli prítomné výchylky a náhle zmeny sily, ktorá spôsobila na vzorku.

Namerané hodnoty modulu pružnosti v ťahu boli vynesené do nasledujúceho grafu.



5.3. Graf: Modul pružnosti u PLA

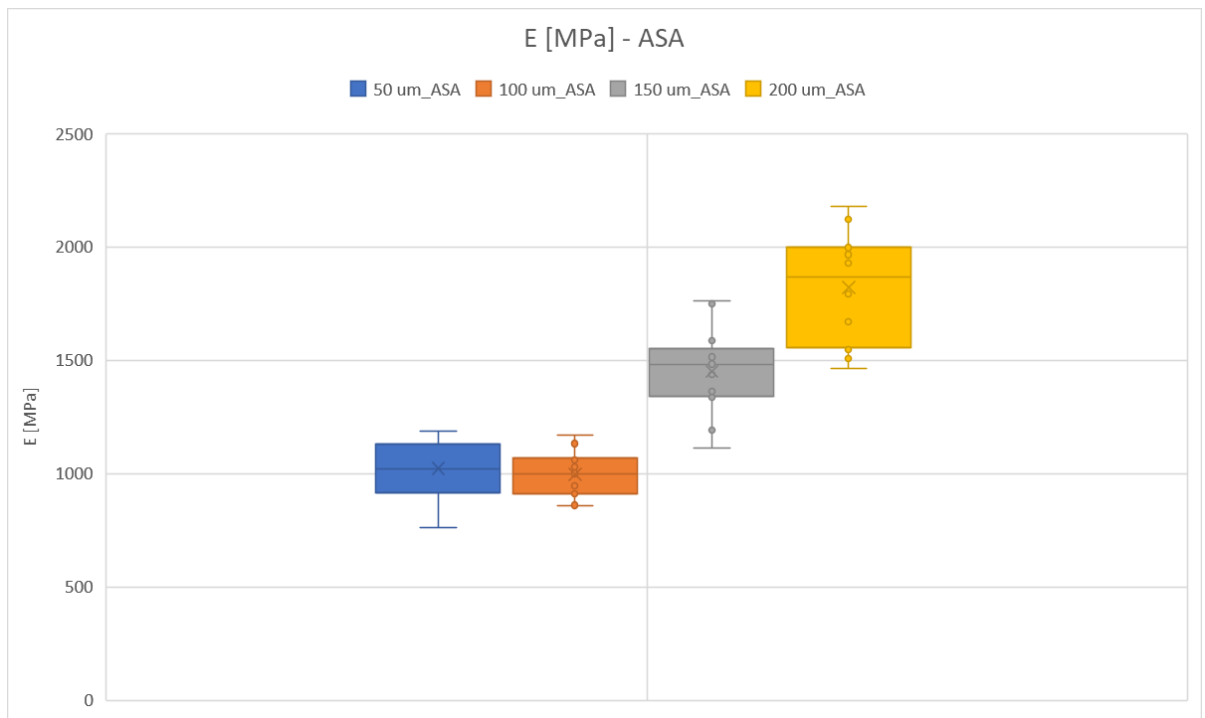
Z grafu vidíme, že hodnoty modulu pružnosti v ťahu u PLA vyšli v priemere v rozmedzí

2405 – 2973 MPa s priemernou hodnotou:  $2802 \pm 236$  MPa

Tabuľkové hodnoty modulu pružnosti v ťahu materiálu PLA podľa [7] sú

2700 – 3500 MPa

Jednotlivé rozlíšenia tlače vykazujú značný rozdiel v mechanických vlastnostiach daného materiálu. U materiálu PLA pri rozlíšení jednej vrstvy 200  $\mu\text{m}$  sme dostali hodnoty, ktoré by sme očakávali podľa predošlých výskumoch [8]. Vzorky s menším rozlíšením jednej vrstvy vykazujú značný pokles v hodnotách modulu pružnosti v ťahu, čo môže byť spôsobené najmä anizotropnou štruktúrou materiálu a defektami v materiálu, ktoré vznikli pri tlače. Nami používaná tlačiareň nemala vlastnosti tlačiarní priemyselného typu, tzn. že nedisponovala s takou presnosťou pri tlače materiálov. Pri počítaní odchýlky bola použitá smerodajná odchýlka nameraných hodnôt.



5.4. Graf: Modul pružnosti v tahu u materiálu ASA

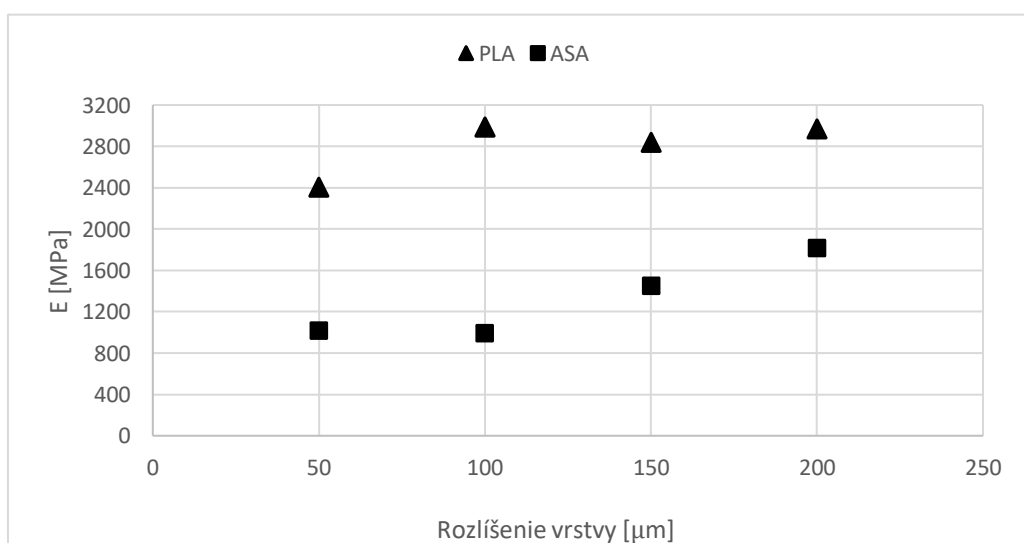
Opäť vidíme, že hodnoty modulu pružnosti v tahu u materiálu ASA vyšli v priemere v rozmedzí

1022 – 1821 MPa s priemernou hodnotou:  $1322 \pm 339$  MPa

Tabulkové hodnoty modulu pružnosti v tahu materiálu ASA podľa [10], [9] sú

1785 – 2480 MPa

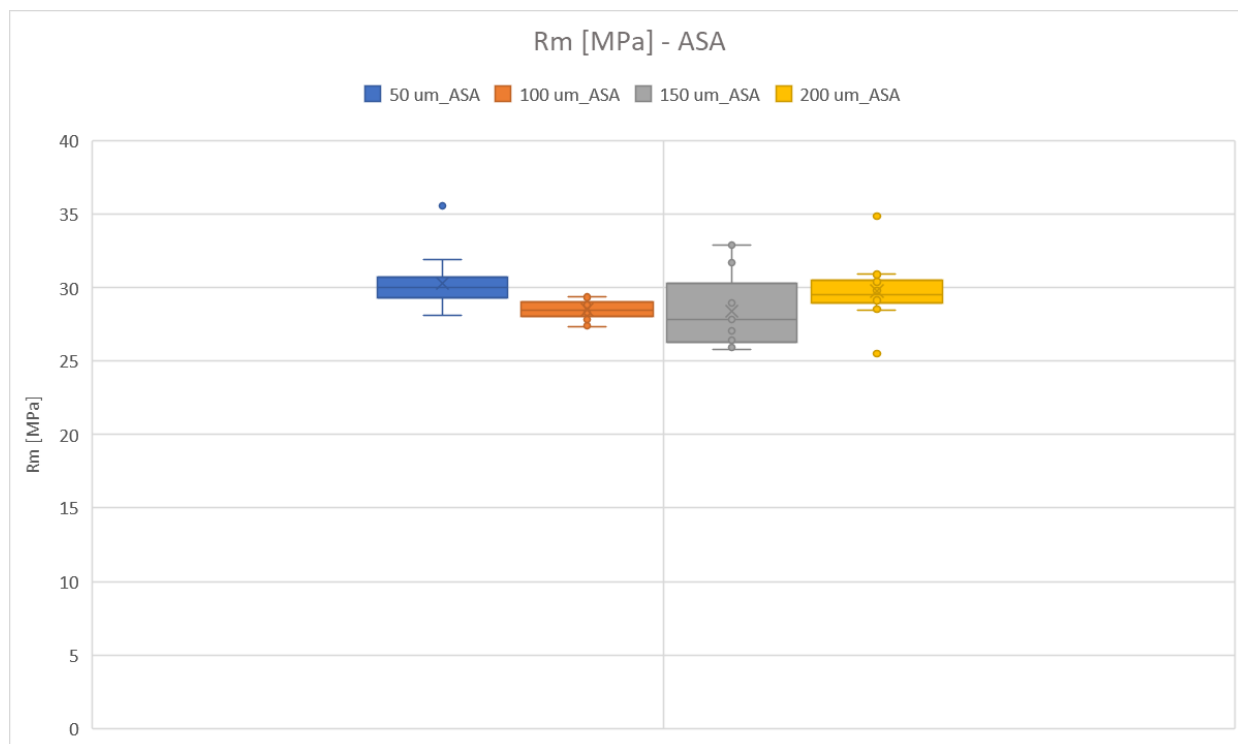
Súhrny graf priemerných hodnôt modulu pružnosti v tahu u materiáloch PLA a ASA:



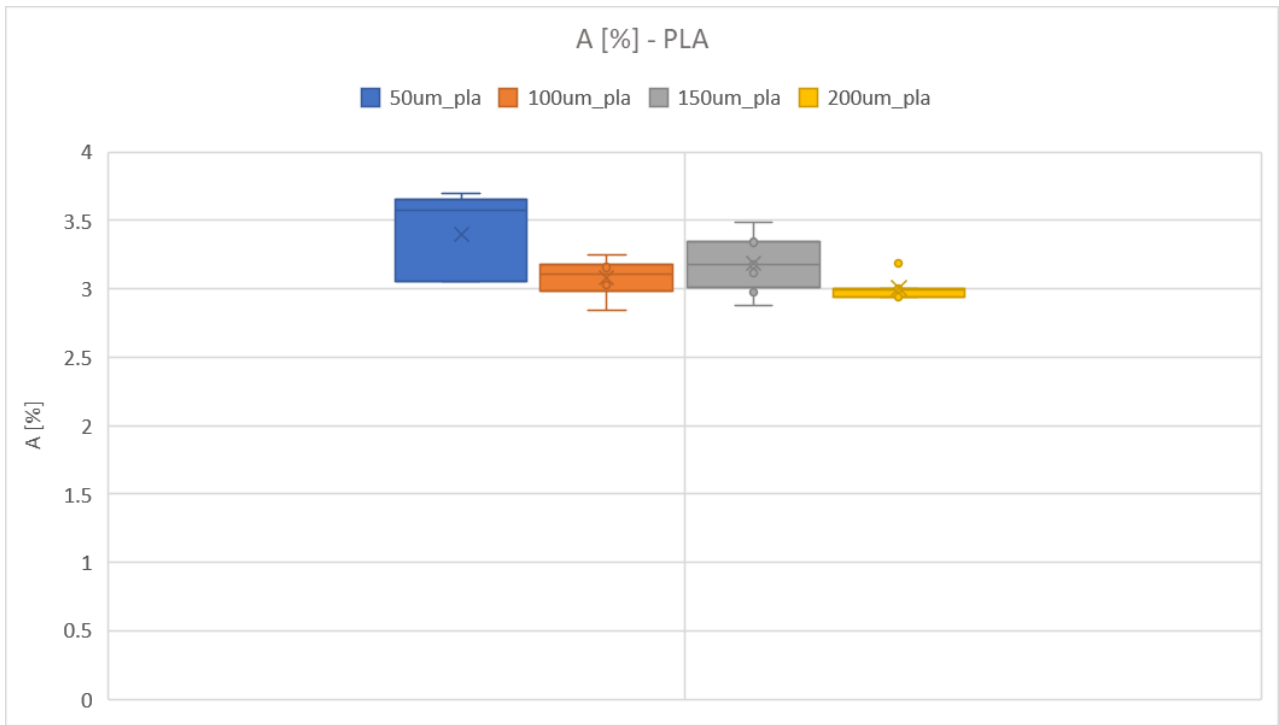
5.5. Graf: Priemerné hodnoty modulu pružnosti u oboch materiáloch



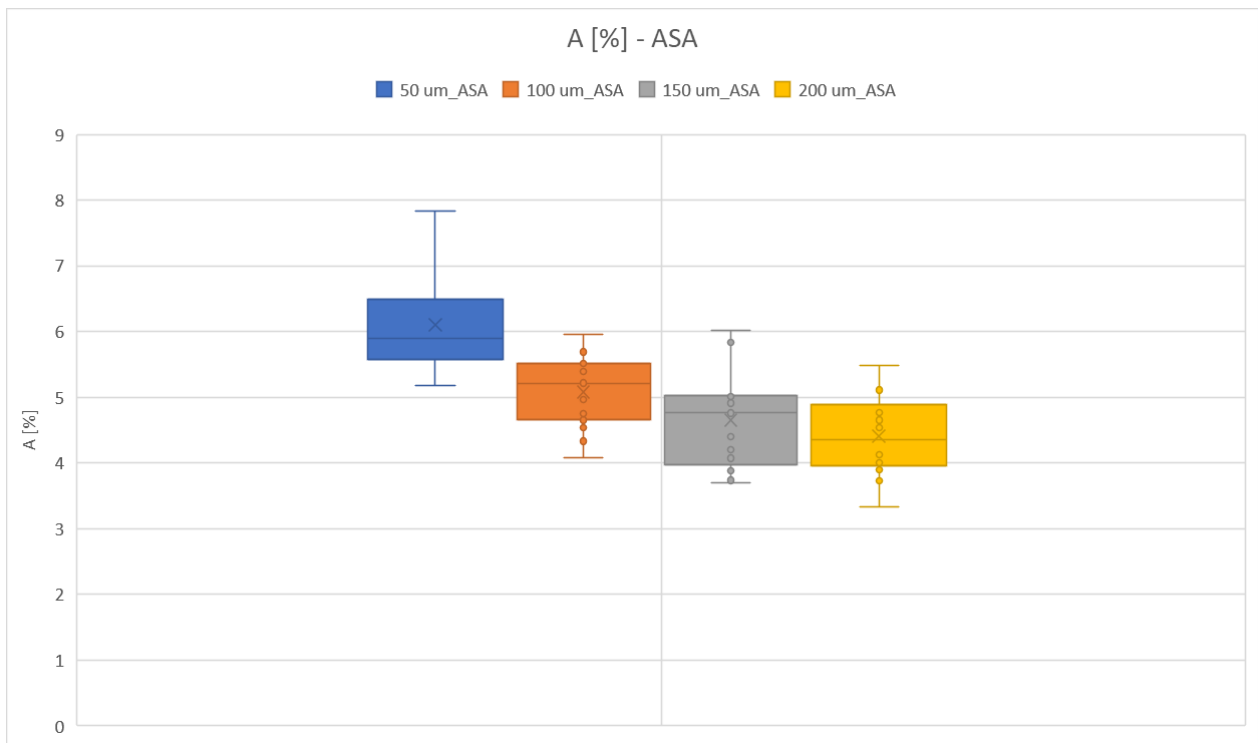
5.7. Graf: Namerané hodnoty pevnosti u materiálu PLA pri rôznych rozlíšeníach tlače



5.6. Graf: Namerané hodnoty pevnosti materiálu ASA pri rôznych rozlíšeníach tlače



5.9. Graf: Namerané hodnoty ťažnosti materiálu PLA pri rôznych rozlíšeníach tlače



5.8. Graf: Namerané hodnoty ťažnosti materiálu ASA pri rôznych rozlíšeníach tlače

### 5.1.1. Prehľadové tabuľky nameraných mechanických vlastností

V nasledujúcich tabuľkách vidíme namerané priemerné hodnoty pevnosti ( $R_m$ ), ťažnosti (A) a modulu pružnosti v ťahu (E).

Rozlíšenie vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	50	100	150	200
$R_m$ [MPa]	24.34	42.34	41.64	43.20
A [%]	3.39	3.08	3.18	3.00
E [MPa]	2405.86	2989.39	2843.20	2973.38

5.1. Tabuľka: Priemerné hodnoty mechanických vlastností u materiálu PLA

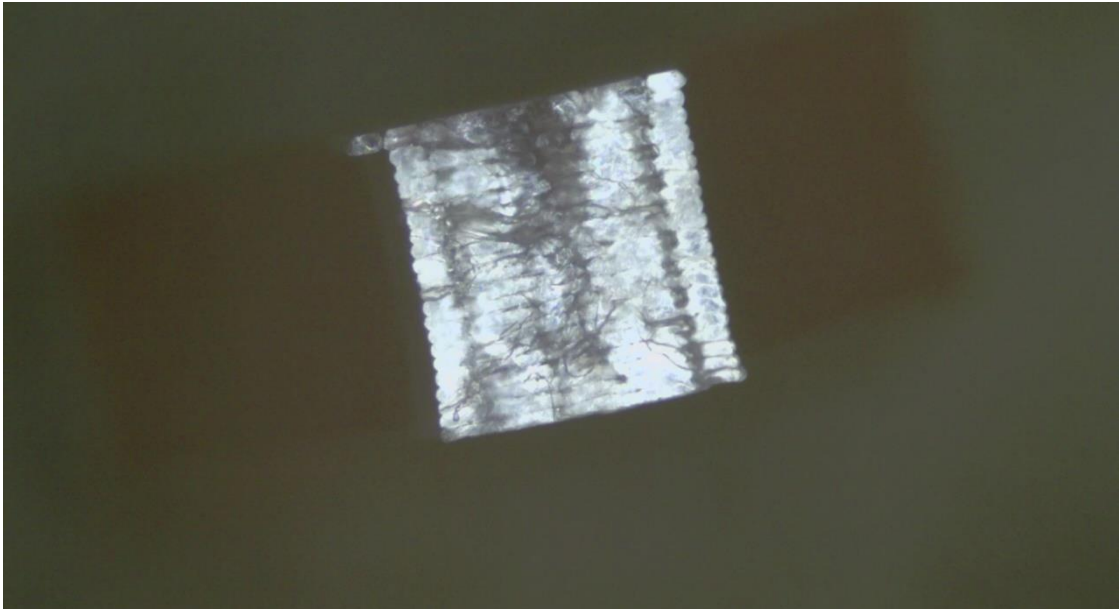
Rozlíšenie vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	50	100	150	200
$R_m$ [MPa]	30.30	28.48	28.40	29.75
A [%]	6.10	5.21	4.65	4.41
E [MPa]	1022.36	996.25	1451.35	1821.00

5.2. Tabuľka: Priemerné hodnoty mechanických vlastností u materiálu ASA

Pevnosť v ťahu u materiálu PLA v prípade rozlíšenia vrstvy 50 mikrometrov vyšla približne dvojnásobne menšia ako u ostatných rozlíšeníach. Tento jav mohlo byť spôsobené tým, že použitá tlačiareň a tryska, ktorou tlačiareň disponovala nemala takú presnosť tlače a nebola schopná dodržať 50 mikrometrovú šírku jednej vrstvy. Tým vznikli v materiálu defekty, ktoré mohli spôsobiť iné mechanické vlastnosti, najmä zmenu pevnosti a modulu pružnosti v ťahu daného materiálu.

Ďalej z nameraných hodnôt vyplýva, že u materiálu ASA v pevnosti nie sú značné rozdiely medzi rôznymi rozlíšeniami jednotlivých vrstiev daného objektu. Naopak modul pružnosti, ktorá sa postupne zvyšovala s vyššou hodnotou rozlíšenia jednej vrstvy. Najväčšie hodnoty modulu pružnosti boli dosiahnuté pri rozlíšení 200 mikrometrov.

Vzorky po pretrhaní som ďalej skúmal. Všimol som si, v ktorej časti sa pretrhali a tiež aké povrchné zmeny sa nastali pri pretrhaní. Pretrhanie prebiehalo v požadovanom mieste podľa normy ASTM D638, čo znamená, že bola použitá správna metóda na určenie modulu pružnosti v ťahu. Tieto skutočnosti som zaznamenal pomocou profesionálnej kamery. Nafotené vzorky boli z rozmerového typu V a boli vytlačené z materiálu ASA.



5.1. Obrázok: Pohľad na vzorku z hora



5.2. Obrázok: Pohľad na vzorku z boku



## 5.2. Vyhodnotenie nameraných hodnôt mechanických skúšok

Pri testovaní sme použili 4 sady ASA materiálu a 4 sady PLA materiálu, v každej sade bolo 15 vzoriek. Z nameraných hodnôt môžeme vidieť, že najväčšiu modul pružnosti v ťahu sme dostali u rozlíšenia 150  $\mu\text{m}$ , resp 200  $\mu\text{m}$  u materiáloch PLA a ASA. S porovnaním s materiálom ASA sme zistili, že materiály majú odlišné mechanické vlastnosti, najmä odolnosť voči trhaní. Niektoré namerané hodnoty boli vyradené z vyhodnotenia, kvôli vysokým nepresnostiam, alebo kvôli spôsobeným chybám pri meraní na trhačke. Tieto vzorky boli nahradené s novo vytlačenými materiálmi.

V meraní som dostal priemernú hodnotu modulu pružnosti v ťahu u materiálu PLA v rámci chyby, ktorá odpovedala teoreticky očakávaným hodnotám. Materiál ASA nevykazoval takú zhodu s tabulkovými hodnotami najmä pri rozlíšeniach 50 a 100 mikrometrov. Táto nezhoda s tabulkovými hodnotami môže byť spôsobená najmä tým, že tlač menších rozlíšení tlačiareň nezvládla tak ako v prípade 150 a 200 mikrometrov. Tryska a aj krokové motory majú značné obmedzenia a pri komerčne dostupnej tlačiarni nemôžeme očakávať takú presnosť.

Väčšina chýb mohol vzniknúť najmä pri tlačení vzoriek. Nami používané 3D tlačiarne nemajú presnosť priemyselných tlačiarní. Samotná tryska pri postupnom zvädani sa ovplyvnila kvalitu tlače. Ďalšie chyby mohli vzniknúť pri upevnení materiálu do trhačky. Bolo veľmi ťažké materiál upevniť vždy v rovnakej polohe, a veľa krát sa materiál „pošmykol“ a tak spôsobil nepresné hodnoty v nameraných hodnotách predĺženia materiálu. Vonkajšie vplyvy, ako napr. rezonancie a pohnutie stolu, na ktorom bola umiestnená trhačka môžeme považovať za minimálne. Tieto vonkajšie dosahy mohli pritom len málo ovplyvniť nameranú silu, alebo polohu.

3D tlačiareň bola umiestnená v boxu, ktorý mal zaručiť odsávanie vzniknutých plynov pri tlače. Kvôli tomu teplota podložky a samotného prostredia bola väčšia – v uzavretom priestore sa zvyšuje tepelná izolácia oproti otvorenom priestoru. Vyššie teploty požadovali korekciu teploty podložky a trysky. Vďaka tepelnej izolácii, nastavenie teploty na tlačiarni bola oveľa presnejšia, tým sa znížila aj počet defektov počas tlače.

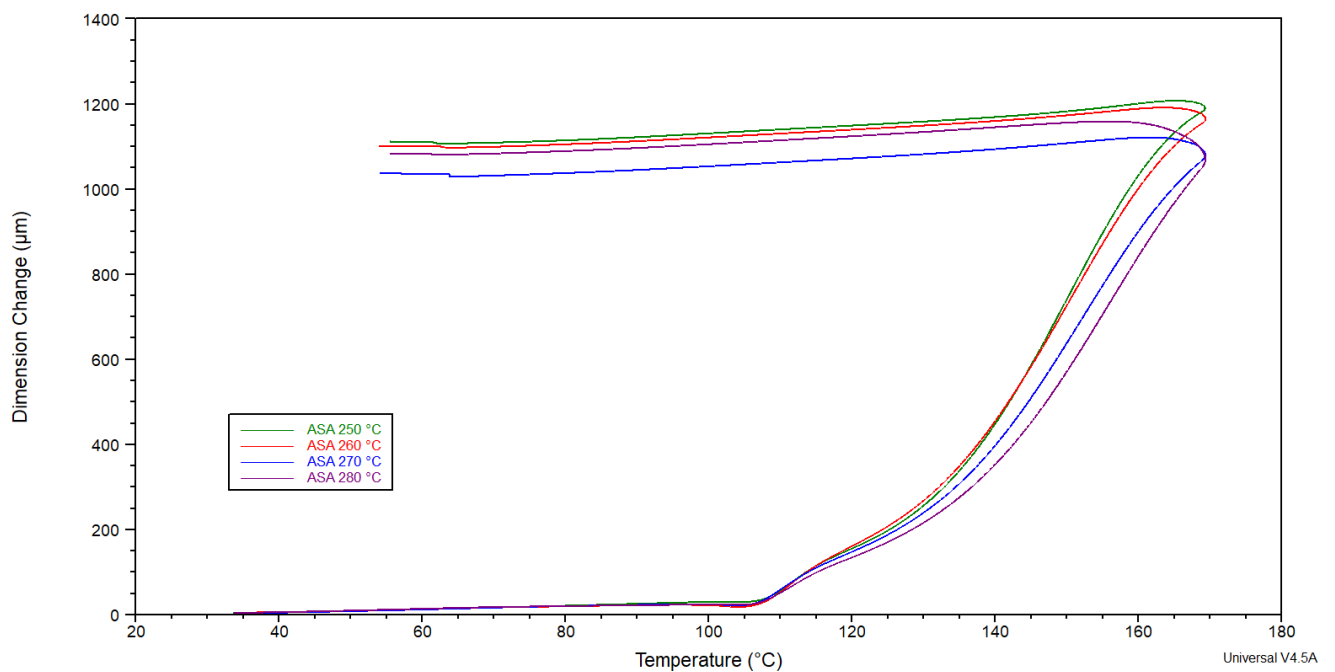
Z nameraných hodnôt môžeme povedať, že ak chceme aby daný vytlačený objekt bol aj mechanicky čo najviac odolný, tak doporučujem použiť rozlíšenie jednej vrstvy 200 mikrometrov.

### 5.3. Namerané hodnoty TMA skúšok

V tejto kapitole sa budem venovať nameraným hodnotám termomechanických skúšok. Budem skúmať koeficient tepelnej rozťažnosti, teploty skleneného prechodu a tavenia. Z týchto hodnôt môžeme zistiť dôležité parametre vzoriek z hľadiska chovania pri zmene teploty prostredia.

#### 5.3.1. Predĺženie v závislosti na teplote

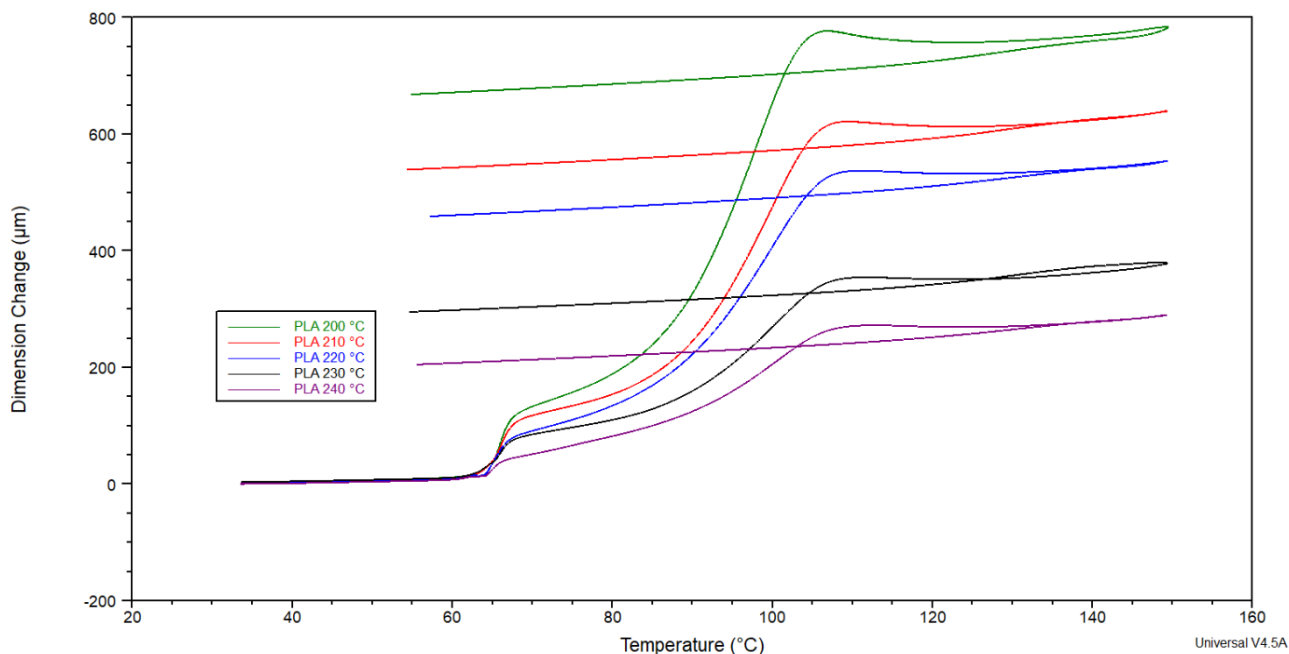
V nasledujúcom grafe vidíme vzorky ASA testované pri teplote tlače 250 až 280 °C. V tomto grafe sú vynesené hodnoty relatívneho predĺženia materiálu ( $\mu\text{m}$ ) v závislosti na teplote ( $^{\circ}\text{C}$ ). Bolo zvolené viacero teplôt kvôli tomu, aby bolo vidieť značný rozdiel medzi chovaním materiálu pri odlišných teplotách tlače materiálu.



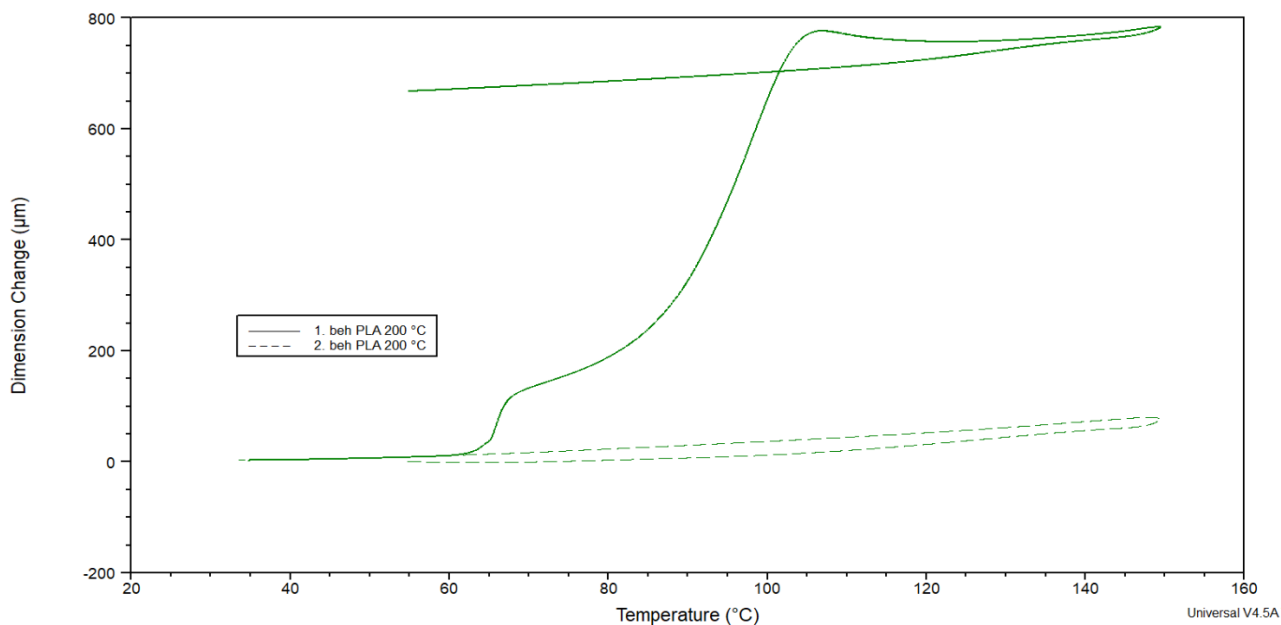
5.10. Graf: Predĺženie ASA pre teploty tlače 250 °C až 280 °C

V nasledujúcom grafu sú vynesené namerané hodnoty predĺženia materiálu PLA v X-ovej osy pri teplote tlače 200 až 240 °C. Je vidieť rozdiel medzi chovaním materiálu ASA a materiálu PLA pri testovaní v TMA. Môžeme z toho vyvodit' to, že teplotne viac „citlivý“ materiál je PLA.

**Porovnanie prvého a druhého behu pri teplote tlače 200 °C u materiálu PLA:**

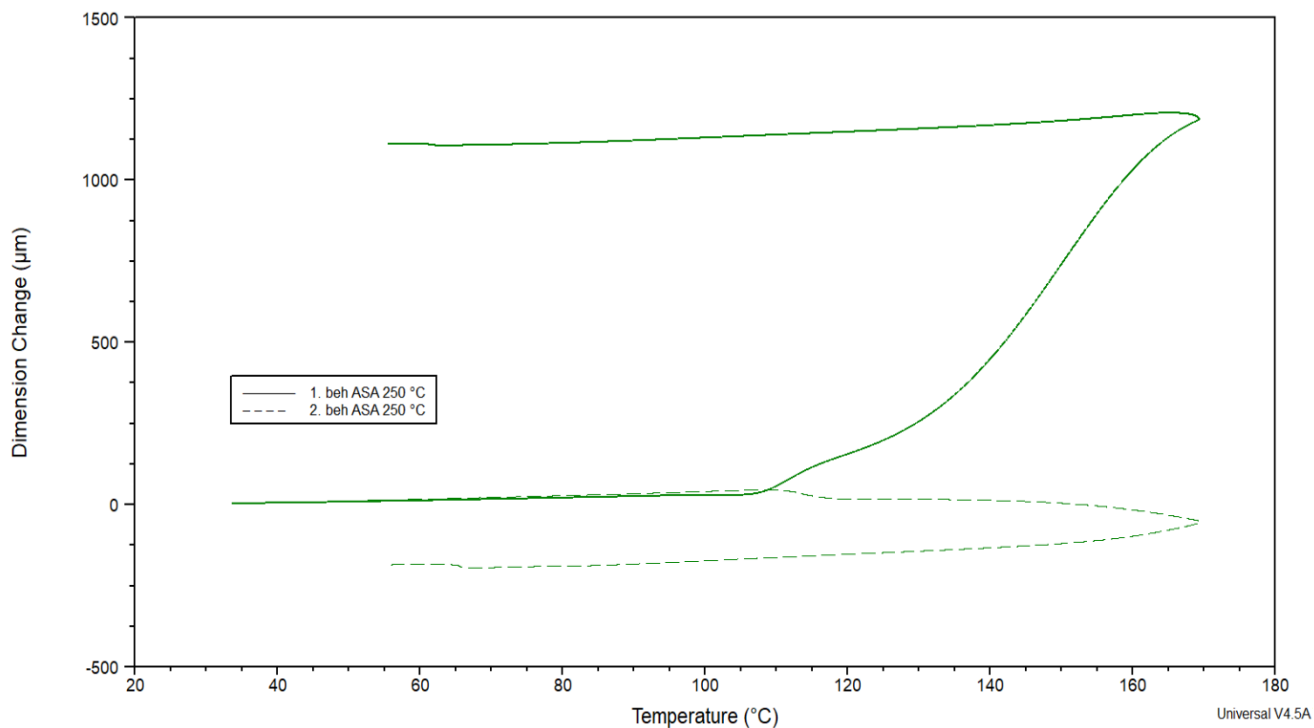


5.11. Graf: Predĺženie materiálu PLA pri teplotách tlače 200 °C až 240 °C



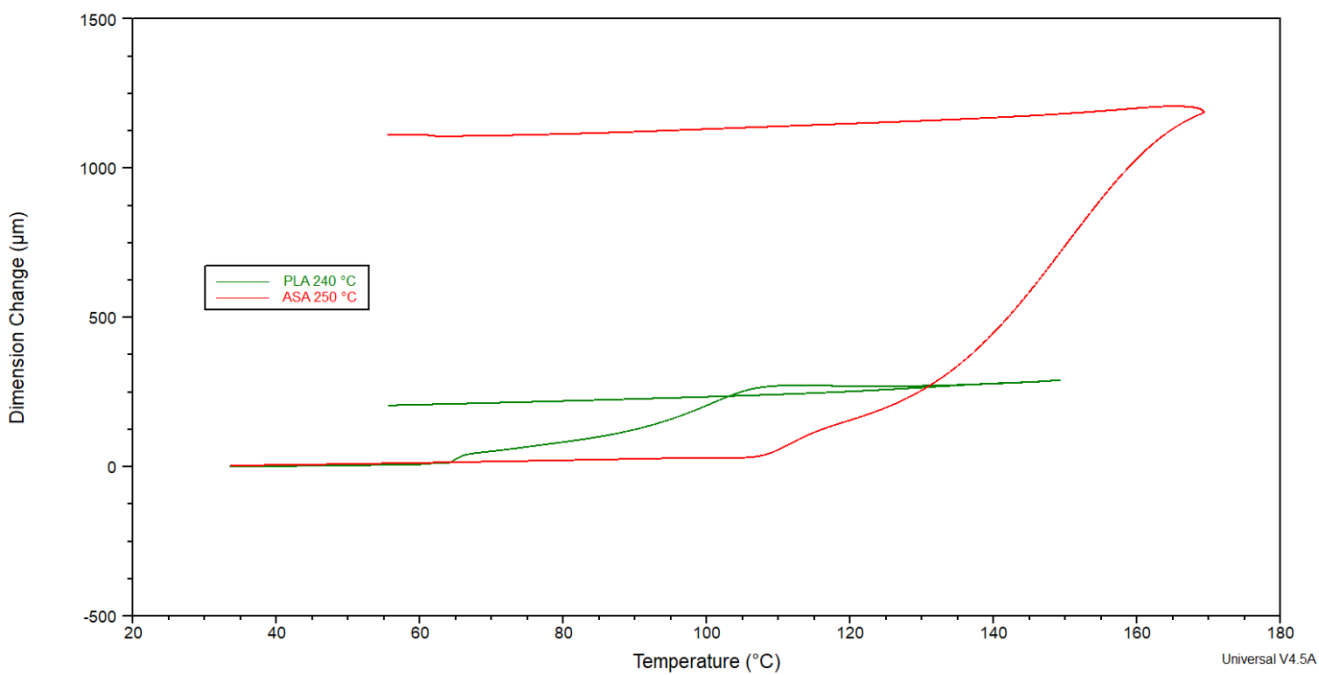
5.12. Graf: Porovnanie prvého a druhého behu u materiálu PLA

**Porovnanie prvého a druhého behu pri teplote tlače 250 °C u materiálu ASA:**



5.13. Graf: Porovnanie prvého a druhého behu u materiálu ASA

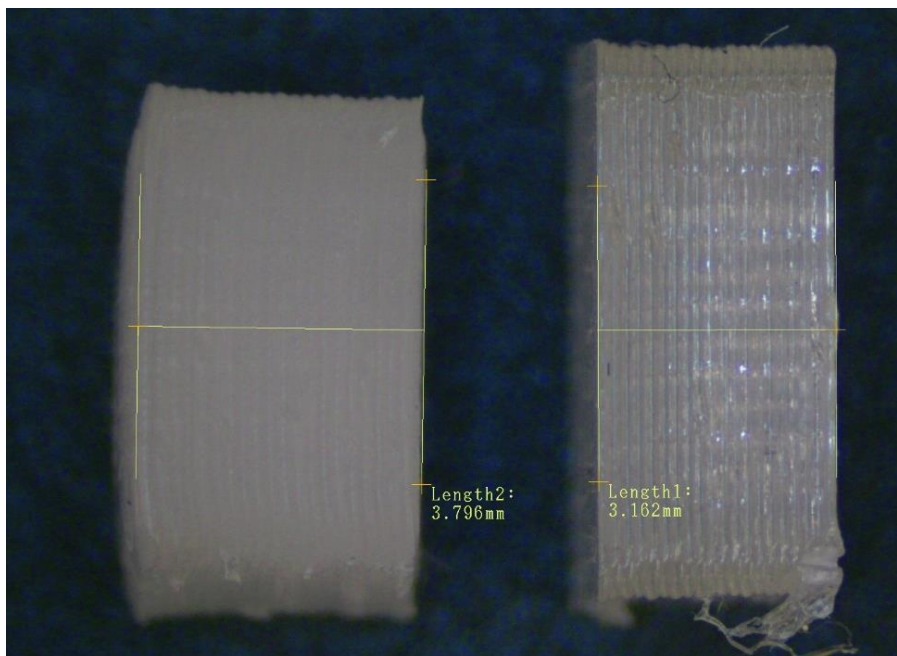
**Porovnanie materiálov ASA a PLA pri teplotách tlače 250 °C a 240 °C :**



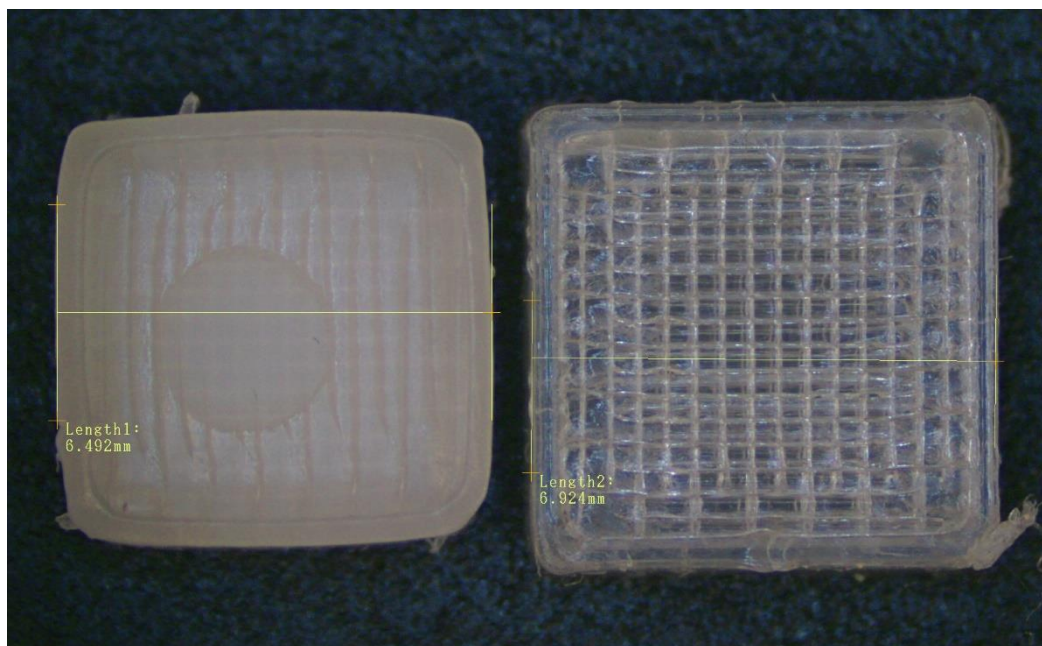
5.14. Graf: Porovnanie materiálov ASA a PLA

### Vzorky pred a po TMA meraní:

Vzorky pred vložením do zariadenia sme odľotili profesionálnou kamerou. Z obrázkoch môžeme vidieť predĺženie materiálu v Z-ovej ose a skrátenie v Y-ovej a X-ovej ose.



5.3. Obrázok: Vzorka pred meraním v TMA (vpravo) a po ukončení merania (vľavo) u materiálu PLA



5.4. Obrázok: Vzorka pred meraním v TMA (vpravo) a po ukončení merania (vľavo) u materiálu PLA

Vzorky / Teplota tlače	Pred TMA [mm]	Po TMA [mm]	Rozdiel [mm]
PLA 200 °C X	6.92	6.49	0.43
PLA 200 °C Z	3.16	3.79	-0.63
PLA 210 °C X	7.23	6.77	0.45
PLA 210 °C Z	3.17	3.77	-0.60
PLA 220 °C X	6.98	6.43	0.54
PLA 220 °C Z	3.14	3.66	-0.52
PLA 230 °C X	6.97	6.66	0.31
PLA 230 °C Z	3.05	3.41	-0.36
PLA 240 °C X	6.89	6.53	0.36
PLA 240 °C Z	3.08	3.40	-0.32

5.3. Tabulka: Tabulka maximálneho predĺženia vzoriek PLA v X-ovej a Z-ovej osy

Vzorky / Teplota tlače	Pred TMA [mm]	Po TMA [mm]	Rozdiel [mm]
ASA 250 °C X	6.99	6.80	0.19
ASA 250 °C Z	3.02	3.98	-0.96
ASA 260 °C X	7.03	6.38	0.65
ASA 260 °C Z	3.07	3.95	-0.88
ASA 270 °C X	7.05	6.47	0.58
ASA 270 °C Z	3.10	3.91	-0.81
ASA 280 °C X	6.98	6.39	0.59
ASA 280 °C Z	3.05	3.87	-0.82

5.4. Tabulka: Tabulka maximálneho predĺženia vzoriek ASA v X-ovej a Z-ovej osy

### 5.3.2. CTE

Koeficient tepelnej rozťažnosti popisuje, ako sa mení veľkosť objektu so zmenou teploty. Koeficient bol vypočítaný pomocou programu Universal Analysis od TA Instruments. Jednotlivé závislosti koeficientu na teplote sú vynesené do grafov. Tieto grafy a hodnoty CTE boli použité na výpočet a určenie teploty skleneného prechodu a tiež teplotu topenia (kryštalizácie) v danom materiálu.

### 5.3.3. Namerané hodnoty teploty skleneného prechodu:

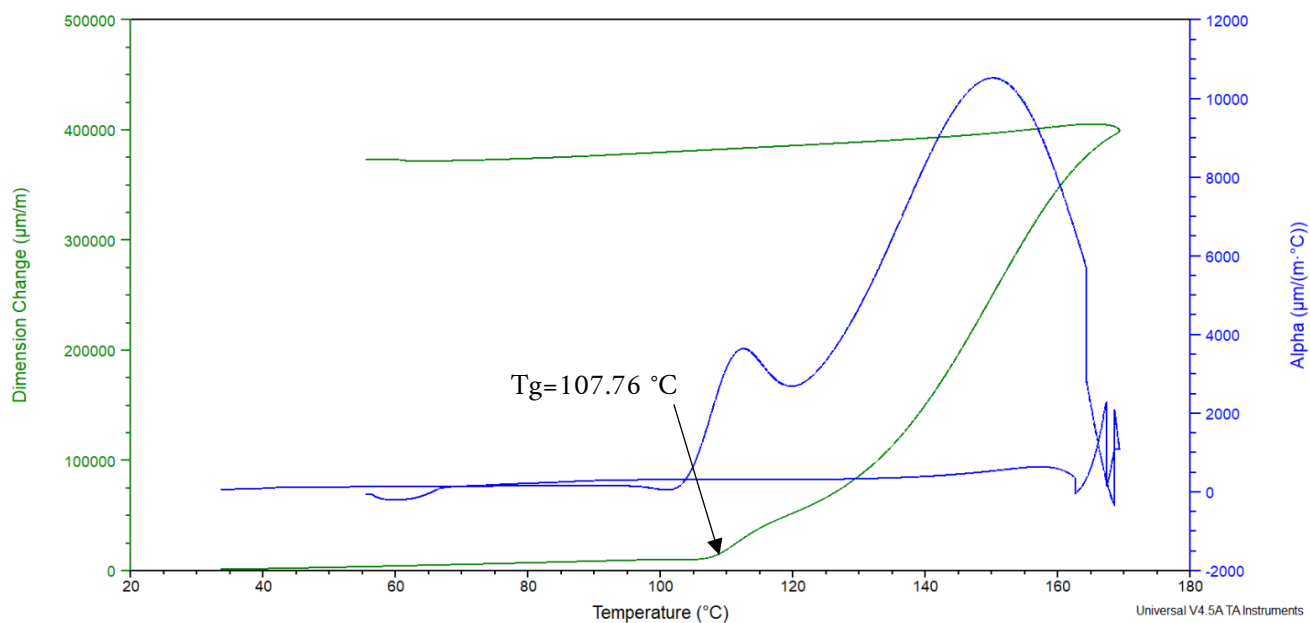
V nasledujúcich tabulkách sú uvedené teploty skleneného prechodu, ktoré boli získané z krivky predĺženia, ktorá bola závislá na teplote komory. Teplotu skleneného prechodu som určil pomocou programu TA Universal Analysis. Program nájde medzi dvoma označenými bodmi bod, ktorý je priesečníkom smerníc krivky pred Tg a nad Tg.

PLA / Teplota tlače	200 °C	210 °C	220 °C	230 °C	240 °C
Tg [°C]	64.7	64.49	64.16	64.11	63.88

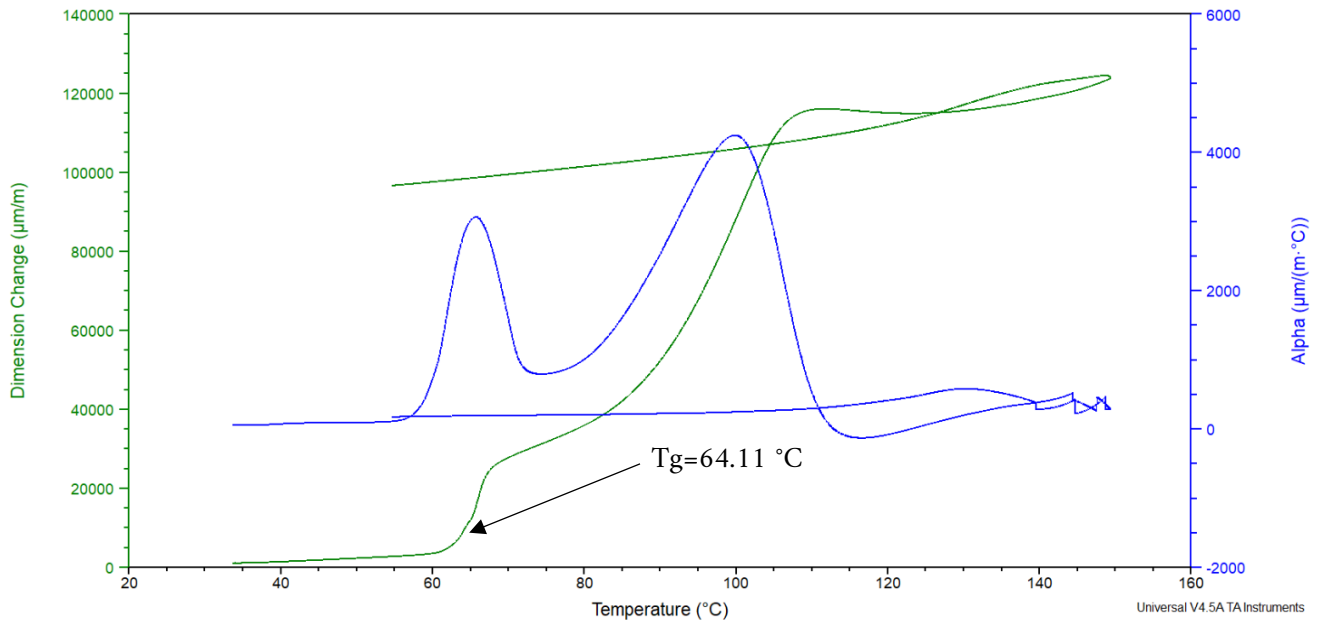
5.5. Tabuľka: Teploty skleneného prechodu pre rôzne teploty tlače u materiálu PLA

ASA / Teplota tlače	250 °C	260 °C	270 °C	280 °C
Tg [°C]	107.76	107.8	106.98	107.24

5.6. Tabuľka: Teploty skleneného prechodu pre rôzne teploty tlače u materiálu ASA



5.15. Graf: Koeficient tepelnej rozťažnosti u materiálu ASA pri teplote tlače 250 °C



5.16. Graf: Koefficient tepelnej rozťažnosti u materiálu PLA pri teplote tlače 230 °C

#### 5.4. Vyhodnotenie nameraných hodnôt termomechanických skúšok

Z nameraných hodnôt vidíme, že kedy sa nastane sklenený prechod materiálu. Sklenený prechod znamená postupný a reverzibilný prechod v amorfných materiáloch (alebo v amorfných oblastiach v semikryštalických materiáloch), z tvrdého a relatívne krehkého "sklovitého" stavu do viskózneho alebo gumového stavu, keď sa teplota zvyšuje. Práve toto môžeme sledovať aj u materiáloch, ktoré boli vytlačené v našom experimente. Z nameraných hodnôt vidíme, že PLA má túto teplotu okolo 64 °C. U materiálu ASA sa táto teplota pohybuje okolo 107 °C. Tieto namerané hodnoty odpovedajú teoretickým predpokladom a tabulkovým hodnotám [7], [8], [10].

Z grafov môžeme vyvodit' nie len teploty skleneného prechodu, ale aj to, že viac citlivý materiál na teplotu tlače je PLA. Krivky ukazujú značný rozdiel medzi spôsobom ako reaguje PLA na teplotné zmeny pri rôznych teplotách tlače materiálu. PLA pri vyšších teplotách trysky po TMA skúškach ukazuje nižšie teploty skleneného prechodu Tg. To je najmä spôsobené tým, že v PLA sa nachádza viac amorfných oblastí než u ASA, čo spôsobuje väčšiu deformáciu. PLA pri každej teplote tlače ukazuje inú charakteristiku relatívneho predĺženia v závislosti na teplote



komory. Naopak ASA takúto charakteristiku nemá a je viac „odolná“. Pri rôznych teplotách tlače sa neobjavujú značné rozdiely v predĺženiach materiálu.

PLA na druhej strane má výhodu v tom, že pri teplotnej rampe bola predĺženie vzorku nižšia ako u ASA. Môže preto byť PLA výhodné aj pre využitie v oblastiach, kde je podstatná tepelná odolnosť materiálu voči vonkajším teplotám.

## 6. Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bola zoznámiť sa s technológiami aditívnej výroby, mechanickými a termomechanickými vlastnosťami materiálov. Práca sa zamieruje na vplyv nastavení 3D tlačiarní na vlastnosti vytlačených objektov.

V teoretickej časti som najprv skúmal oblasť aditívnej technológie a súčasnú výrobu elektrotechnických materiálov spôsobom 3D tlače. Z meraní a z teoretickej časti vyplýva, že v dnešnej dobe je najviac použitá a vhodná technológia FDM – fúzne depozičné modelovanie, ktorá má svoje výhody a nevýhody. Technológia je voľne dostupná nie len pre priemysel ale aj pre jednotlivci. Tým pádom je aj vývoj a celková využiteľnosť danej výroby oveľa širšia. V tejto práci som overil túto skutočnosť. Tlačiareň a samotný postup tlače bol intuitívny a jednoduchý, rozhranie na ovládanie programu bola primeraná k mojim účelom v tejto práci.

Pri výrobe testovaných vzoriek boli zistené nastavenia, ktoré mohli byť optimalizované a tak urýchliť, alebo vylepšiť celkový výsledok práce. Mechanické vlastnosti sú oproti hodnotám z tabuliek o niečo menšie, čo mohlo byť spôsobené najmä tým, že tlačiareň nedisponovala takou presnosťou tlače, kvôli čomu mohli vzniknúť chyby vo vytlačených objektoch. Ďalej som zistil, že nastavené rozlíšenie tlače ako ovplyvňuje pevnosť, ťažnosť a modul pružnosti v ťahu. Vyššie hodnoty šírky jednej vrstvy ukazujú lepšiu mechanickú odolnosť a väčšie možné namáhanie vonkajšími silami. Zo zistených výsledkov môžeme povedať, že pri optimálnych nastaveniach procesu tlače môžu byť dané materiály využité v oblasti elektrotechniky, a to najmä pri výrobe izolantov a plastových súčiastok elektronických prvkov.

Termomechanická analýza materiálov potvrdila, že PLA je viac citlivý materiál na teplotu tlače a že ASA je z tohto hľadiska výhodnejší materiál pre použitie. Vysoká nezávislosť termomechanických vlastností na teplote tlače poukazuje aj na širšie možné využitie v elektrotechnike. Deformácia vzoriek bola razantne nižšia pri rovnakých teplotách ako u PLA. To tiež vidíme z teploty skleneného prechodu, ktorá je v prípade materiálu PLA oveľa nižšia, než u ASA. Na druhej strane PLA mala celkové predĺženie nižšie pri rovnakých teplotách, ako ASA. Namerané hodnoty koeficientu tepelnej rozťažnosti v rámci chyby odpovedajú teoretickým predpokladom a tabulkovým hodnotám [10].

Myslím si, že táto práca dobre poukazuje na skutočnosť, aký veľký vplyv môže mať nastavenie výrobného procesu na výsledný materiál. Podobne aj na to, že pre ďalší vývoj týchto materiálov a výroby sú takéto experimenty neoddeliteľnou časťou.

## Literatúra:

- [1] B. Redwood, F. Schöffner, a B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D HUBS, 2017.
- [2] “Prusa3D - 3D Printers from Josef Prusa”, *Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša*. [Online]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/>. [Cit: 03-máj-2019].
- [3] hguemri, “ProMaker P1000”, *Prodways EN*. [Online]. Dostupné z: <https://www.prodways.com/en/industrial-3D-printers/promaker-p1000/>. [Cit: 03-máj-2019].
- [4] U. F. Kocks, C. N. Tomé, H.-R. Wenk, A. J. Beaudoin, a H. Mecking, *Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties*, 1. paperback ed. (with corr.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000.
- [5] J. Lunt, “Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers”, *Polym. Degrad. Stab.*, roč. 59, č. 1–3, s. 145–152, jan. 1998.
- [6] “Industrial Production of High Molecular Weight Poly(Lactic Acid) - Poly(Lactic Acid) - Wiley Online Library”. [Online]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470649848.ch3>. [Cit: 25-apr-2019].
- [7] A. Södergård a M. Stolt, “Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition”, *Prog. Polym. Sci.*, roč. 27, č. 6, s. 1123–1163, júl. 2002.
- [8] J. C. Middleton a A. J. Tipton, “Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices”, *Biomaterials*, roč. 21, č. 23, s. 2335–2346, dec. 2000.
- [9] J. Scheirs a D. Priddy, Ed., *Modern styrenic polymers: polystyrenes and styrenic copolymers*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley, 2003.
- [10] “Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Plastic | UL Prospector”. [Online]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/generics/8/acrylonitrile-styrene-acrylate-asa>. [Cit: 25-apr-2019].
- [11] K. E. Paul, W. S. Wong, S. E. Ready, a R. A. Street, “Additive jet printing of polymer thin-film transistors”, *Appl. Phys. Lett.*, roč. 83, č. 10, s. 2070–2072, sep. 2003.
- [12] J. A. Paulsen, M. Renn, K. Christenson, a R. Plourde, “Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology”, v *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings*, Gatlinburg, TN, USA, 2012, s. 1–4.
- [13] M. W. Barclift a C. B. Williams, “Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing”, v *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012, s. 6–8.
- [14] P. Sitthi-Amorn *et al.*, “MultiFab: a machine vision assisted platform for multi-material 3D printing”, *ACM Trans. Graph. TOG*, roč. 34, č. 4, s. 129, 2015.
- [15] P. Veselý, T. Tichý, O. Šefl, a E. Horynová, “Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, roč. 461, s. 012091, 2018.

- [16] E. Kučerová, Západočeská univerzita, a Elektrotechnická fakulta, *Elektrotechnické materiály*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002.
- [17] V. Koblížek, “Mechanické vlastnosti elektrotechnických materiálů”. 2016.
- [18] “Q400 TMA”, *TA Instruments*. [Online]. Dostupné z: <https://www.tainstruments.com/q400/>. [Cit: 25-apr-2019].
- [19] “Glass Transition”. [Online]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macrog/tg.htm>. [Cit: 25-apr-2019].
- [20] W. Greiner, L. Neise, a H. Stöcker, *Thermodynamics and statistical mechanics*. New York: Springer, 1995.
- [21] D20 Committee, “Test Method for Tensile Properties of Plastics”, ASTM International.
- [22] “Trhacka.cz - Trhačka DEFORM 02 - přenosné zkušební deformační zařízení”. [Online]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/text-trhacka-deform-02-prenosne-zkusebni-deformacni-zarizeni>. [Cit: 24-apr-2019].