



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta Elektrotechnická

Technologie aditivní výroby

Additive manufacturing technologies

Bakalářská práce

Autor: **Jindřich Bareš**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Veselý**
Akademický rok: 2019/2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bareš** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **461493**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie aditivní výroby

Název bakalářské práce anglicky:

Additive Manufacturing Technologies

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na tematiku technologie 3D tisku se zaměřením na technologie FFF a SLA, seznamte se s používanými materiály a jejich vlastnostmi. Shrňte výhody a nevýhody a technologie mezi sebou porovnejte.
2. Navrhněte a proveďte experiment pro ověření mechanických a termomechanických vlastností materiálů pro technologie FFF a SLA.
3. Experiment vyhodnoťte a srovnajte jednotlivé technologie na základě výsledků, zhodnoťte využití technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Redwood, F. Schöffler, and B. Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [2] J. K. Fink, 3D Industrial Printing with Polymers, 1st edition. Beverly, USA: Scrivener Publishing LLC, 2019.
- [3] O. Stříteský, J. Průša, and M. Bach, Základy 3D tisku s Josefem Průšou, 1. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- [4] V. Ducháček, Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011.

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: **06.02.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Petr Veselý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

Poděkování:

Děkuji Fakultě Elektrotechnické ČVUT, že mi umožnila získávat vědomosti nejen teoretické ale i praktické. Dále děkuji panu Ing. Veselému za jeho nemalou pomoc s touto prací. Také nesmím opomenout poděkování katedře Elektrotechnologie, která poskytla vybavené laboratoře, děkuji.

Čestné 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 12. srpna 2020

Jindřich Bareš

Název práce:

Technologie aditivní výroby

Autor: Bareš Jindřich

Obor: Aplikovaná Elektrotechnika

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý, České vysoké učení technické v Praze, FEL, Technická 2, Praha 6

Abstrakt: Cílem této práce je porovnat dvě metody 3D tisku. Jednou z nich je Fused Filament Fabrication známou pod zkratkou FFF. Druhou metodou je stereolitografie neboli SLA. Porovnáványmi hledisky jsou výhody a nevýhody jednotlivých metod. Dále jsou porovnávány mechanické vlastnosti vytištěných vzorků, jelikož je úkolem provést mechanické a termomechanické zkoušky materiálu po tisku. Pro metodu FFF se jedná o běžně užívané PLA. Pro metodu SLA se jedná o Azure Blue Tough Resin. Z materiálového hlediska jsou porovnány mechanická pevnost v tahu, tvrdost a teplota skelného přechodu. Na závěr je zhodnocena vhodnost jednotlivých metod pro výrobu v elektrotechnice.

Klíčová slova: Technologie aditivní výroby, 3D tisk, mechanické vlastnosti materiálu, SLA, FDM, PLA, resin, termomechanická analýza

Title:

Additive manufacturing technologies

Author: Bareš Jindřich

Abstract: The aim of this paper is to compare two methods of 3D printing. One of them is Fused Filament Fabrication known as FFF. The second method is stereolithography known as SLA. Compared aspects are the advantages and disadvantages of mentioned methods as well as reliability. Other compared aspects are: the mechanical properties of printed samples. By other words, the aim is to test mechanical and thermomechanical properties of the material after it has been printed. For method FFF, PLA is widely used. And for the method SLA, the Azure Blue Tough Resin is used. For the material, viewpoint tensile strength, toughness, and temperature of glass transition are evaluated. In conclusion, the suitability of use of mentioned methods for manufacture in electrotechnics is evaluated.

Key words: Additive manufacturing technologies, 3D printing, mechanical properties of materials, SLA, FDM, PLA, resin, thermomechanical analysis

Obsah

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 1 | Úvod | 7 |
| 2 | 3D Tisk | 8 |
| 2.1 | Fused Filament Fabrication | 8 |
| 2.1.1 | Vliv teploty na tisk | 9 |
| 2.1.2 | Výplň | 10 |
| 2.1.3 | Podpěry | 11 |
| 2.1.4 | Tisk více materiály | 11 |
| 2.1.5 | Filament | 12 |
| 2.1.6 | Využití | 13 |
| 2.2 | Stereolitografie | 14 |
| 2.2.1 | Základní typy konstrukce | 14 |
| 2.2.2 | Parametry tisku | 15 |
| 2.2.3 | Vlastnosti tisku | 15 |
| 2.2.4 | Využití | 15 |
| 2.3 | Powder Bed Fusion | 15 |
| 2.4 | Material Jetting | 16 |
| 2.5 | Binder Jetting | 17 |
| 2.6 | 3D Modelování | 17 |
| 2.7 | Porovnání FFF a SLA | 18 |
| 2.8 | 3D tisk v elektrotechnice | 19 |
| 3 | Teorie měření | 21 |
| 3.1 | Tvrdość | 21 |
| 3.2 | Zkouška tahem | 22 |
| 3.3 | Termomechanické vlastnosti | 24 |
| 3.3.1 | Teplotní roztažnost | 24 |
| 3.3.2 | Mikrostruktura polymerů | 24 |
| 3.3.3 | Termické analýzy | 25 |
| 3.3.4 | Měření TMA a odečty hodnot | 25 |
| 4 | Návrhy experimentů | 26 |
| 4.1 | Použité tiskárny | 26 |
| 4.1.1 | FFF | 26 |
| 4.1.2 | SLA | 27 |
| 4.2 | Použité materiály | 27 |
| 4.2.1 | PLA | 27 |
| 4.2.2 | Resin | 28 |
| 4.3 | Vzorky | 28 |
| 4.4 | Měření tvrdosti | 31 |
| 4.5 | Zkouška tahem | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.6 | Termomechanická analýza | 37 |
| 5 | Výsledky | 39 |
| 5.1 | Tvrдость | 39 |
| 5.2 | Zkouška tahem | 40 |
| 5.3 | Termomechanická analýza | 45 |
| 6 | Rozšíření teoretických poznatků o výsledky měření | 50 |
| 7 | Závěr | 51 |
| 8 | Použité zkratky | 53 |

1. Úvod

Jsou tři základní technologie výroby mechanických součástek. Je možné materiál odebírat, upravovat jeho tvar a nebo je možné materiál přidávat. Metody odebrání materiálu jsou různé, od ručního obrábění bloku materiálu pomocí dlátek po počítačově řízené soustruhy. Druhou metodou je formování, které spočívá v úpravě tvaru například pomocí lisů nebo odléváním do forem. Relativně novou metodou je aditivní výroba. Ta spočívá v přidávání malého množství materiálu do předem určených míst. Pro představu: inkoustová tiskárna aplikuje inkoust na papír pouze v místech, kde má být nějaký text nebo obrazec. Velmi podobně funguje takzvaný 3D tisk, který tímto postupem přináší mnohé výhody. Například v porovnání s obráběním produkuje 3D tisk velmi málo odpadu. Výhodou proti metodám formování je, že 3D tisk nepotřebuje formy, které mají vysoké požadavky na přesnost, geometrii, použité materiály a tím pádem jsou drahé. Další velkou výhodou 3D tisku je, že tištěné výrobky mají jen málo limitů, co se tvaru týče. Metody, které pro výrobu používají proces obrábění, jsou omezeny nástroji. Nástroj se musí dostat k materiálu, který má odebírat. Formování je pak omezeno formou. Výrobek musí být možné z formy vyjmout. Omezení 3D tisku se pak liší dle technologií, kterých je mnoho a stále se vyvíjejí. Mezi hlavní nevýhody patří dlouhá doba výroby a nehomogenita mechanických vlastností výrobku.

Práce je zaměřena právě na technologie 3D tisku a s nimi spojené pojmy. Konkrétněji jsou popsány tiskárny typu SLA (stereolitografie) a FFF (Fused Filament Fabrication). Tyto tiskárny jsou použity pro tištění vzorků, na kterých jsou prováděna měření. Dále jsou v práci popsána zmíněná měření, konkrétně měření tvrdosti, měření tepelných vlastností a měření pevnosti v tahu, ze kterého jsou zjištěny následující parametry: maximální prodloužení, modul pružnosti a pevnost v tahu.

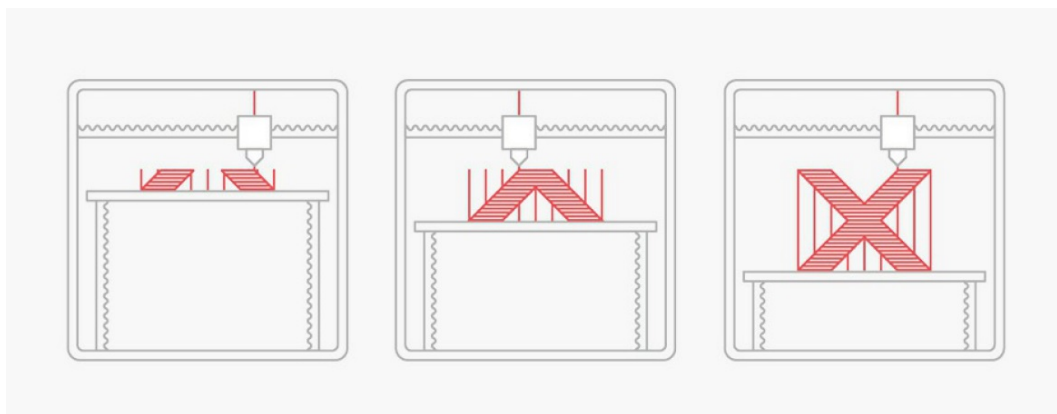
2. 3D Tisk

Termín 3D tisk dříve reprezentoval metodu spočívající v kapání pojiva na podložku pokrytou vrstvou prachu za použití upravené inkoustové tiskárny. Dnes je termín používaný v širším smyslu, uvažuje více metod aditivní výroby.

První patent 3D tisku pochází z roku 1984 od Charlese W. Hulla, který jako první použil UV záření k vytvrzení vrstvy resinu a tím založil pojem stereolitografie. V roce 1991 je vyrobena první FDM (Fused Deposition Modeling) tiskárna. Následující vývoj je obsáhlý. Zde jsou uvedeny pouze některé události týkající se vývoje 3D tisku. V roce 1999 bylo použito 3D tisku pro výrobu podpůrné struktury pro růst orgánu z pacientových buněk. V roce 2002 se pomocí této metody podařilo vypěstovat malou ledvinu. V roce 2005 byl založen projekt RepRap [1]. RepRap je koncept na němž byla založena jedna z prvních low-cost 3D tiskáren schopných tisknout většinu svých vlastních součástí [2]. Dále byla v roce 2008 vytištěna první protéza nohy. V roce 2011 dochází k vytištění automobilu Urbee [1]. V roce 2012 byla založena česká firma Prusa Research, která je dnes jednou z největších firem zaměřených na komerčně dostupné 3D tiskárny používající technologii FDM [3].

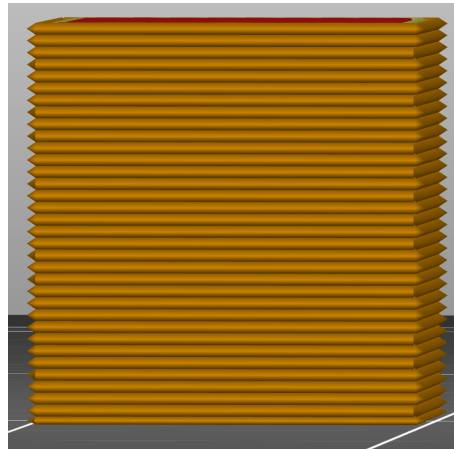
2.1 Fused Filament Fabrication

Funkce tiskárny používající technologii FFF (Fused Filament Fabrication), také známé jako FDM (Fused Deposition Modeling), spočívá v roztavení plastu a jeho následné vytlačení tryskou na tiskovou podložku [4]. Podobně jako klasická inkoustová tiskárna nanáší tiskovou hlavou inkoust na papír, FFF tiskárna nanáší roztavený plast na tiskovou podložku. Na rozdíl od inkoustu však není vrstva naneseného plastu zanedbatelná a může sloužit jako podklad pro další vrstvu. Druhým rozdílem je, že inkoustová tiskárna pracuje po řádcích, ale FFF tiskárna pracuje jako ruka s tužkou, respektive nanáší plast jako souvislý tah. Tah může být přerušen a znovu započat. Po dokončení všech tahů ve vrstvě je tisková hlava zvednuta o tloušťku naneseného plastu a začne nanášet vrstvu další. Výsledkem je, že tisková hlava po vrstvách „maluje“ výsledný objekt.



Obrázek 2.1: Schéma FFF tiskárny s naznačeným postupem tisku. Převzato z [4].

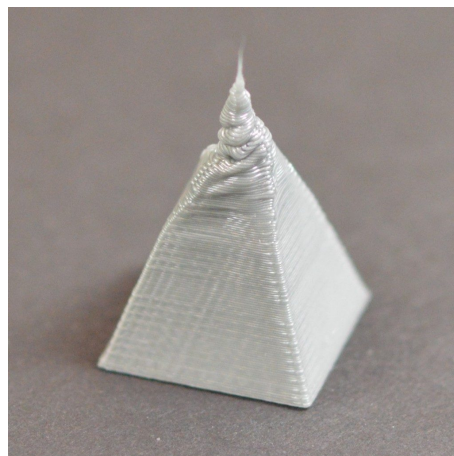
Pokud je rovina tiskové podložky definována osami X, Y a vrstvy jsou na sebe skládány v ose Z, tak má vytištěný objekt lepší mechanické vlastnosti v osách X a Y. Neboli pokud je výtisk natahován ve směru os X a Y, tak jsou vrstvy natahovány najednou. Pokud je výtisk natahován ve směru osy Z, tak jsou od sebe jednotlivé vrstvy odtrhávány. Studie tvrdí, že v této ose výtisk vydrží menší mechanické namáhání [5]. Z toho vyplývá, že tištěné objekty mají v různých osách různé mechanické vlastnosti. S vrstvením je také spojen parametr tloušťky vrstvy, který určuje množství extrudovaného plastu a ve směru osy Z i rozlišení tisku. Běžné tloušťky vrstvy jsou v rozmezí 50 až 350 μm [6].



Obrázek 2.2: Naznačené vrstvení. Vytvořeno v programu Prusa slicer [7].

2.1.1 Vliv teploty na tisk

Dalším významným parametrem je teplota. Parametr teploty se u FFF tiskáren vyskytuje na dvou místech. Jako teplota tiskové hlavy, neboli teplota extrudovaného plastu, a jako teplota tiskové podložky. Teplota extrudovaného plastu je významná, protože udává, jak k sobě během tisku jednotlivé vrstvy přilnou a jak moc se plast rozlévá. Vyšší teplota znamená lepší spojení vrstev. Teplota však nesmí být příliš vysoká nebo dojde k extrudování velmi teplého plastu, který roztaví již vytištěné vrstvy a poškodí již vybudovanou strukturu. Teplota podložky poté udává přilnavost první vrstvy k podložce a teplotní gradient mezi nejnižší vrstvou a vrstvou nejvyšší. Dokonalejší tiskárny mají uzavřený tiskový prostor a jsou schopny regulovat i teplotu okolí výtisku, což umožňuje řízení chladnutí a vede ke snížení vnitřního pnutí.

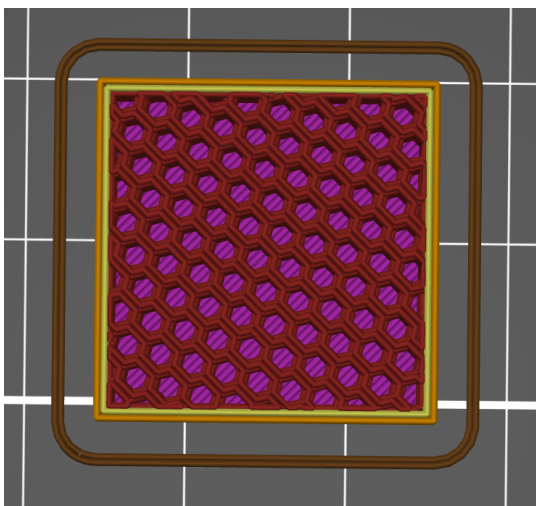


Obrázek 2.3: Příklad tisku s příliš vysokou teplotou. Převzato z [8].

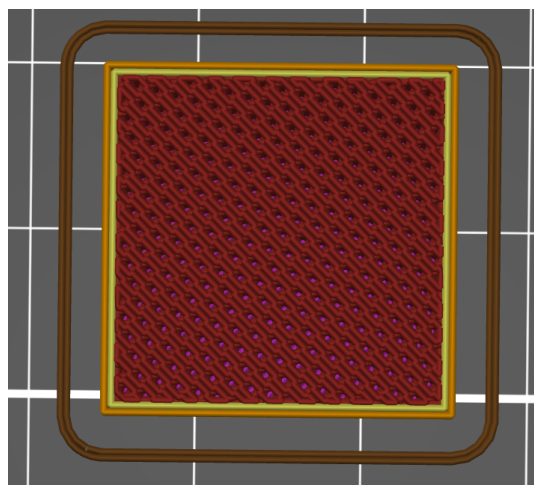
2.1.2 Výplň

Dalším parametrem, který výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti tištěného objektu, je výplň neboli infill. Infill udává míru výplně uvnitř vytisknutého objektu. Vezměme příklad, že je požadováno vytisknout krychli. Zvenčí bude mít krychle plné stěny, ale uvnitř může mít různé struktury. Tvar a hustota vnitřní výplně výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti. Dále vyobrazené obrázky jsou příklady různých nastavení infillu. Jsou vytvořeny pomocí programu Prusa Slicer [7].

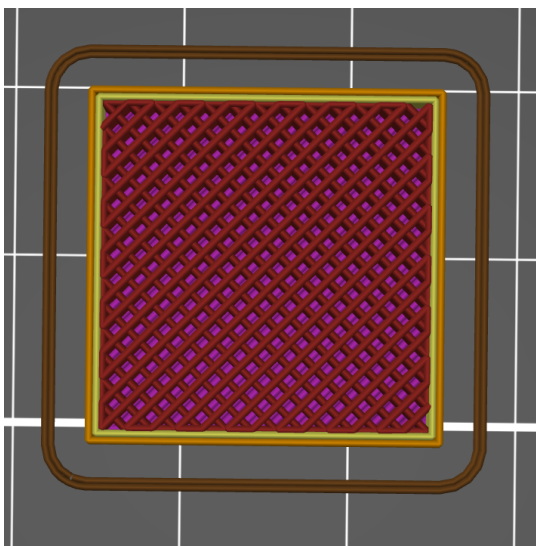
Infill plní funkci dvojí, zaprvé mechanickou pevnost a za druhé umožňuje tisk horní vrstvy. Opět si vezměme jako příklad krychli. Bez vnitřní výplně není materiál horní stěny kostky na co „nalít“ a prostě se propadne.



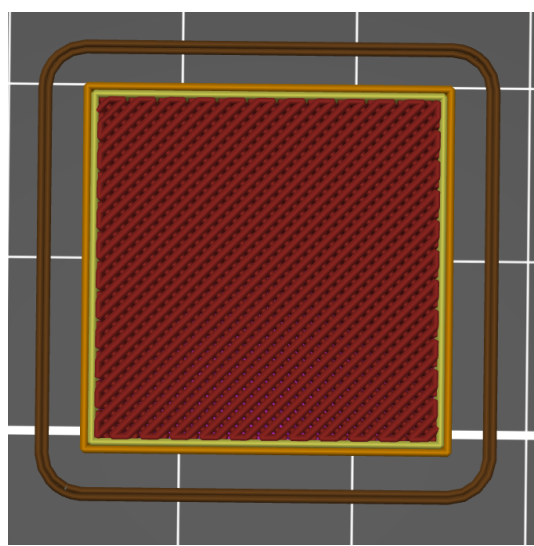
Obrázek 2.4: *Infill nastaven: Honeycomb 40%*



Obrázek 2.5: *Infill nastaven: Honeycomb 70%*



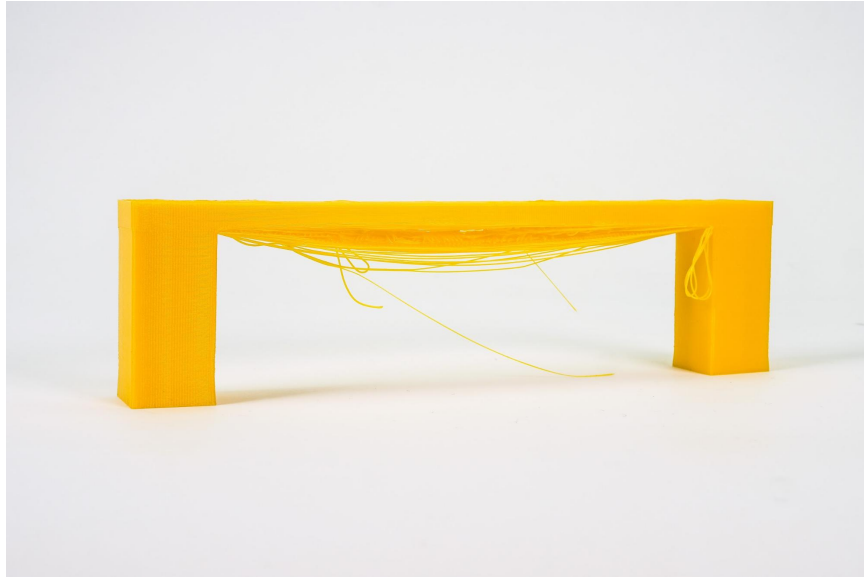
Obrázek 2.6: *Infill nastaven: Rectilinear 40%*



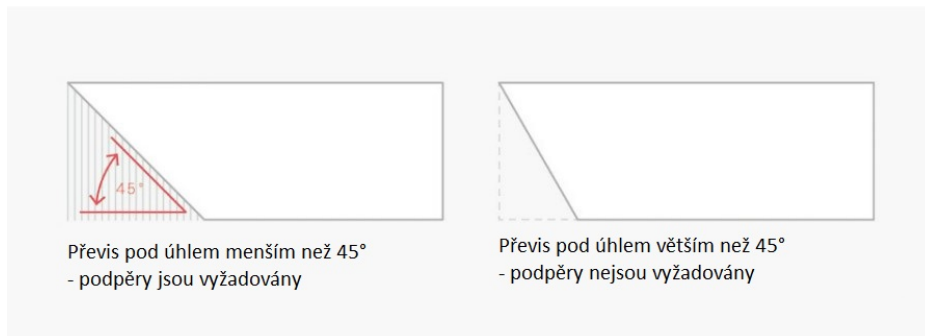
Obrázek 2.7: *Infill nastaven: Rectilinear 70%*

2.1.3 Podpěry

Podobnou úlohu plní podpěrné struktury, které jsou po ukončení tisku odstraněny. Tyto struktury je nezbytné použít, pokud má vytištěný objekt nějaké převisy, které s rovinou tiskové podložky svírají úhel menší než 45° . Pokud podpěry chybí, tak se převis propadne (viz obr. 2.8). Podpěry mají vliv na kvalitu povrchu v místě, kde se podpěra dotýká povrchu tištěného objektu. Je vhodné použít nějakou metodu úpravy povrchu, jako je například broušení [4].



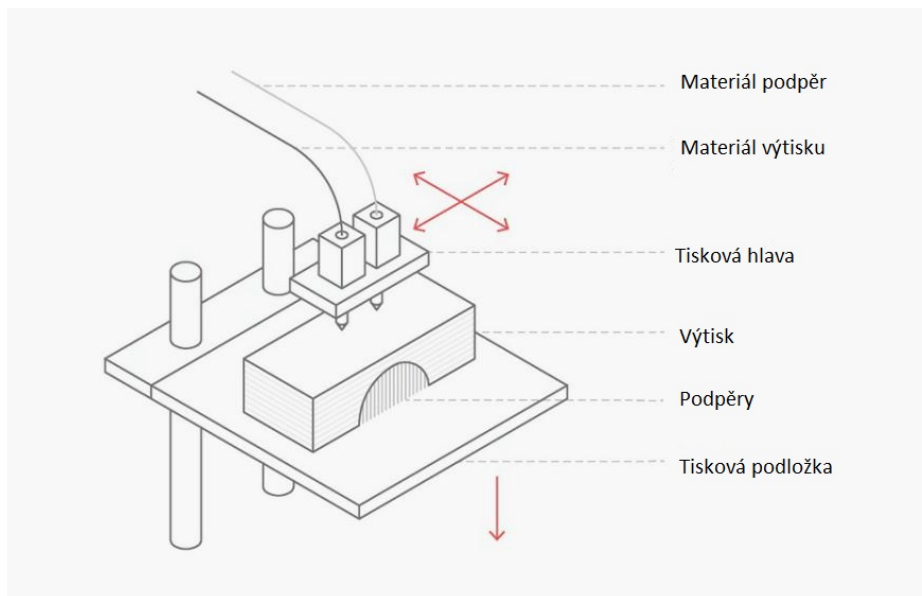
Obrázek 2.8: Příklad propadu plastu při přemostění mezery. Převzato z [9].



Obrázek 2.9: Naznačený požadavek na podpěry [4].

2.1.4 Tisk více materiálů

Pro situace, kde je zapotřebí tisknout pomocí více materiálů, byly vyvinuty tiskárny s více tryskami (extrudery). Takovéto tiskárny jsou dnes využívány pro tisk z hlavního materiálu a podpůrného materiálu. Podpůrný materiál je buďto křehký a při oddělování výtisku z podložky se rozpadne na prach [4], nebo ve vodě rozpustný a je, po odstranění výtisku z tiskové podložky, rozpuštěn [1].



Obrázek 2.10: Schéma tiskárny se dvěma extrudery. Převzato z [4].

2.1.5 Filament

Pro FFF tisk je materiál dodáván ve formě filamentu. Jedná se o strunu s běžným průměrem $1,75\text{mm}$, běžně namotanou na špulku, ze které je během tisku postupně odmotávána. Materiálová rozmanitost je omezena technickými možnostmi tiskárny. Tiskárna musí být schopná materiál nejen roztavit ale také zajistit jeho přiměřené chladnutí. Obecně je rozšířené PLA (kyselina polymléčná), ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), ASA (Akrylonitril styren-akrylát) a PETG (glykolem modifikovaný polyethyltereftalát).

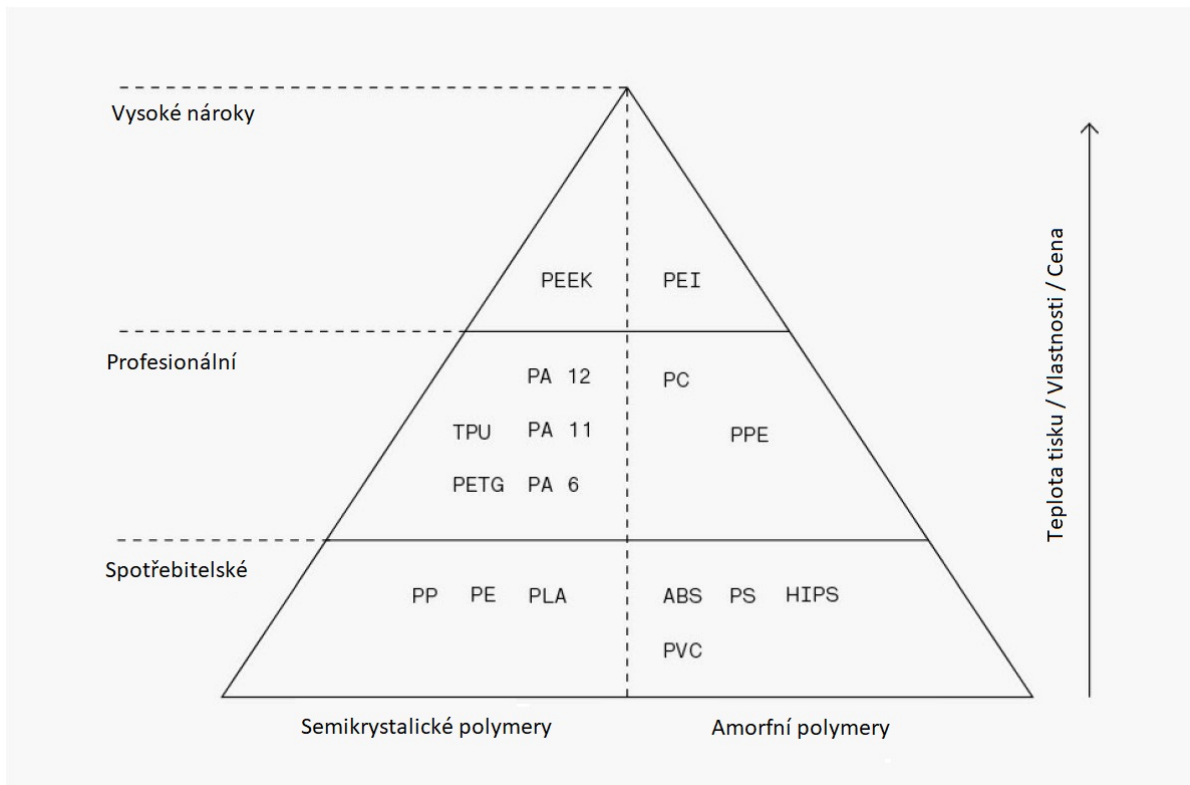
PLA je jedním z nejvýznamnějších biodegradovatelných polymerů. Materiál je vyroben z obnovitelných zdrojů, jakým je například kukuřičný škrob. Samotné PLA je křehké a má nízkou teplotu skelného přechodu (50 až 60°C). Dopad těchto problémů je snižován pomocí příměsí, mezi které patří i změkčovadla. Typickým využitím PLA jsou jednorázové stolovací pomůcky jako jsou kelímky, talíře a krabičky na jídlo. Díky své ekologické odbouratelnosti se používá i na výrobu nákupních tašek [10].

ABS je termoplast, který je možné vzhledem k tepelné odolnosti a mechanickým vlastnostem považovat za low-cost průmyslový materiál. Z ABS se vyrábí například Lego kostičky. Dále nalézá využití v automobilovém průmyslu, elektrotechnice a některé typy ABS i v potravinářském průmyslu [11].

ASA je termoplast, který vyniká svou odolností vůči UV záření, teple a vlhkosti. Také má dobrou chemickou odolnost. Mechanickými vlastnostmi je podobný polymeru ABS. Význačné využití polymeru ASA je v automobilovém průmyslu, kde je využíván pro výrobu krytů zrcátek [12].

PETG je transparentní amorfní termoplast. V komerčním průmyslu je velmi rozšířený. Materiál je chemicky odolný, ale není UV odolný a tedy není vhodný pro dlouhodobé venkovní použití. Materiál je využíván například v rámci balicího průmyslu, kde jsou z něj vyráběny lahve [13].

Výše zmíněné polymery je možné tisknout na komerčně dostupných tiskárnách. Existují i polymery vyžadující tiskárnu s lepší výbavou. Například s výhřevem na vyšší teploty a s dobrou regulací chladnutí výtisku. Takové materiály mají lepší mechanické a termomechanické vlastnosti. Jedná se o průmyslové polymery jako jsou PEI (Polyether Imide) nebo PEEK (Polyether Ether Ketone). Literatura [4] uvádí, že čím výše v pyramidě (viz. obr 2.11) se materiál nachází, tím má lepší mechanické vlastnosti, ale také je náročnější ho zpracovávat.



Obrázek 2.11: Pyramida termoplastů převzatá z publikace *The 3D Printing Handbook* [4].

PEI je také známý jako Ultem 9085. Jedná se o amorfní transparentní polymer, který má dobré tepelné, mechanické a chemické vlastnosti. V porovnání s jinými možnostmi má také nízkou hustotu. Parametry hořlavosti splňují podmínky pro použití v leteckém průmyslu [1], [14].

PEEK je materiál s vysokou chemickou odolností, dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou tepelnou stabilitou. Díky těmto vlastnostem je vhodný pro použití například v raketoplánech [1]. Pro představu, studie porovnávající vlastnosti PEEK v závislosti na tiskových parametrech (úhel natočení tisku vůči ose vzorku a tloušťka vrstvy) udává střední hodnotu pevnosti v tahu $56,6 \text{ MPa}$ [15].

Další větví vývoje materiálů jsou příměsi, které jsou do filamentu přimíchány při jeho výrobě. Takové materiály jsou používány jako materiály s lepší tepelnou odolností, lepší mechanickou odolností nebo i jako materiály se zajímavým vzhledem. Jsou k dispozici filamenty s příměsí bronzu, mědi, korku, uhlíkových a dřevěných vláken [16].

Dále jsou vyvíjeny materiály vodou rozpustné [16]. Ty jsou používány při tisku více tiskovými hlavami, pro tisk snadno odstranitelných podpěr [1]. Nově se začínají objevovat metody, které spočívají v sintrování vytištěného objektu filamentem s vysokým obsahem kovové příměsi. Sintrováním je odstraněn plast a kov je spečen do jednoho kusu. Vznikají tak výtisky, které jsou rozměrově menší než původní výtisk, ale mají lepší mechanické vlastnosti [4].

2.1.6 Využití

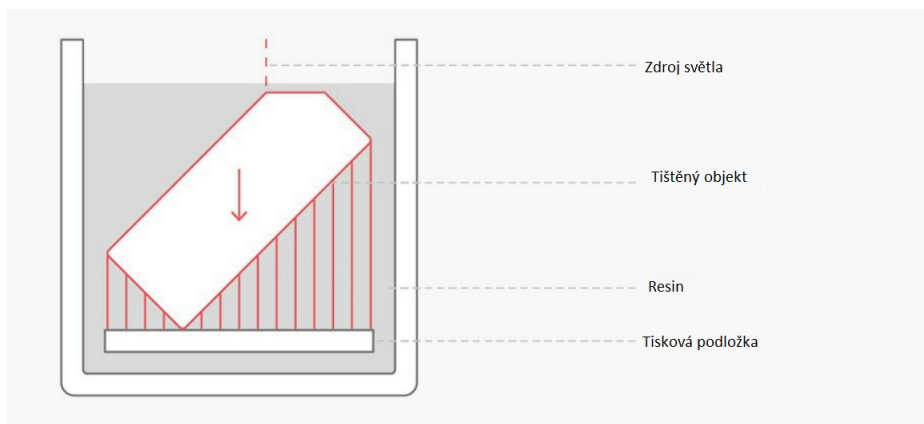
Technologie FFF je rozšířená mezi domácími tiskaři. Mimo jiné nalézá využití v průmyslu, například během procesu prototypování. Je relativně snadné vytisknout součástku pomocí technologie FFF, vyzkoušet její rozměry a případně upravit model a vytisknout jej znovu. Poté co je jisté, že prototyp součástky má správnou formu, je možné investovat do vhodnější metody výroby, jakou je například formování. Technologie FFF se používá pro výrobu malých sérií a tisk nedostupných dílů [4]. Dnes jsou prováděny experimenty, kdy jsou tištěny funkční elektrické součástky [17].

2.2 Stereolitografie

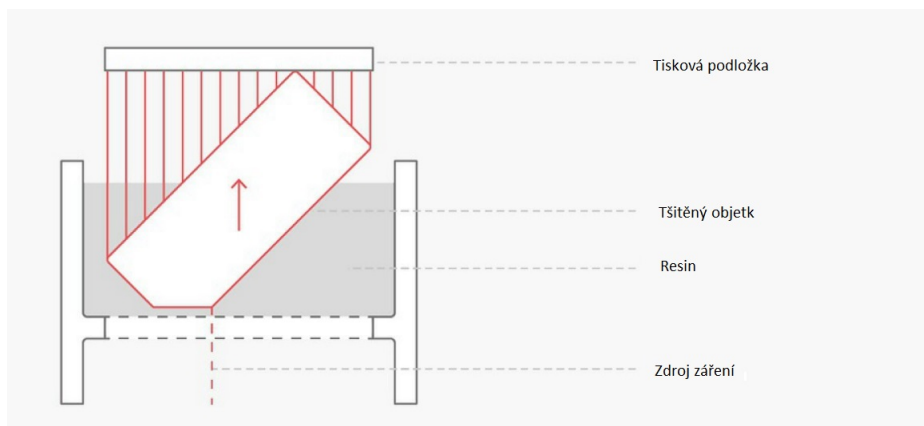
Stereolitografie je metoda, která pro výrobu používá resin (pryskyřici) citlivý na UV záření. Resin je tím pádem pomocí UV záření vytvrzován. Resin je obvykle viskózní kapalina. Většinou se jedná o akrylové a epoxidové resiny. Resin obsahuje především pryskyřici a fotoiniciátory. Fotoiniciátor je chemikálie, která se absorpcí světla rozpadne na radikály, které inicializují proces polymerizace resinu [1].

2.2.1 Základní typy konstrukce

UV citlivý resin je nalitý ve vaně, do které je ponořena tisková podložka. Vytvrzování probíhá pomocí zdroje UV záření. Dle literatury jsou dvě konfigurace a to tzv. „top-down“ a „bottom-up“ [4].



Obrázek 2.12: Schéma top-down tiskárny s naznačeným postupem tisku [4].

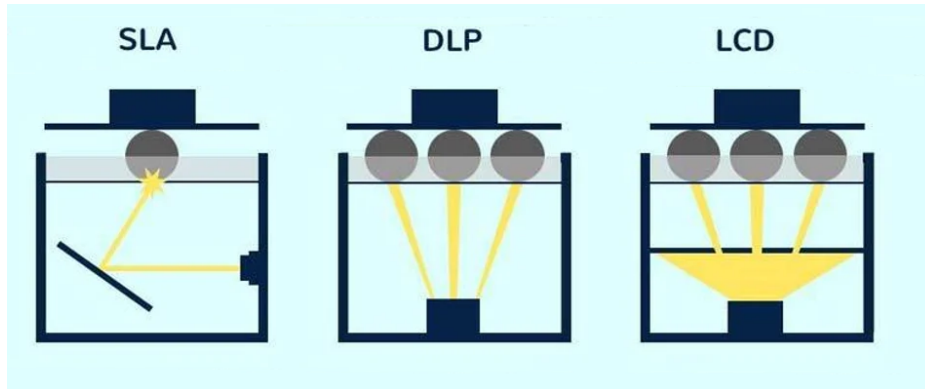


Obrázek 2.13: Schéma bottom-up tiskárny s naznačeným postupem tisku [4].

První ze zmíněných, jak již název napovídá, tiskne odshora. Tisková podložka se s přibývajícimi vrstvami do resinu potápí. Tisková hlava s laserovým paprskem je nad vanou s resinem. Je tedy nutné zajistit tenkou a konzistentní vrstvu resinu nad ponořeným výtiskem. To znamená, že není možné použít vysoce viskózní resiny a často je potřeba přidat krok roztírání resinu na výtisk [4], [1].

Druhá zmíněná, „bottom-up“, tiskne odspodu. Tisková platforma začíná ponořená ode dna zvednutá o tloušťku jedné vrstvy. S přibývajícimi vrstvami se tisková podložka zvedá, vždy právě o tloušťku jedné vrstvy. Zdroj UV záření je umístěn pod vanou. Je nezbytné, aby dno vany propouštělo resin vytvrzující záření. Výhodou později zmíněné metody je, že je možné použít viskóznější resiny a není potřeba roztírání. Nevýhodou je konstrukční složitost vany a materiálové požadavky na její dno [4], [1].

K vytvrzování je možné použít různé zdroje UV záření. V obrázcích 2.12 a 2.13 je naznačen laserový paprsek, ale je možné použít výkonnou LED s LCD displejem jako maskou nebo DLP (Digital Light Processing) s projektorem. Technologie používající LED a display se nazývá MSLA (Masked stereolithography) a spočívá v osvětlení celé vrstvy najednou. Objekt je tvořen blokováním záření pomocí masky (display) v místech, kde není žádoucí resin vytvrdit. Technologie DLP používá projektor, který osvětluje v celé vrstvě pouze místa, ve kterých má být resin vytvrzen.



Obrázek 2.14: Ilustrace zobrazující rozdíly mezi technologiemi používajícími laser, DLP a LCD [18].

2.2.2 Parametry tisku

Tiskárna pracuje s různými tiskovými parametry. Například tloušťka vrstvy nebo doba osvitů. Běžné tloušťky vrstvy jsou v rozmezí 25 až 100 μm . Doba osvitů je závislá na resinu, zdroj udává od 6 s [19].

2.2.3 Vlastnosti tisku

Většina resinů má tendenci se během vytvrzování o několik mikrometrů roztáhnout. To může vést k deformaci výtisku nebo separaci vrstev. Tyto jevy se vyskytují pouze u velkých ploch. Dopad lze tedy odstranit nebo alespoň snížit, zmenšením plochy během designování součástky. Další možností je natočit výtisk vůči rovině podložky tak, aby plocha, která je vytvrzována najednou, byla menší [20].

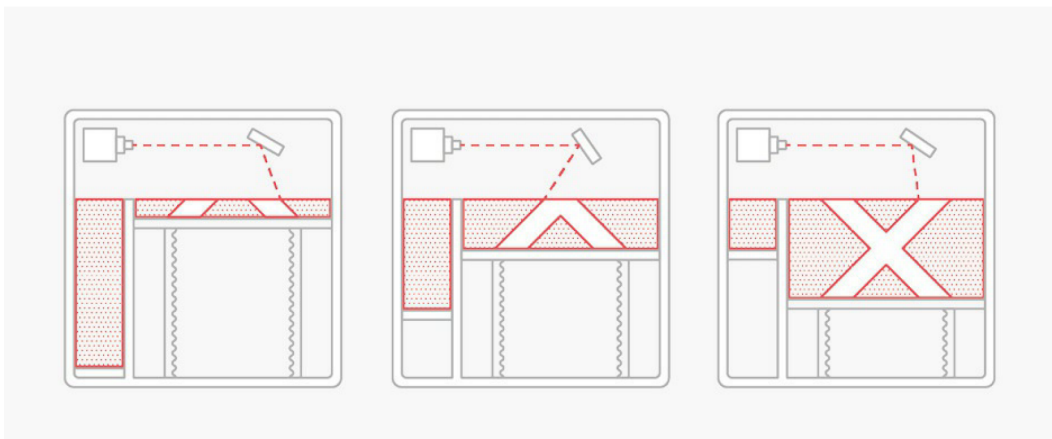
2.2.4 Využití

Technologie SLA je, podobně jako technologie FFF, používána pro tisk prototypů. Výhodou této technologie nad technologií FFF je kvalita povrchu. Výtisky z tiskárny používající technologii SLA jsou rovnou hladké (nevyžadují žádné další zpracování). Tato vlastnost společně s tím, že výtisky mají velmi dobré detaily, vede k použití technologie SLA v klenotnictví. V tomto případě se pomocí technologie SLA vyrábí model, který je pak zaformován pro účely odlévání. Dalším využitím nalézá technologie SLA v zubařských ordinacích. Zde se mimo jiné využívá pro tištění korunek a můstků [4]. V souvislosti s náhradami je technologie SLA používána i pro tisk naslouchátek [21].

2.3 Powder Bed Fusion

Metoda Powder Bed Fusion spočívá v roztavení plastového nebo kovového prachu nějakým zdrojem tepla. Nejvýznamnějším představitelem z této skupiny technologií je SLS (Selective Laser Sintering), která k jako zdroj tepla využívá laseru. Tisk probíhá přibližně následovně. Na podložku je nanášena vrstva prachových částic, které jsou předehřaty na teplotu těsně pod bodem tání [4]. Následně jsou určena místa zahřátá laserem a prachové částice jsou tím spečeny v tuhý objekt. Následně je nanášena další vrstva předehřátého prachu a proces je opakován [1]. Výhoda této metody je, že funkci podpěr plní nespečený

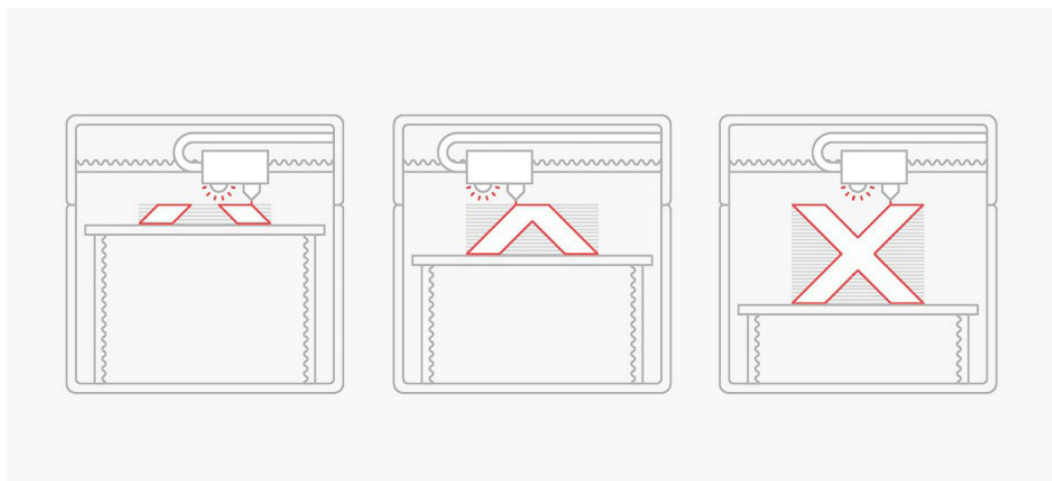
prach. Tím pádem nejsou zapotřebí podpěry, které zanechávají stopy na povrchu výtisku. Nevýhodou je vysoká spotřeba prachu. V praxi je možné recyklovat jen polovinu toho, co zbude po sintrování objektu. Proto jsou nádoby plněny co možná nejvíce objekty k vytištění. Druhou relativně velkou nevýhodou je deformace. Sintrované objekty se krouží vlivem rozdílu teplot mezi vrstvami podkladovými a vrstvami právě sintrovanými. Nová vrstva je zpočátku teplá a jak chladne, tak se smršťuje a tahá tím podkladovou vrstvu nahoru [4].



Obrázek 2.15: Schéma SLS tiskárny s naznačeným postupem tisku [4].

2.4 Material Jetting

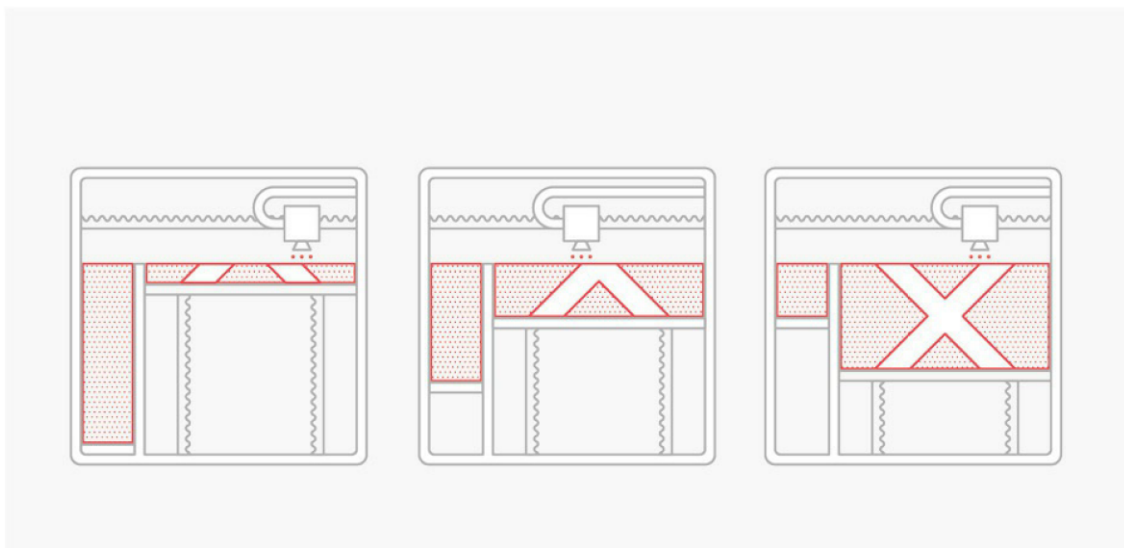
Metoda Material Jetting je inkoustovému tisku podobnější než metoda FFF. Od metody FFF se liší formou nanášeného materiálu. V práci bylo již konstatováno, že metoda FFF nanáší roztavený plast. Metoda Material Jetting nanáší jednotlivé vrstvy pomocí kapek fotopolymeru (nebo roztaveného plastu) [1]. Fotopolymer je vytvrzován UV zářením. Výhodou této technologie je, že je možné kapky kapat v jedné přímce. Není tedy nutné nanášet obrazce jednotlivých vrstev bod po bodu a je tím ušetřen čas [4]. Tisk pomocí technologie Material Jetting je tedy rychlejší než tisk pomocí technologie FFF. Druhou výhodou této technologie je, že je možné během tisku měnit použité materiály. Toho je možné využít například pro tisk podpěr ze snadno odstranitelného materiálu, a tím usnadnit další zpracování a zlepšit povrchovou úpravu vytištěného objektu [4].



Obrázek 2.16: Schéma tiskárny Material Jetting s naznačeným postupem tisku. Převzato z [4].

2.5 Binder Jetting

Metoda Binder Jetting kombinuje přístup metod SLS a Material Jetting. Binder jetting spočívá v odkapávání pojidla do prachu tiskového materiálu [1]. Přibližný postup je následující: Nanesení prachu na tiskovou podložku v tenké vrstvě, nakapání pojidla do míst, kde je žádoucí prach vytvrdit a nanesení další vrstvy prachu. Tento proces je opakován, dokud není dosaženo požadované výšky výtisku. Výhodou této metody je, že nejsou zapotřebí podpěry a nedochází lokálnímu ohřevu prachu, takže riziko deformace výtisku vlivem tepelné roztažnosti je eliminováno [4]. Také je možné do kapek pojidla přidávat barvivo a tím dosáhnout plně barevného výtisku [4]. Objekty vytištěné pomocí metody Binder Jetting však mají horší mechanické vlastnosti, než kdyby byly vytvořené pomocí jiné metody výroby [4].



Obrázek 2.17: Schéma tiskárny Binder Jetting s naznačeným postupem tisku. Převzato z [4].

2.6 3D Modelování

3D tiskárna, stejně jako inkoustová tiskárna, potřebuje nějaký datový vstup. Toho je dnes dosaženo pomocí dvou typů softwaru.

První z nich je CAD neboli Computer Aided Design je obecně počítačový program navržený pro tvorbu technických výkresů [22]. Dnes již nahradil ruční kreslení a usnadnil práci architektům, inženýrům a designérům. Programy CAD obsahují rozsáhlé nástroje. Například nástroje pro tvorbu ozubených kol, hřídelů a různých struktur [23]. Modely jsou v prostředí navrhovány třírozměrné.

Pro tuto práci byl použit program Fusion 360. Program je pro studenty a učitele volně dostupný na internetových stránkách výrobce [23]. Jelikož měřené vzorky mají všechny jednoduchou geometrii, tak je práce v tomto programu velmi snadná. Stačí si navrhnout dvojrozměrný průmět předmětu do jedné roviny a pak zvolit možnost „extrude“. Ta dá dvojrozměrnému návrhu rozměr třetí o zadaném parametru (výšce). Například vzorek pro měření tvrdosti je navržen jako kruh v rovině x, y o průměru 30 mm a vytažen v ose z o 4 mm . Výsledným modelem je pak válec s dříve zmíněnými rozměry. V tomto programu jsou, s výjimkou vzorků na měření pevnosti v tahu, navrženy všechny měřené vzorky v této práci.

Druhým z programů je Slicer. Ten slouží jako převodník pro konverzi třírozměrného CAD modelu do příkazů pro 3D tiskárnu [1]. Na vstupu jsou parametry tiskárny, nastavení tisku a 3D model věci, kterou je žádáno vytisknout. V nastavení tisku lze dle typu tiskárny nastavit různé parametry. Mezi ně patří rychlost tisku, množství extrudovaného filamentu, tloušťka vrstvy, teplota tisku, výplň nebo také délka expozice resinu UV záření [7]. Nastavitelných parametrů je mnoho a není vhodné se zde zabývat všemi. V této práci zkoumané parametry jsou především teplota tisku a délka osvětlení resinu.

Slicer převede 3D model za použití nastavených parametrů do souboru instrukcí tiskárny, v tomto případě do takzvaného Gcode. Tento soubor tiskárně udává, jak má hýbat jednotlivými krokovými motory, jak má nastavit teploty a podobné povely [4].

Slicerů je mnoho, dokonce je možné nainstalovat slicer add-in do programu Fusion 360 [24]. Pro účely této práce byl z důvodů pohodlí použit program Prusa Slicer. Poskytuje snazší orientaci v nastavení, neboť má již předdefinované 3D tiskárny od firmy Prusa Research s.r.o. které byly použity pro výrobu vzorků.

2.7 Porovnání FFF a SLA

V předchozích částech práce byly uvedeny různé technologie 3D tisku. Podrobněji byly probrány technologie FFF a SLA, na které je tato práce zaměřena. V této sekci budou jejich vlastnosti shrnuty a porovnány. Porovnání je provedeno ve dvou částech. První je část textem popisujícím vlastnosti jednotlivých technologií, které se nedají mezi sebou porovnat formou lepší nebo horší. Druhá část je ve formě tabulky, ve které technologie porovnávám mezi sebou.

Obě technologie jsou veřejnosti dostupné a je možné na nich tvořit různé předměty. Technologie používají různé materiály a různé metody pro stavění třírozměrných objektů. Obě technologie však objekt „nakrájí“ a tisknou po vrstvách. Technologie FFF pro tisk používá filament, kdežto technologie SLA používá resin. Filament je polymer, který je pro tisk nutné ohřát nad bod tání, extrudovat ho a následně ochladit. Tím mohou být do materiálu zanesena pnutí, která mohou ovlivnit tvar a rozměry výtisku [25]. Resin je viskózní kapalina a je pro účely 3D tisk vytvrzovaný světlem. Zdrojem světla je výkonná LED, která resin osvětluje skrze stínítko [4]. Tato technologie materiál neohřívá, ale během vytvrzování dochází ke změně objemu resinu. Tím do výtisku mohou být zanesena pnutí [20].

| | FDM (FFF) | SLA |
|---|--|---|
| Tisknuté materiály | + Výběr z velké škály | - Výběr je značně omezený |
| Kvalita povrchu | - Horší | + Lepší |
| Vnitřní struktura | + Téměř libovolná (možné i duté) | - Lze vyrobit ale jen velmi náročně (většinou plné) |
| Mechanické vlastnosti | + Závislé na použitém materiálu | - Obecně horší |
| Adheze vrstev | - Problematická | + Dobrá |
| Teplotní stabilita | - Stabilní do teploty skelného přechodu | + Po vytvrzení je stabilní |
| Rozměrová stabilita | + V rozmezí teplot uvedených výrobcem - stabilní | + Stabilní |
| Pořizovací cena | + Nižší | - Vyšší |
| Post processing | - Často je vyžadována povrchová úprava | - Pro většinu aplikací není nutné |
| Materiálová různorodost během jednoho tisku | + Možné použít více materiálů | - Možné použít pouze jeden resin |
| Šetrnost tištěného materiálu k přírodě | + Materiály mohou být ekologicky odbouratelné | - Resin je toxický |
| Rychlost tisku | - Pomalejší | + Rychlejší |
| Tloušťka vrstvy | - 50 až 350 μm | + 25 až 100 μm |
| Spolehlivost tisku | - Problémy s adhezí první vrstvy | + Během tisku spolehlivé |

Tabulka 2.1: Tabulka porovnávající technologie FFF a SLA. Nové informace jsou čerpané ze zdrojů [4], [26], [27] a [28].

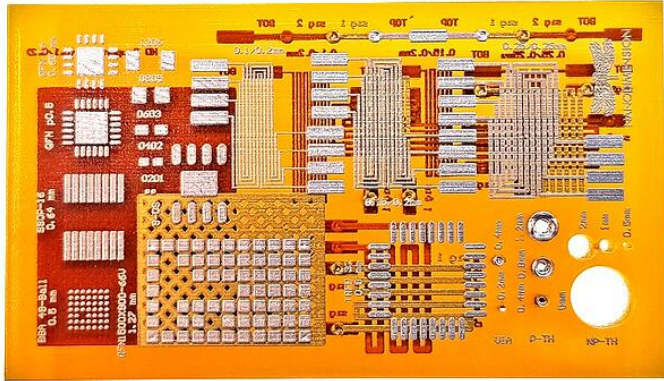
Z tabulky 2.1 vyplývá že každá z technologií má své klady a zápory. Pro různá použití jsou vhodné různé technologie. Například na prototypování přesných funkčních částí se více hodí technologie SLA, neboť její výtisky mají lepší rozměrovou přesnost a povrch je pro většinu potřeb dostatečné kvality rovnou z tiskárny (respektive po vytvrzení). Na druhou stranu technologie FFF umožňuje tisk předmětů vyžadujících více materiálů.

2.8 3D tisk v elektrotechnice

3D tisk má dnes široké využití. Pokud potřebujete vyrobit součástku pro svůj koníček nebo výzkum a není k dispozici, tak stačí její 3D model, 3D tiskárna, pár hodin času na tisk a máte unikátní díl, který splňuje vaše požadavky. Tato myšlenka zní hezky, ale skutečnost není tak příznivá. Mnohdy mají součástky požadavky na mechanické namáhání vyšší, než které je tisknutelný materiál schopný poskytnout. Takovým příkladem jsou ozubená kola v dálkově řízených modelech vrtulníků. Někdy nelze použít rovnou 3D tištěnou součástku. Co ale lze, je využít jiné vlastnosti 3D tisku a to, že je v porovnání s jinými metodami výroby levný. 3D tisk je tedy využíván jako metoda na výrobu prototypů. Poté co se ujistíme že má součástka správný tvar a rozměry, je možné ji použít jako šablonu pro jinou metodu výroby.

Takovéto použití je samozřejmě možné i v elektrotechnice, ale zajímavější jsou vlastnosti elektrické. Veřejnosti dostupné tiskárny jsou schopné tisknout plasty PLA, ABS a PET. Na první pohled se sice nejedná o pro elektrotechniku zajímavé materiály, ale můžeme zkoumat jejich elektrické vlastnosti pro použití jako izolanty. Experimenty provedené na Fakultě Elektrotechnické ČVUT v Praze ukazují, že elektrické vlastnosti jsou závislé na parametrech tisku. Konkrétním zkoumaným parametrem byla výška vrstvy. Výsledky ukazují, že hodnoty permitivity PLA s rostoucí tloušťkou vrstvy klesají. V experimentu použitá rozlišení jsou v rozmezí 50 až 200 μm při testovací frekvenci 100 Hz . Výsledné permitivity jsou v rozmezí 1,92 až 2,36. Dielektrická pevnost byla měřena při frekvenci 50 Hz a hodnoty s rostoucí tloušťkou vrstvy klesají. Hodnoty jsou v rozmezí 25,8 až 34,1 kV/mm . Z těchto hodnot tedy můžeme soudit, že materiál PLA je vhodný pro použití v nízkonapěťové elektrotechnice [29].

Jiné použití 3D tisku je tisk desek plošných spojů (PCB). Desky plošných spojů dnes vyžadují vysokou hustotu osazení součástkami, což vede k problematice jejich vodivého spojení. Řešením je vyrobit desku vícevrstvou. Dnešní metody výroby jsou sledem mnoha kroků a proces je tím pádem zdlouhavý. Zde, jako konkurence, vstupuje 3D tisk. Pomocí tiskárny schopné tisknout dva materiály najednou jsme schopni vyrobit desku plošného spoje. Jeden materiál obsahuje částice stříbra a tvoří vodivé cesty. Druhý materiál je dielektrický. Pomocí této technologie je také možné tisknout funkční součástky jako jsou například senzory [30].

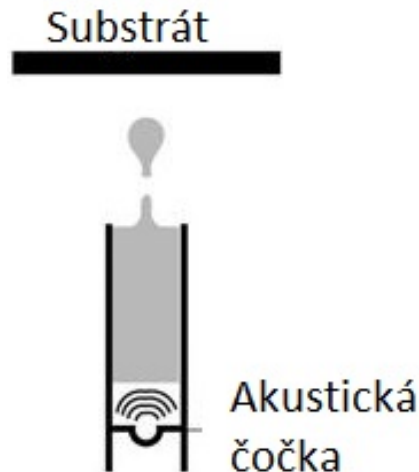


Obrázek 2.18: *Tištěná čtyřvrstvá deska plošného spoje. Převzato z [30]*



Obrázek 2.19: *Tištěný senzor dotyku. Převzato z [31]*

Další možný přístup k využití 3D tisku v elektrotechnice je rovnou tisknout funkční polovodičové součástky. Tohoto principu využívají například organické tenkovrstvé tranzistory (organic thin-film transistors - OTFT). Jedná se o tranzistory tisknuté z organického polymeru, v roztoku na substrát z dopovaného křemíku, pomocí modifikované tiskárny. Modifikace spočívá v nahrazení trysky vysokofrekvenčním akustickým zařízením, které zvukovou vlnou překoná povrchové pnutí kapaliny a tím odtrhne kapku [32].



Obrázek 2.20: *Schéma akustického tisku. Převzato z [33].*

3. Teorie měření

V minulé kapitole byly přiblíženy metody tisku. V této kapitole budou přiblíženy materiálové vlastnosti, kterými se tato práce zabývá a jejich měření. Konkrétně se jedná o tvrdost materiálu, která je měřena pomocí tvrdoměru. Dále jsou zmíněny pevnost v tahu, maximální relativní prodloužení a modul pružnosti neboli Youngův modul. Tyto tři vlastnosti jsou měřeny pomocí tahové zkoušky na trhačce. Jako poslední je měřena teplota skelného přechodu, lineární teplotní roztažnost a rozměrová stabilita. Tyto materiálové vlastnosti jsou měřeny pomocí termomechanické analýzy.

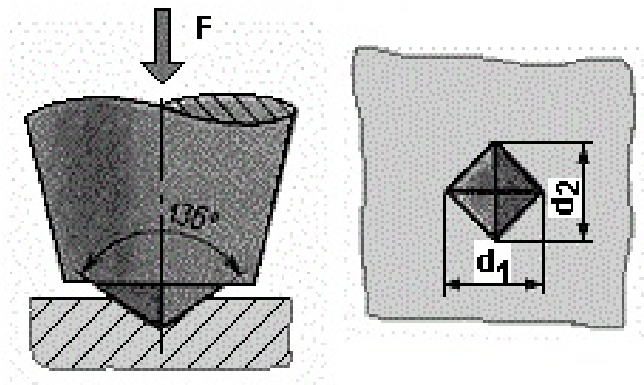
3.1 Tvrdost

Tvrdost je z definice odolnost materiálu proti vniku cizího tělesa. Historicky se používaly metody poškrábání povrchu. Tyto metody však byly nepřesné, protože v nich vystupovalo příliš mnoho proměnných. Dnes se měření tvrdosti posunulo směrem ke statickým zkouškám, které redukuje počet proměnných na zvládnutelné množství [34]. Používané metody jsou například Brinellova, Rockwellova a nebo Vickersova.

Měření tvrdosti probíhá pomocí tvrdoměrů. Tvrdoměry dnes všechny fungují na principu otisku hrotu definovaného geometrického tvaru do povrchu měřeného tělesa a následného zhodnocení otisku. Dle hodnocení otisku se poté dle použité metody určí tvrdost tělesa. Protože jsou různé metody měření, je nezbytné uvést, ke které metodě je číslo vztaženo. Například měření dle Vickerse je značeno $HV = [kgf/mm^2]$ [35].

V této práci je měření tvrdosti provedeno dle Vickerse. Toto měření je určené především pro kovy. Pro měření tvrdosti polymerů je určený jiný hrot. Ten ale v době měření nebyl k dispozici, a tak byl použit hrot pro měření dle Vickerse. Byl použit standard ASTM E92.

Měření je založené na vniku čtyřbokého diamantového jehlanu do měřeného tělesa. Na povrch testovaného tělesa je pomocí jehlanu postupně aplikována síla a jehlan je do tělesa otištěn. Tvrdost je pak určena jako plocha otisku v měřeném povrchu. Vrcholový úhel mezi stěnami jehlanu je 136° . Síla se pro měření různých materiálů může lišit. Podstatná část experimentu je vyobrazena na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Měření tvrdosti dle Vickerse [36].

Tvrдость je pak vypočtena z síly použité pro vytvoření otisku a jeho úhlopříček [35].

$$HV = \frac{2F}{d^2} \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right) \quad (3.1)$$

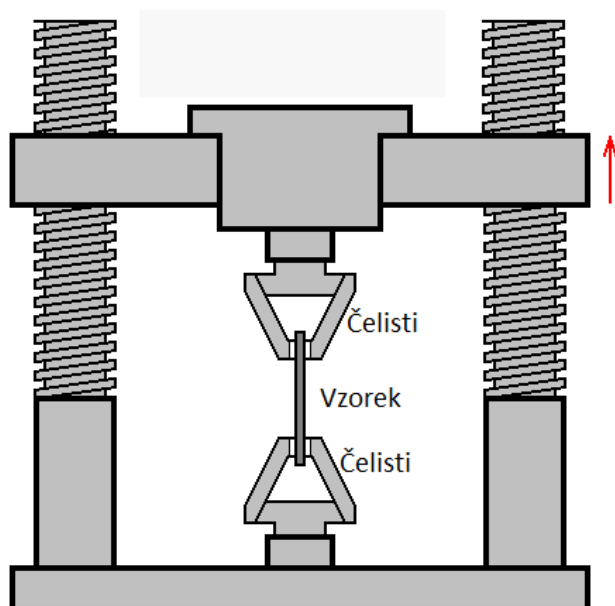
- ◇ $HV [kgf/mm^2]$ - Tvrдость dle vickersovy zkoušky.
- ◇ $F [kgf]$ - Síla působící na hrot.
- ◇ $d [mm]$ - Průměr úhlopříček obtisku.
- ◇ 136° - Úhel, který svírají stěny hrotu.

Je důležité, aby byl otisk dobře měřitelný, tj. vizuálně zřetelný. Jehlan by měl dosedat kolmo na povrch měřeného tělesa. Pokud tomu tak není a jehlan dosedá pod jiným úhlem, tak otisk není čtverec, ale obrazec s různými úhlopříčkami. Pak není možné správně určit plochu otisku a nelze dopočítat hodnotu tvrlosti. Další chyby mohou být způsobeny nerovností povrchu měřeného tělesa. Pro hodnotu délky úhlopříčky se používá aritmetický průměr délek [34].

3.2 Zkouška tahem

Tahové zkoušky se provádějí na přístroji zvaném „trhačka“ [37]. Trhačka je přístroj, který je schopen na vzorek působit silou a měřit jak, v závislosti na působící síle, mění svou délku. Schéma trhačky je vyobrazeno na obrázku 3.2. Vzorek je upnut do čelistí. Horní čelistí je pomocí šroubového mechanismu pohybováno směrem vzhůru. Sílu působící na vzorek měří tenzometr. Ze síly a rozměrů vzorku je možné dopočítat následující veličiny [37]:

- ◇ Pevnost v tahu
- ◇ Maximální relativní prodloužení
- ◇ Modul pružnosti



Obrázek 3.2: Schéma trhačky [38].

Pevnost v tahu udává napětí v tahu při přetržení vzorku. Neboli jak velká síla je potřebná k přetržení vzorku o daném průřezu [34]

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} [N/m^2] \quad (3.2)$$

Veličiny jsou postupně pevnost v tahu $R_m [N/m^2]$, maximální síla $F [N]$, která působila na vzorek a průřez vzorku před vložením do čelistí trhačky $S_0 [mm^2]$ [34].

Maximální relativní prodloužení udává, jak moc je možné materiál natáhnout než dojde k jeho přetržení. Vzorcem [34]

$$A = \frac{\Delta l_{max}}{l_0} [-] \quad (3.3)$$

Kde $A[-]$ je maximální relativní prodloužení, $\Delta l_{max} [m]$ je maximální prodloužení a $l_0 [m]$ je délka vzorku před vložením do kleští [34].

Modul pružnosti, také jinak Youngův modul pružnosti, je definován pomocí průběhu napětí v tahu v závislosti na relativním prodloužení. Napětí v tahu je definováno takto [34]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [N/m^2] \quad (3.4)$$

Zde je $\sigma [N/m^2]$ napětí v tahu. $F [N]$ představuje sílu, která působí na vzorek a S_0 představuje průřez vzorku před jeho vložením do čelistí. Dále je relativní prodloužení definováno následovně [34]

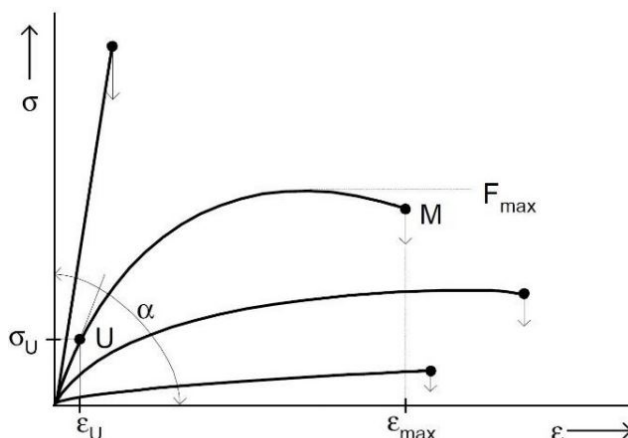
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} [-] \quad (3.5)$$

Zde je $\epsilon [-]$ relativní prodloužení, $\Delta l [m]$ je prodloužení vzorku a $l_0 [m]$ je délka vzorku před jeho vložením do kleští.

Průběh napětí v tahu v závislosti na relativním prodloužení vypadá pro každý materiál různě. Pro křehké materiály, jako například keramiku, se jedná o přímku, kde pro velmi malé relativní prodloužení je zapotřebí velkého napětí v tahu. Pro materiály elastické (pryž) se jedná také o přímku, ale naopak pro velmi malé napětí v tahu dojde k velkému relativnímu prodloužení. Pak jsou materiály tažné, například měď. Modul pružnosti je pak definován jako směrnice lineární části průběhu funkce $\sigma(\epsilon)$ [39].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} [N/m^2] \quad (3.6)$$

Zde je $E [N/m^2]$ Youngův modul pružnosti, $\sigma [N/m^2]$ je napětí v tahu a $\epsilon [-]$ je relativní prodloužení.

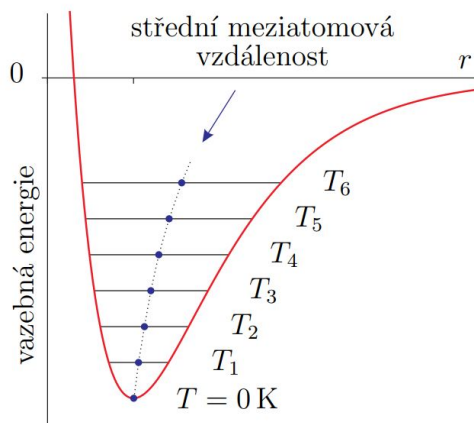


Obrázek 3.3: Příklad průběhů napětí v tahu v závislosti na prodloužení vzorků různých typů materiálů. Převzato z [37]

3.3 Termomechanické vlastnosti

3.3.1 Teplotní roztažnost

Materiály mění své vlastnosti v závislosti na teplotě. To je způsobeno tím, že látky jsou složeny z atomů, mezi kterými působí vazebné síly. V ustáleném stavu jsou síly v rovnováze. Tato rovnováha určuje rovnovážnou vzdálenost mezi atomy. Atomy však nejsou v klidu, ale kmitají. Výchylka kmitů je ovlivněna teplotou a to tak, že čím je těleso teplejší, tím je větší výchylka. Na obrázku 3.4 je vyobrazena funkce potenciální energie vazebných sil v závislosti na meziatomové vzdálenosti. Vidíme, že funkce není symetrická a střední vzdálenost se s rostoucí energií (teplotou) mění. To způsobuje změnu rozměru tělesa při změně teploty [40].



Obrázek 3.4: Vazebná energie meziatomových sil. Převzato z [40].

Můžeme tedy prohlásit, že látky mění své rozměry v závislosti na teplotě. Tuto změnu popisuje součinitel teplotní objemové roztažnosti α [40]. Vlivem vnitřní struktury materiálu však nemusí být změna rozměru ve všech osách stejná. Pro případy, kdy nás zajímá změna rozměru pouze v jedné ose, je zaveden součinitel teplotní délkové roztažnosti α [40].

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \quad (3.7)$$

Kde l_0 je délka při konkrétní teplotě a $\frac{dl}{dt}$ značí derivaci délky dle teploty. Součinitel teplotní roztažnosti se v malém rozsahu teplot příliš nemění a lze ho považovat za konstantu [40]. Z rovnice 3.7 vychází i následující vztah

$$l = l_0(1 + \alpha t) \quad (3.8)$$

Koeficient teplotní délkové roztažnosti je významné zkoumat například pro vícevrstvé struktury. Pokud je vícevrstvá struktura z materiálů s velmi rozdílnými koeficienty teplotních roztažností, tak může vlivem tepla dojít k odtrhávání vrstev nebo změně rozměru. To platí jak pro materiály nosné, tak pro materiály pojivé (lepidla) [41].

3.3.2 Mikrostruktura polymerů

V případě polymerů je nutné uvažovat jejich mikrostrukturu. Teorie týkající se tohoto tématu je rozsáhlá a výrazně přesahuje záběr této práce. Zde bude řečeno pouze nezbytně nutné. U polymerů dochází v závislostech na teplotě k několika fázovým přechodům. Při zvyšování teploty polymeru v sklovitém (pevném) stavu, dojde při určité teplotě ke změně v mikrostruktuře polymeru. Tato teplota se nazývá

teplota skelného přechodu. Polymer je nad touto teplotou ve stavu kaučukovitém. Při dalším zvyšování je posléze dosaženo takzvané teploty tání [42].

3.3.3 Termické analýzy

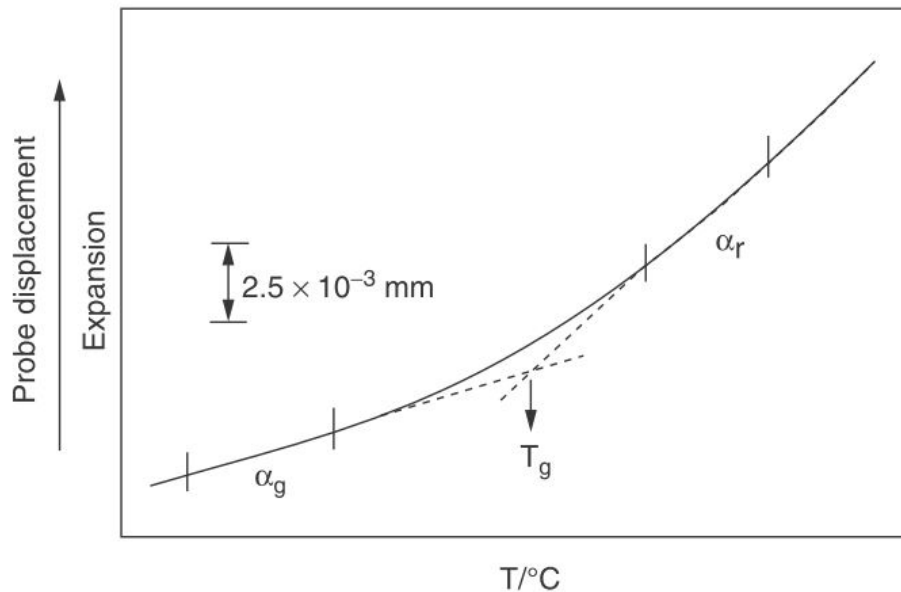
Termické analýzy jsou skupinou měřících technik, jejichž principem je měření reakce materiálu na teplotu nebo její změnu. Jejich cílem je určit spojitost mezi teplotou a fyzikální vlastností materiálu. Rozšířené techniky jsou diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) a termomechanická analýza (TMA). Termické analýzy jsou velmi rozšířené v odvětví polymerů, kde jsou využívány ke zjišťování vlastností materiálu a následně pro navrhování výrobních procesů a odhadování životnosti vyrobených dílů [41].

Termomechanická analýza se zabývá změnou délky nebo objemu vzorku v závislosti na teplotě. Vzorek je uzavřen v komoře na podložce z materiálu, jehož rozměr je velmi málo ovlivněn teplotou. Rozměry vzorku jsou měřeny sondou, která je ze stejného materiálu jako podložka. Sonda je na vzorek přitlačena konstantní silou. To zajišťuje dobrý kontakt a přesnější měření. Přesné měření teploty je zajištěno tepelným čidlem, které je umístěno v komoře hned vedle vzorku. Do komory je možné vložit pouze vzorky s rovnými plochami, jiné vzorky takto není možné měřit [41].

3.3.4 Měření TMA a odečty hodnot

Měření probíhá tak, že je vzorek vložen do komory zařízení. Dále je komora uzavřena a je spuštěna termomechanická analýza. Vzorek je ohříván na předem určenou teplotu předem určenou rychlostí ohřevu. Poté je vzorek ochlazován předem určenou rychlostí na předem určenou teplotu. Během celého procesu jsou měřeny veličiny teploty a polohy sondy.

Hodnotu délkové teplotní roztažnosti, určíme pomocí lineární části průběhu, pomocí dříve uvedeného vzorce. Hodnotu teploty skelného přechodu určíme ze závislosti změny rozměru vzorku na teplotě. Průběh je u nižších teplot lineární, po dosažení teploty skelného přechodu dojde k zřetelné změně rozměru vzorku. Teplotu skelného přechodu určíme jako průsečík lineárních regresí jednotlivých částí průběhu. Nad teplotou skelného přechodu může u semikrystalických polymerů, jako je PLA, dojít ke studené krystalizaci. Studená krystalizace zvyšuje obsah krystalické složky polymeru a snižuje obsah složky amorfní, která je tvořena neuspořádanými řetězci polymeru [42]. Je možné, že vlivem studené krystalizace polymer změni svůj tvar. To je měřeno jako rozdíl rozměru před TMA a po ukončení TMA.



Obrázek 3.5: Ilustrační odečet teploty skelného přechodu. Převzato z [41].

4. Návrhy experimentů

Na předchozích stránkách byla vysvětlena teorie, na které jsou postavena měření prováděná pro účely této práce. V této kapitole se budeme zabývat praktickým provedením dřívějších poznatků na konkrétních přístrojích se známými parametry a detailním pracovním postupem.

4.1 Použité tiskárny

4.1.1 FFF

Vzorky byly vytištěny na tiskárně Original Prusa i3 MK3/S. Jedná se o stolní tiskárnu cenově dostupnou veřejnosti. Tiskárna hýbe podložkou v ose Y a v osách X, Z tiskovou hlavou. Do tiskové hlavy je možné vložit pouze jednu cívku filamentu, a tedy vytištěné objekty jsou jednobarevné. Tiskárna je pro lepší kontrolu teploty uzavřená v boxu a tím umožňuje tisk větší škály materiálů. Box není originální, jedná se o úpravu provedenou v laboratoři.

Tiskárna má tiskový prostor o rozměrech $25 \times 21 \times 21 \text{ cm}$. Průměr otvoru trysky je $0,4 \text{ mm}$ a nejmenší možná výška vrstvy tisku je $0,05 \text{ mm}$. Tiskárna zvládá maximální rychlost pohybu os až 200 mm/s . Tiskárna může tisknout materiály PLA, ABS, PET a podobné. Dále má tiskárna magnetickou vyhřívanou podložku s PEI povrchem. Ta zajišťuje dobré přilnutí tištěného objektu během tisku a kompenzuje nerovnoměrné chladnutí. Dále podložka umožňuje snadné odebrání výtisku [6].



Obrázek 4.1: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [6].

4.1.2 SLA

Pro tisk měřených vzorků byla použita tiskárna PRUSA SL1, která používá technologii MSLA (Masked stereolithography). Tiskárna PRUSA SL1 používá výkonnou UV LED, která osvětluje resin skrze stínítko (displej) s rozlišením 2560 na 1140 pixelů s bodem o straně 0,047 mm. Tloušťku vrstvy tiskárna umožňuje od 0,01 mm, s doporučenou tloušťkou vrstvy 0,025 až 0,1 mm. Tiskárna je vybavena naklápěcí vaničkou, která usnadňuje odtrhávání vrstvy od dna vany. Využitelný tiskový prostor je 120 na 68 na 150 mm. Intenzita osvětlení je až 990 mW/m² a vlnová délka 405 nm [19].

Výrobky z tiskárny PRUSA SL1 po tisku vyžadují mytí v isorpopylalkoholu a další vytvrzování UV zářením. K provedení mytí a stabilizaci výtisku byla použita Mycí a vytvrzovací stanice Original Prusa CW1. Stanice používá UV záření stejné vlnové délky jako tiskárna [19].



Obrázek 4.2: *Original Prusa SL1 3D tiskárna (vlevo) a Mycí a vytvrzovací stanice Original Prusa CW1(vpravo) [19].*

4.2 Použité materiály

4.2.1 PLA

PLA je v oblasti 3D tisku pro své vlastnosti velmi rozšířený. Vlastnosti tohoto materiálu nekladou na tiskárny náročné požadavky. Například tisková teplota 190 – 210 °C [44] je v porovnání s teplotou pro tisk ABS 225 – 245 °C [45] (materiálu v pyramidě 2.11 o jeden stupeň výš) nízká. Další příjemnou vlastností PLA je, že nevyžaduje důkladné řízení teploty okolí. Box tiskárny tedy může být otevřený aniž by docházelo k deformaci výtisků vlivem rozdílné rychlosti chladnutí jednotlivých vrstev.

Pro účely této práce bylo použito PLA s označením PLA Crystal Clear "Transparent" od společnosti Prusa Research a.s. Jedná se o nebarvený filament s průměrem 1,75 mm. Výrobce filamentu neudává hodnoty mechanických vlastností materiálu. Výrobce však uvádí z jakého granulátu je filament vyroben. Jedná se o granule 4043D od společnosti Natureworks [44]. K těmto granulím je k dispozici datasheet. V data sheetu [26] jsou hodnoty mechanických vlastností dle normy ASTM D882, teplota měřena dle ASTM E2092.

| | |
|---|------|
| Pevnost v tahu na mezi kluzu [MPa] | 60 |
| Pevnost v tahu při přetržení [MPa] | 53 |
| Youngův modul pružnosti [MPa] | 3600 |
| Maximální relativní prodloužení [%] | 6 |
| Teplota teplotní deformace [°C] (0.45 MPa) | 55 |

Tabulka 4.1: Tabulka typických hodnot vlastností vstříkovaných vzorků [26].

4.2.2 Resin

Pro tuto práci byl použit resin v katalogu nazýván „Azure Blue“ od firmy Prusa Polymers. V nevytvrzeném stavu se jedná o viskózní toxickou tekutinu modré (azurové) barvy. Při manipulaci vyžaduje gumové rukavice. Laboratorní plášť a ochranné brýle s plnými bočnicemi jsou vysoce doporučeny [28]. Ohledně mechanických vlastností resinu nebylo možné nalézt žádné konkrétní informace. Nejlepší informace jsou na internetových stránkách, kde se dá resin zakoupit [46]. Zdroj udává že resin je tvrdý, křehký, dobře modeluje detaily a tvrdne během šesti až devíti vteřin.

| Název chemikálie | CAS | % váhou |
|----------------------|------------|---------|
| Epoxidová pryskyřice | 61788-97-4 | 40-50 |
| Monomer | 13048-33-4 | 20-40 |
| Pigment | | 2-5 |
| Foto-iniciátory | 947-19-3 | 3-5 |

Tabulka 4.2: Složení použitého resinu [28].

4.3 Vzorky

Tisk vzorků probíhal pro jednotlivé technologie následovně. Pro vzorky vytištěné na dřívě uvedené tiskárně Original Prusa Prusa i3 MK3S byla tiskárna spuštěna a byl na ní nastaven přehřev pro tisk PLA. Specificky se jedná o teplotu trysky na 215 °C a teplotu podložky na 60 °C. Teploty přehřevu jsou na tiskárně přednastavené a slouží k přiblížení teplot tiskárny k parametrům nastaveným v nastavení tisku. Během přehřevu byla tisková podložka omyta isopropylalkoholem. Po ohřátí tiskárny na požadované teploty byl zahájen tisk. Po dokončení tisku byla tisková podložka z tiskárny odejmuta a vzorky z ní byly opatrně sundány pomocí špachtle. Pro tisk vzorků se liší pouze teploty trysek během tisku, které byly zvoleny pro ověření vlastností materiálu po tisku. Ty byly nastaveny na 210 pro jednu sadu vzorků a na 240 °C pro druhou sadu vzorků.

Tisk FFF probíhal s následujícími společnými parametry:

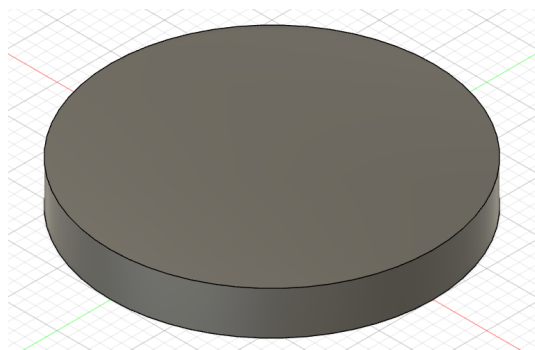
- ◇ Podpěry - žádné
- ◇ Límec - žádný
- ◇ Obrys - 2 okruhy
- ◇ Výška obrysu - 3 vrstvy
- ◇ Vzdálenost obrysu od objektu - 2 mm
- ◇ Svislé stěny - 2 perimetry
- ◇ Tloušťka vrstvy - 0,15 mm
- ◇ Hustota výplně - 100 %
- ◇ Vzorec výplně - rectilinear
- ◇ Úhel výplně - 45 °
- ◇ Průměr filamentu - 1,75 mm
- ◇ Násobič extruze - 1
- ◇ Rychlosti:
 - Perimetry - 45 mm/s
 - Vnější perimetry - 25 mm/s
 - Vrchní výplň - 40 mm/s
 - Výplň - 80 mm/s
 - První vrstva - 20 mm/s
 - Rychloposun - 180 mm/s
- ◇ Vypnutí chlazení pro prvních 1 vrstvu
- ◇ Rychlost ventilátoru 100 %
- ◇ Teplota tiskové podložky - 60 °C

Dále pak vzorky tištěné na tiskárně Original Prusa SL1 měly rozdílně nastavené časy expozice vrstvy (mimo první) a to 8 sekund pro jednu a 16 sekund pro druhou sadu vzorků. Společné parametry pro všechny vzorky jsou pak následující:

- ◇ Tloušťka vrstvy - 0,15 mm
- ◇ Podpěry - žádné
- ◇ Podložka - žádný
- ◇ Doba osvitů první vrstvy - 40 s

Vzorky byly po tisku vytaženy z resinu a v tiskárně z nich nevytvrzený resin pouze okapal. Tisková podložka byla poté vyjmuta z tiskárny, přebytečný resin byl otřen papírovým ubrouskem a tisková podložka se vzorky ponořena do mycí nádoby s isopropylalkoholem. Nádoba poté byla vložena do mycí a vytvrzovací stanice CW1 kde byla 5 minut myta, 5 minut sušena a 10 minut vytvrzována.

Vzorky na měření tvrdosti jsou geometrické válce o průměru 30 mm a výšce 4 mm. Vzhledem k povaze měření bylo pro každou zkoumanou kombinaci tiskových parametrů vytištěno po jednom vzorku. Otisky zanechané měřicí metodou jsou malé a plocha vzorku je dostatečná.

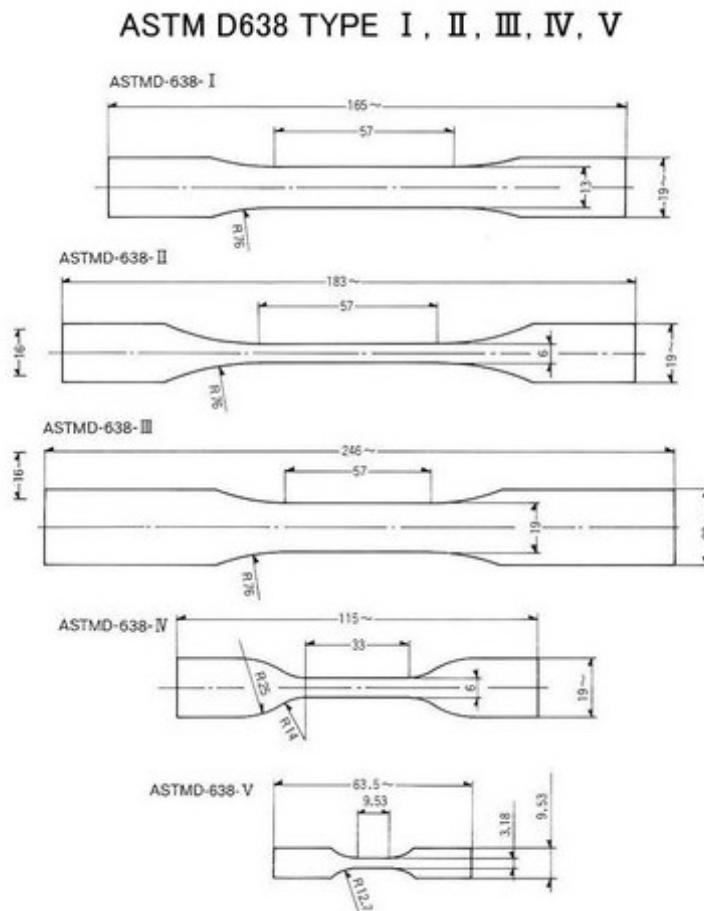


Obrázek 4.3: 3D model vzorku pro měření tvrdosti. Vytvořeno v programu Fusion 360 [23].

Na obou tiskárnách byly zvoleny dříve uvedené tiskové parametry. Na tiskárně Prusa SL1 byl nastaven delší čas osvitů první vrstvy. To proto, že je nezbytné zajistit dobré přichycení výtisku k tiskové podložce. Vzhledem k tomu, že při vystavení resinu UV záření dochází k polymerizaci [1] a ta může ovlivnit tvrdost povrchu, byly tyto vzorky měřené z obou plochých stran, ze strany tiskové podložky a ze strany dna vany.

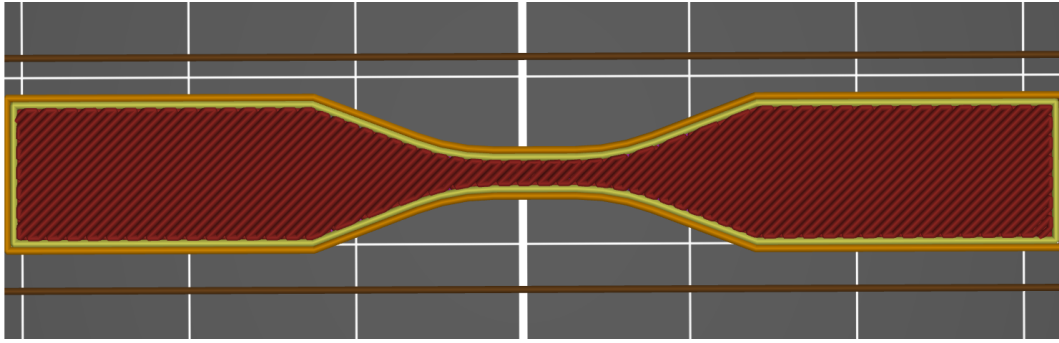
Vzorky pro měření na trhačce jsou dle standardu ASTM D638. Pro měření hodnot uvedených v této práci byly použity vzorky typu 5 4.4 o tloušťce 3,18 mm. Vzorek má výslednou plochu průřezu $S = 3,18 \text{ mm} \times 3,18 \text{ mm} = 10,1 \text{ mm}^2$. Délka zúžené části vzorku je dle specifikace 9,53 mm viz. Obrázek 4.4. Parametry nastavení tiskáren byly uvedeny dříve v této kapitole.

Vzhledem k destruktivní povaze zkoušky bylo nutné vytisknout větší množství vzorků. Konkrétně byl zvolen právě takový počet, který bylo možné umístit na tiskovou podložku SLA tiskárny. Tedy právě 11 vzorků pro každou testovanou sadu.



Obrázek 4.4: Specifikace vzorků pro měření pevnosti v tahu, standard ASTM D638 [47].

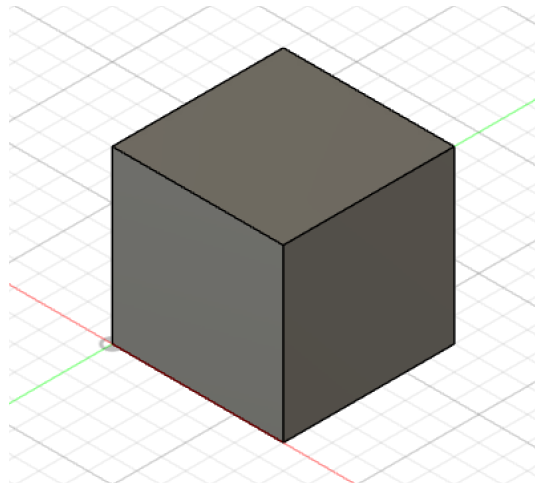
Z dříve zmíněné teorie vyplývá, že při tisku technologií FFF mají vzorky vnitřní strukturu vrstev, která odpovídá nastavení pohybu tiskové hlavy. Pro tisk vzorků na tomto typu tiskárny byla výplň nastavena na 100 % rectilinear (úhlopříčně). Výsledná struktura uvnitř vzorků je vyobrazena na obrázku 4.5. Struktura vzorku je pak tvořena opakujícími se vrstvami. Ty se od sebe liší náklonem výplně, jedna je naklopena vpravo, druhá je naklopena vlevo. Výsledkem je objekt, který má i ve zúžení výraznou strukturu. Struktura je rozměrově na úrovni vrstev.



Obrázek 4.5: Znárodnění vnitřní struktury tištěného vzorku, náklon vlevo

Vzorky tištěné na tiskárně používající technologii SLA nemají v rámci jedné vrstvy takovou strukturu. V rámci jedné vrstvy jsou směrově homogenní.

Vzorky pro zkoušky termomechanických vlastností jsou kostky o straně 7 mm. Vzorky tištěné na tiskárně FFF mají, jak bylo zmíněno dříve v této práci, vnitřní strukturu na úrovni vrstev. Ta může ovlivnit výsledek měření. Mimo to mají i strukturu na úrovni polymerových řetězců, která se také může projevit při překročení teploty skelného přechodu. Vzorky vytištěné na tiskárně SLA jsou bez výrazné vnitřní struktury na úrovni vrstvy a měření by jí tedy nemělo být ovlivněno. Měření však může být ovlivněné strukturou na úrovni polymerových řetězců.



Obrázek 4.6: 3D model vzorku pro měření termomechanických vlastností. Vytvořeno v programu Fusion 360 [23].

4.4 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti probíhalo na přístroji DuraScan 20 G5 společnosti EMCO-TEST. Přístroj umí měřit za pomoci metod Brinell, Vickers a Knoop. K dispozici však byl pouze hrot pro měření dle Vickerse. Přístroj měří dle metody v zátěžovém rozmezí 0,00025 až 65,5 kgf. V práci použitou metodu Vickers měří v rozsahu HV 0,00025 až HV 50.



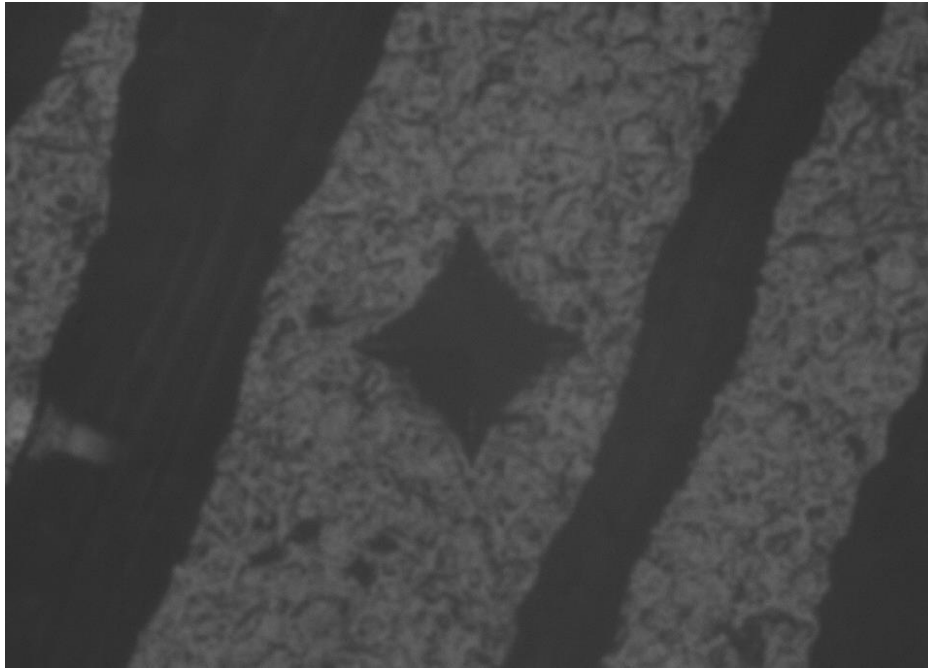
Obrázek 4.7: Tvrdoměr DuraScan 20 G5 společnosti EMCO-TEST. Převzato z [48].

Vzorek je do přístroje upnut na podložku, kterou je možné pomocí šroubového mechanismu posouvat ve dvou osách. Podložka má rozměr 135 na 135mm s možným posuvem o 25mm. Přesnost posuvu podložky je $\pm 10 \mu m$. Síla je na vzorek aplikována pomocí motoru přes nástavec s příslušným hrotem. Přístroj je schopný poloautomatického odečtu hodnoty tvrdosti. Pro všechna měření byl na přístroji zvolen objektiv 5x s digitálním zoomem 2x. Zatížení hrotu byla nastavena dle následující tabulky.

| | | | | | | |
|----------|---------|---------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | PLA 210 | PLA 240 | SLA 40/8 - strana 40 | SLA 40/8 - strana 8 | SLA 40/16 - strana 40 | SLA 40/16 - strana 16 |
| Zatížení | 0,5kg | 0,5kg | 1kg | 1kg | 1kg | 1kg |

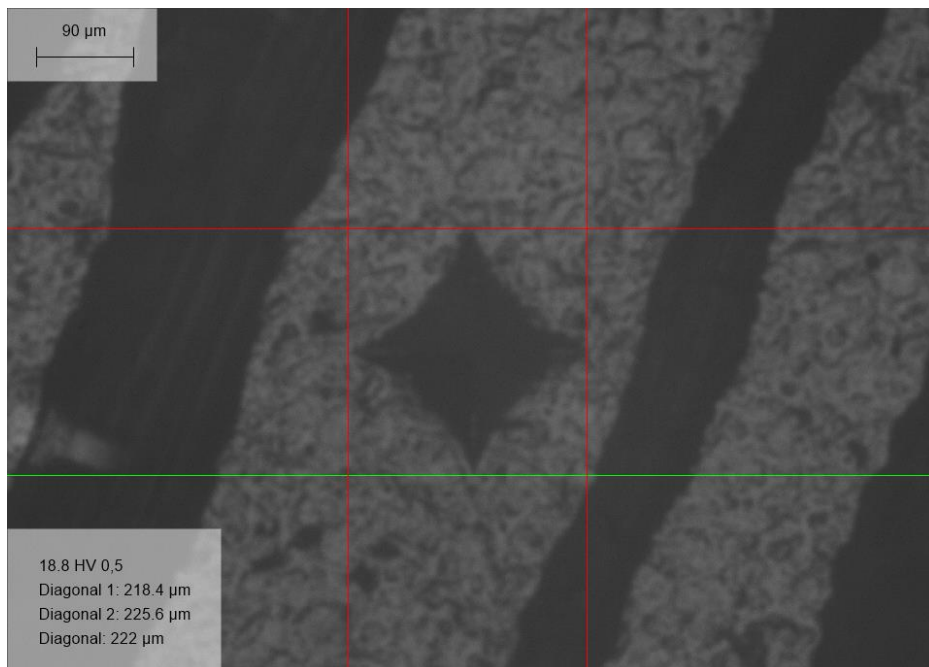
Tabulka 4.3: Tabulka nastavených zatížení při měření tvrdosti.

Měření tvrdosti vzorků tištěných na tiskárně typu FFF nebylo nejjednodušší. Obtíže působila struktura povrchu. Vlny vytvořené extruzí materiálu z trysky jsou na povrchu větší než obtisk hrotu tvrdoměru. Bylo nutné měřit „na vrcholu vlny“, viz. Obrázek 4.8. Z jedné strany byly vzorky hladší, a to ze strany, na které byly během tisku přitíženy k tiskové podložce. To protože tryska, ze které je materiál extrudován, horký plast tiskne k předešlé vrstvě. Protože při tisku první vrstvy není žádná předešlá vrstva pod tryskou, materiál je přitížen k tiskové podložce. V horní vrstvě dochází k tomu samému, tryska tlačí materiál na předchozí vrstvu. Z vrchu výtisku pak není nic, co by povrch vyhladilo. Tím pádem je spodní strana výtisku hladší než horní strana. Měření probíhala na spodní straně vzorku. Z horní strany vzorku nebylo možné získat opticky rozpoznatelný otisk měřícího hrotu.

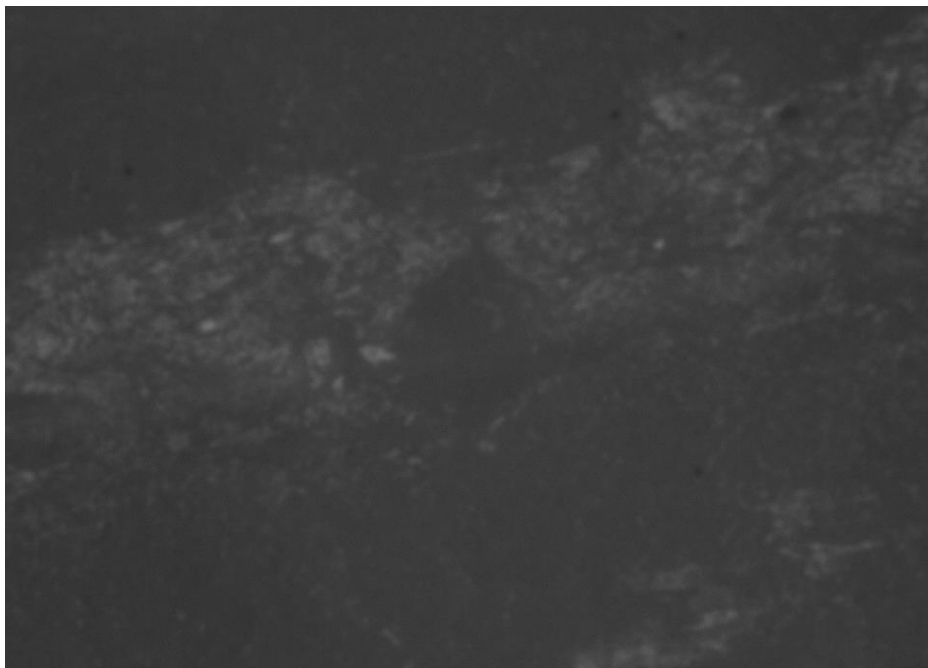


Obrázek 4.8: *Fotografie obtisku na vzorku PLA 210 °C*

Tvrdoměr má funkci automatického odečtu úhlopříček z fotografie. Tato funkce však nepracovala správně, pravděpodobně protože obtisk hrotu není na fotografii jedinou tmavou oblastí. Při použití této funkce přístroj nedokázal kurzory správně umístit. Příklad tohoto jevu nebyl graficky zachycen a není možné ho v této práci uvést. Kurzory byly umísťovány ručně. Ne vždy bylo možné přesně určit polohu vrcholu obtisku, a tedy měření mohou mít jistou odchylku, viz. Obrázek 4.9.



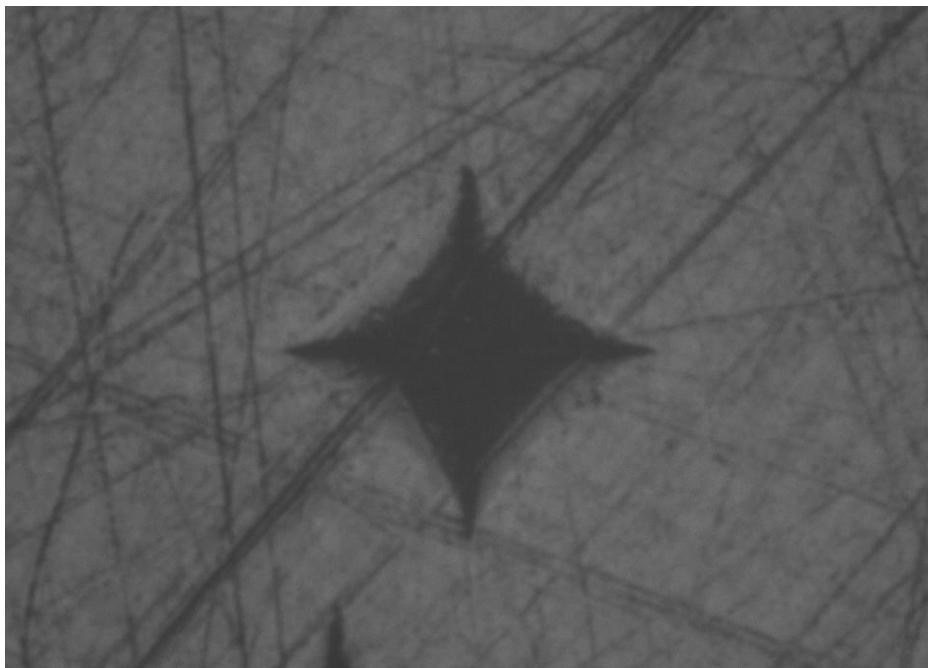
Obrázek 4.9: *Záznam obrazovky tvrdoměru po manuálním nastavení kurzorů na vzorku PLA 210 °C*



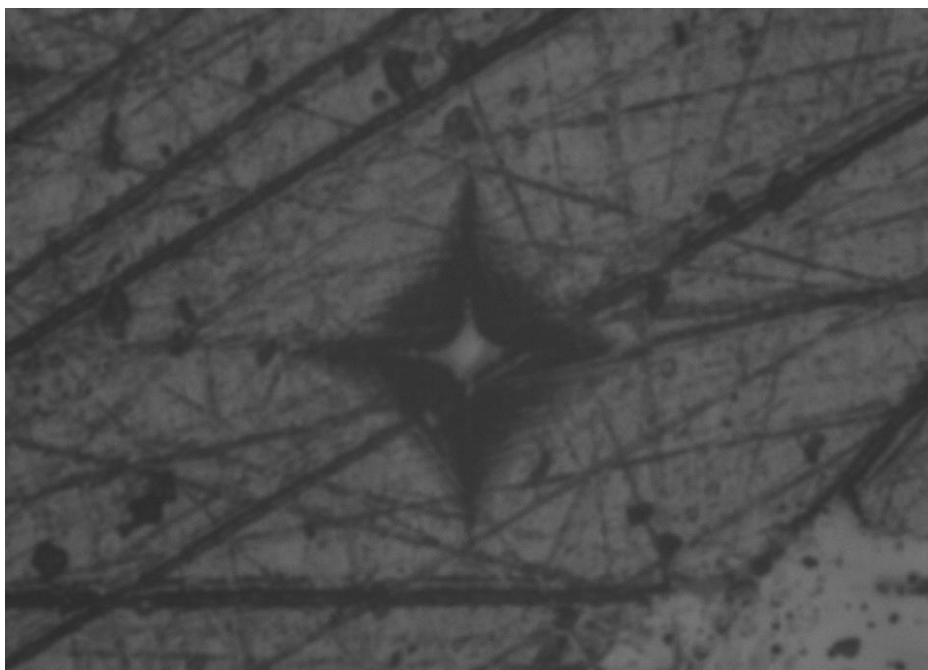
Obrázek 4.10: *Ilustrace pokusu o měření zobrazující nezřetelný otisk z horní strany PLA vzorku.*

V porovnání se vzorky vytištěnými na 3D tiskárně typu FFF byla práce se vzorky vytištěnými na SLA tiskárně snazší. Povrch vzorků byl hladší a bylo možné otisk umístit téměř kamkoliv. Na obrázku 4.11 je možné vidět, že otisk na vzorku SLA je ostřejší a lépe čitelný. Nicméně i při měření těchto vzorků nebylo možné použít funkci automatického odečtu úhlopříček otisku. Algoritmus pro nastavení kurzorů byl pravděpodobně zmaten vrypy na povrchu vzorku (černými čarami na obrázku). Tím je do měření zaveden lidský faktor a nejsou vyloučeny chyby v odečtu.

Pro tyto vzorky bylo měření provedeno z obou stran. To proto, že z jedné strany je vrstva osvícena 40 s a z druhé strany 8 respektive 16 s. Rozdíl v povrchu vzorku patrný z obrázků 4.11 a 4.12 je možné vysvětlit tím, že každá ze stran byla přitisknuta k jiné podložce. Strana osvícená 40 s byla přitisknuta k hliníkové tiskové podložce, která, aby výtisk lépe přilnul a byla zajištěna stabilita výtisku, je hrubší. Také je možné že při ponoření tiskové podložky do resinu na tiskové rovině zůstaly bubliny vzduchu. Strana osvícená 16 s pak byla přitisknuta ke dnu vany, tedy k průsvitné fólii, u které je žádoucí, aby se k ní výtisk nepřichytil a bylo možné ho zvednout. Tedy je hladká. Také po tisku několika vrstev nejsou přítomny bubliny vzduchu.



Obrázek 4.11: *Fotografie obtisku na vzorku SLA ze strany osvětlené 16 s.*



Obrázek 4.12: *Fotografie obtisku na vzorku SLA ze strany osvětlené 40 s.*

4.5 Zkouška tahem

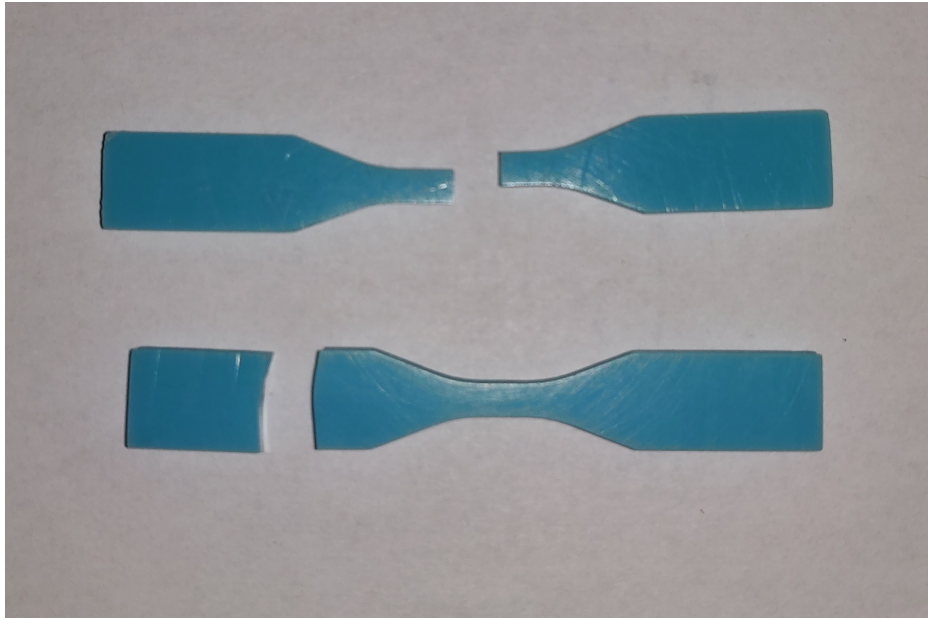
Zkouška tahem probíhala na přístroji DEFORM 02 (foto na obrázku 4.13. Jedná se o univerzální přenosné zkušební deformační zařízení české výroby. Zařízení je schopné měřit v několika silových rozsazích od 10 N po 1 kN se stálým zachováním silové přesnosti $0,1\%$. Přesnost posunu je $10\text{ }\mu\text{m}$ a šum při měřícím rozsahu $\pm 100\text{ N}$ je 2 mN peak to peak při chodu zařízení, s termoboxem 1 mN . [49].



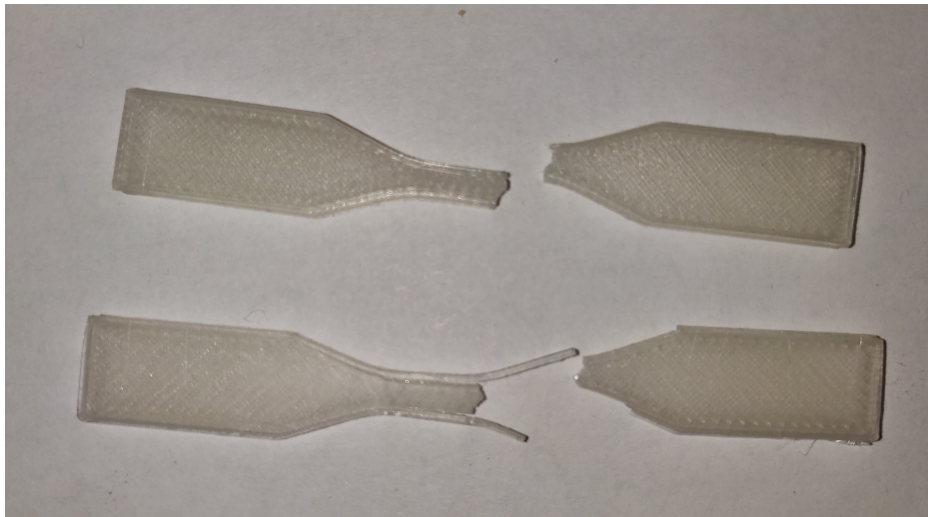
Obrázek 4.13: Trhačka DEFORM 02 - přenosné zkušební deformační zařízení. Převzato z [49].

V ovládacím programu zařízení byl nastaven pohyb konstantní rychlostí, rychlost posunu 1 mm/min a délka posunu 10 mm . Postup provedených měření byl následující. Horní čelist byla posunuta na polohu 34 mm . Po upnutí vzorku do čelistí byl spuštěn posuv horní čelisti. Po přetržení vzorku byl posuv zastaven, přetržený vzorek byl z čelistí trhačky vyjmut, horní čelist byla vrácena do polohy 34 mm a měření bylo opakováno s dalším vzorkem.

Z datové sady získané na trhačce bylo nutné některá měření vyřadit. U některých vzorků došlo k nevhodnému uchycení do kleštin. Buď byly kleštiny málo dotaženy a vzorek pak vyklouzl dříve, než byl přetržen. Takové měření bylo z celkové sady vyřazeno. Všechny chyby tohoto typu nastaly při velmi malých silách a vzorky nebyly poškozeny. Tyto vzorky byly změřeny znovu, řádně. Druhá chyba, která se vyskytla byl případ příliš utažených kleštin. Tím byla narušena struktura vzorku a došlo k přetržení mimo zúženou oblast. Tato chyba byla vnímána jako příliš závažná a vzorky byly vyřazeny ze statistického vyhodnocení.



Obrázek 4.14: Fotografie přetržených vzorků vytištěných na tiskárně typu SLA. Horní vzorek je řádně přetržený. U spodního vzorku došlo k poškození vzorku kleštinami.



Obrázek 4.15: Fotografie přetržených vzorků vytištěných na tiskárně typu FFF. Horní vzorek je příkladem běžného přetržení. U spodního vzorku došlo k nedostatečnému spojení vrstev.

4.6 Termomechanická analýza

Termomechanická analýza probíhala na přístroji Q400 TMA od společnosti TA Instruments. Q400 je přístroj na měření termomechanických vlastností vzorků o maximální výšce 26 mm a průměru 10 mm. Zařízení není vybaveno aktivním chlazením a tedy je schopno ohřevu od teploty okolí až 1000 °C s přesností ± 1 °C. Měření je možné provádět v inertní dusíkové atmosféře. Dále na vzorek působí silou 0,001 až 2 N s rozlišením 0,001 N. Poslední, pro tuto práci podstatnou, vlastností je rozlišení změny polohy (rozměru) měřeného tělesa. Jedná se o citlivost 15 nm [50].

Měření probíhala dle následující metodiky:

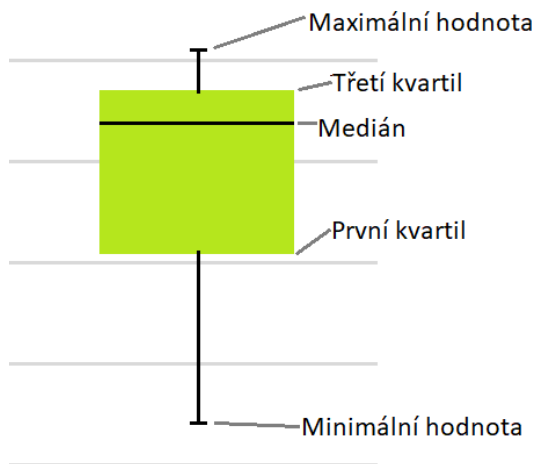
- ◇ Průtok dusíku 100 ml/min
- ◇ Síla $0,01 \text{ N}$
- ◇ Ohřev vzorku rychlostí $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$ na $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- ◇ Ochlazení vzorku rychlostí $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$ na $30 \text{ }^\circ\text{C}$



Obrázek 4.16: Zařízení pro termomechanickou analýzu Q400 TMA společnosti TA Instruments. Převzato z [50].

5. Výsledky

V dřívějších kapitolách byla vysvětlena teorie ohledně měření, popsány metody měření a jejich postupy. V této kapitole budou shrnuty výsledky měření. Pro jejich grafické znázornění je použit boxplot jako na následujícím příkladu.



Obrázek 5.1: Příklad boxplotu.

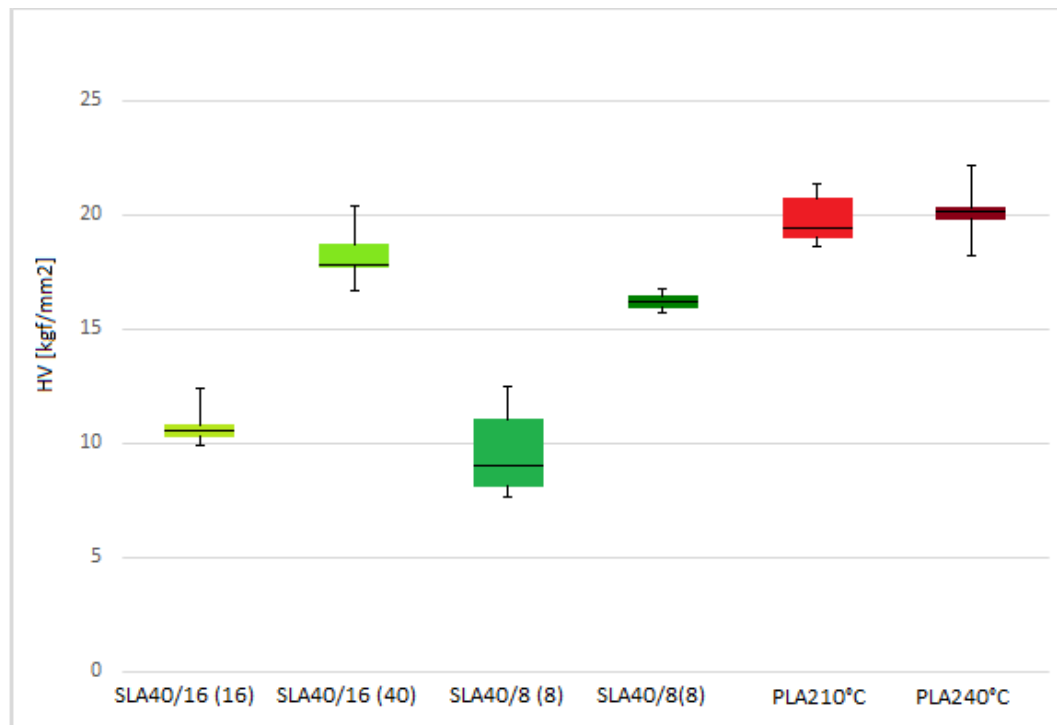
5.1 Tvrdość

Jednotlivé hodnoty byly z tvrdoměru exportovány do tabulky. Hodnoty v tabulce byly následně statisticky zpracovány pomocí programu Microsoft Excel, ve kterém byl vypracován i následující box-plot. Při zpracování nebylo žádné měření vyřazené.

| | SLA 40/16 strana 16 | SLA 40/16 strana 40 | SLA 40/8 strana 8 | SLA 40/8 strana 40 | PLA 210°C | PLA 240°C |
|-------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| HV [kgf/mm^2] | 10,69 ± 0,68 | 18,14 ± 0,98 | 9,59 ± 0,34 | 14,84 ± 1,78 | 19,871,01 | 20,15 ± 1,00 |

Tabulka 5.1: Průměrné hodnoty tvrdosti.

Z dále vyobrazeného box plotu (obr. 5.2) je zřejmé, že při tisku pomocí tiskárny typu SLA je z hlediska tvrdosti doba osvitů resinu důležitým faktorem. Rozdíl, mezi hodnotami změřenými ze stran s dobami osvitů 16 respektive 8 s, je výrazný. Hodnoty vycházející z měření vzorku s dobou osvitů 8 s mají výrazně větší rozptyl než hodnoty naměřené na vzorku s dobou osvitů 16 s. I průměrná hodnota tvrdosti vzorku s kratší dobou osvitů je nižší. Srovnáním boxů vzorku SLA 40/16 se dá soudit, že strana s delším osvitů (40 s), je tvrdší. Dále pak pohledem na boxy dob osvitů 40 s vidíme, že hodnota tvrdosti je vyšší pro vzorek 40/16. Vysvětlením může být, že vrstvy pod vrstvou první jsou osvětlené déle a tudíž tvrdší.



Obrázek 5.2: Box plot výsledků měření tvrdosti.

Pohledem na výsledky vzorků FFF tiskárny vidíme, že vzorky jsou tvrdší než vzorky pocházející z SLA tiskárny. Materiál PLA je pravděpodobně pružnější než použitý resin a tím lépe odolává vniku jiného tělesa.

Porovnáním tabulek reprezentujících výsledky materiálu PLA vidíme, že teplota tisku nemá vliv na tvrdost materiálu. Střední hodnoty jsou si blízko a rozptyl je podobný.

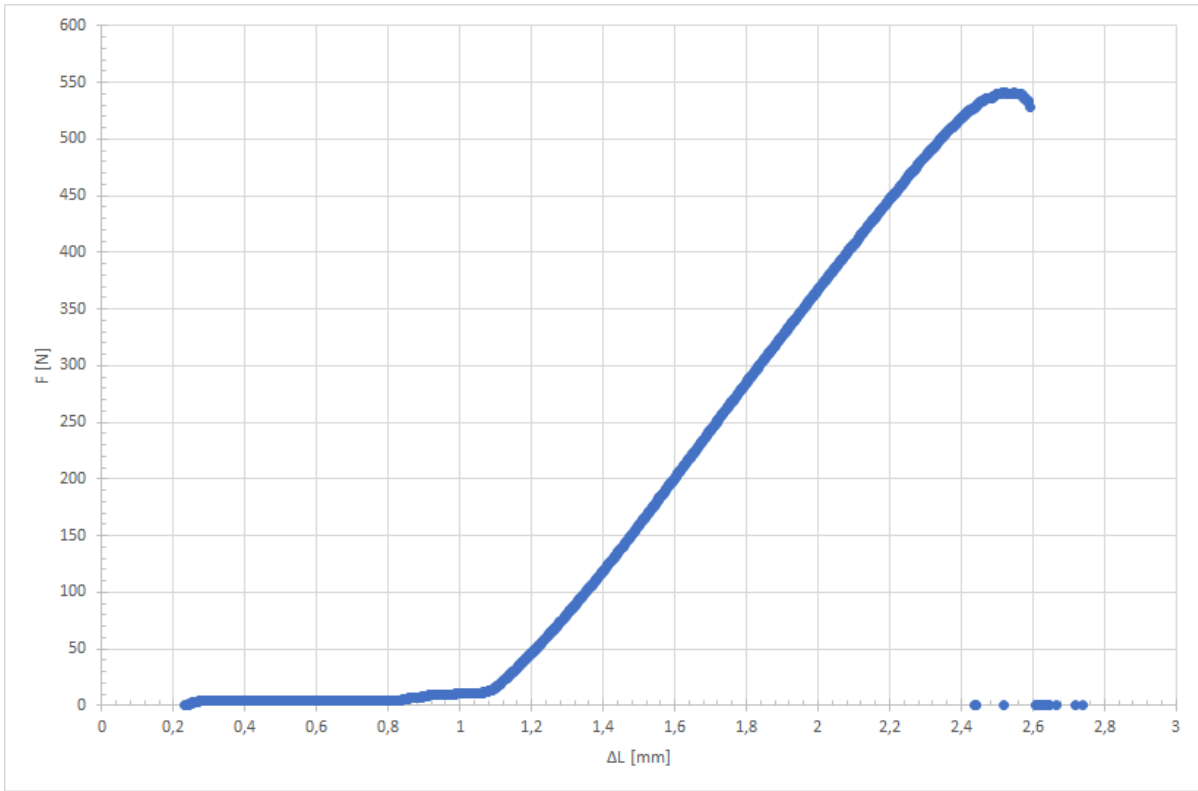
5.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala na trhačce, do jejíž čelistí byly vzorky upínány ručně. Čelisti byly širší než vzorky. Je tedy možné že vzorky nebyly všechny upnuty stejně. Proto byla nutná kompenzační opatření během zpracování hodnot. Tato opatření jsou vysvětlena níže. Grafy byly vykresleny pomocí programu Microsoft Excel.

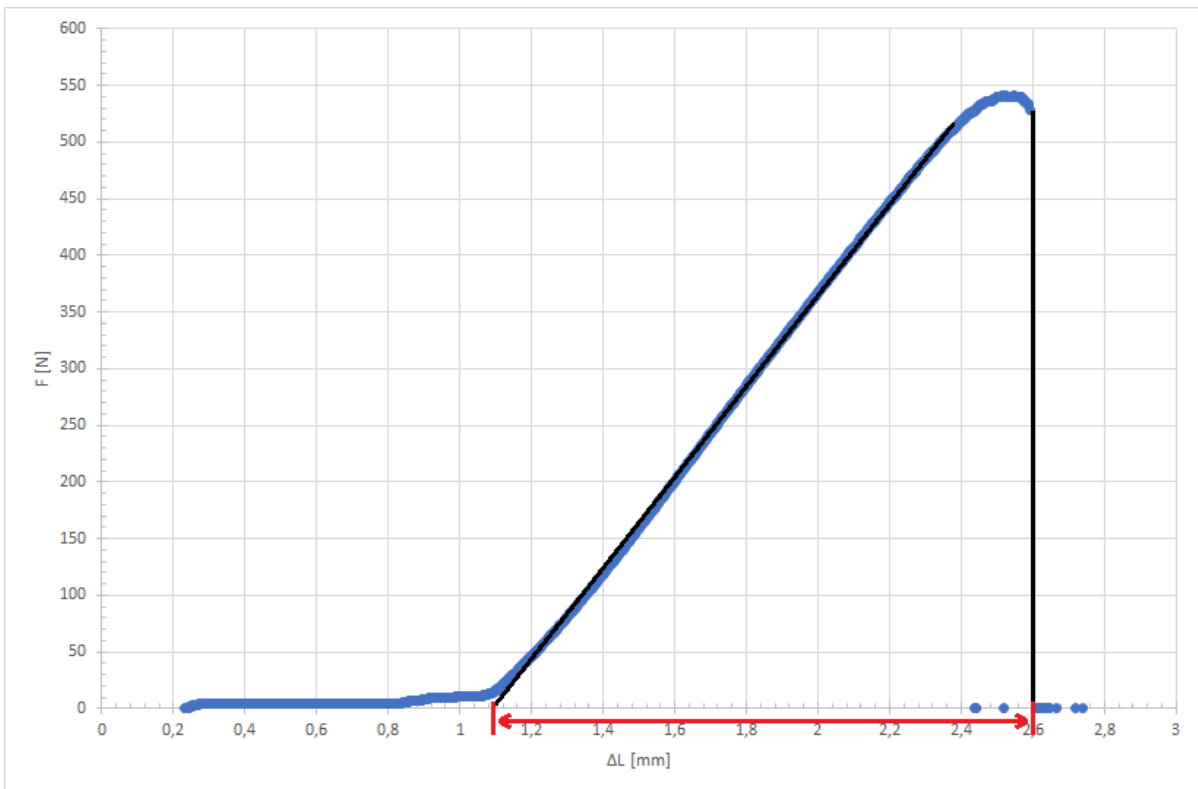
Pro výpočet maximálního relativního prodloužení byly použity hodnoty polohy odpovídající hodnotě získané jako extrapolace lineární části křivky do nuly. Jako maximální hodnota polohy byla považována hodnota prodloužení v okamžik přetržení vzorku (viz. 5.4).

Modul pružnosti byl určen z hodnot splňujících podmínku: síla větší než 10 % síly maximální a síla menší než 90 % síly maximální. V tomto rozmezí lze průběh považovat za lineární. Dochází tak k oříznutí části průběhu, ve které jsou vymežovány vůle v čelistech a část plastické deformace. Na tyto hodnoty byl poté použit dříve uvedený vzorec 3.4. Dosazeno bylo pomocí známých rozměrů vzorku.

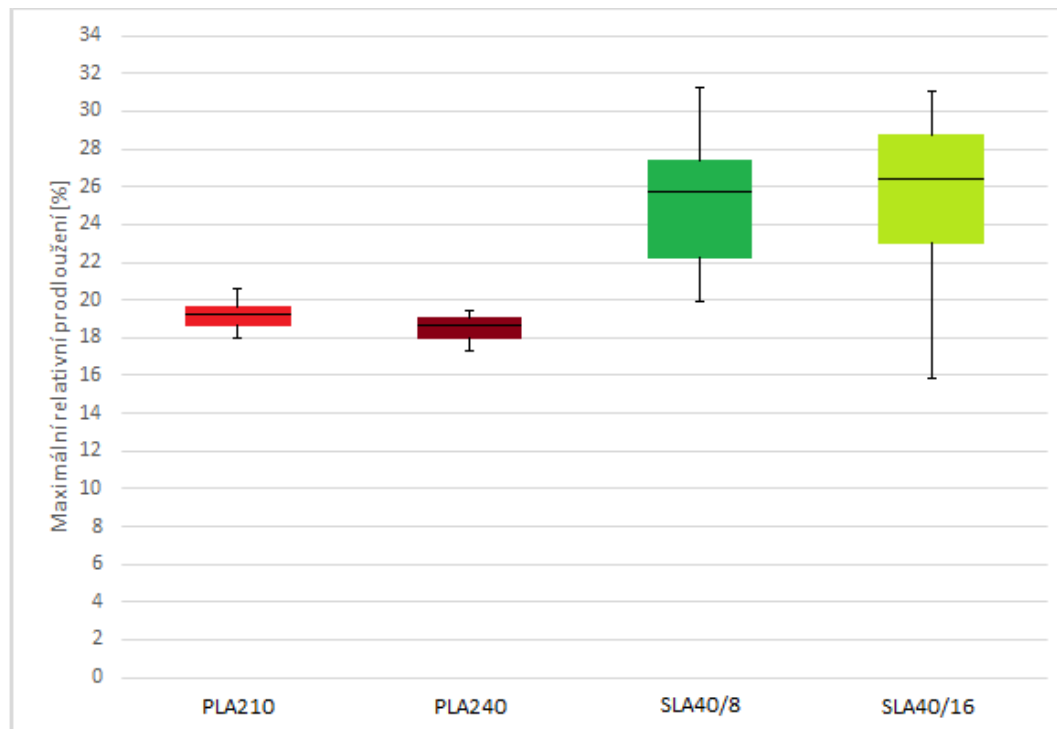
Pevnost v tahu je určena pomocí největší hodnoty síly ze sady hodnot konkrétního vzorku. Dosazeno do vztahu 3.2.



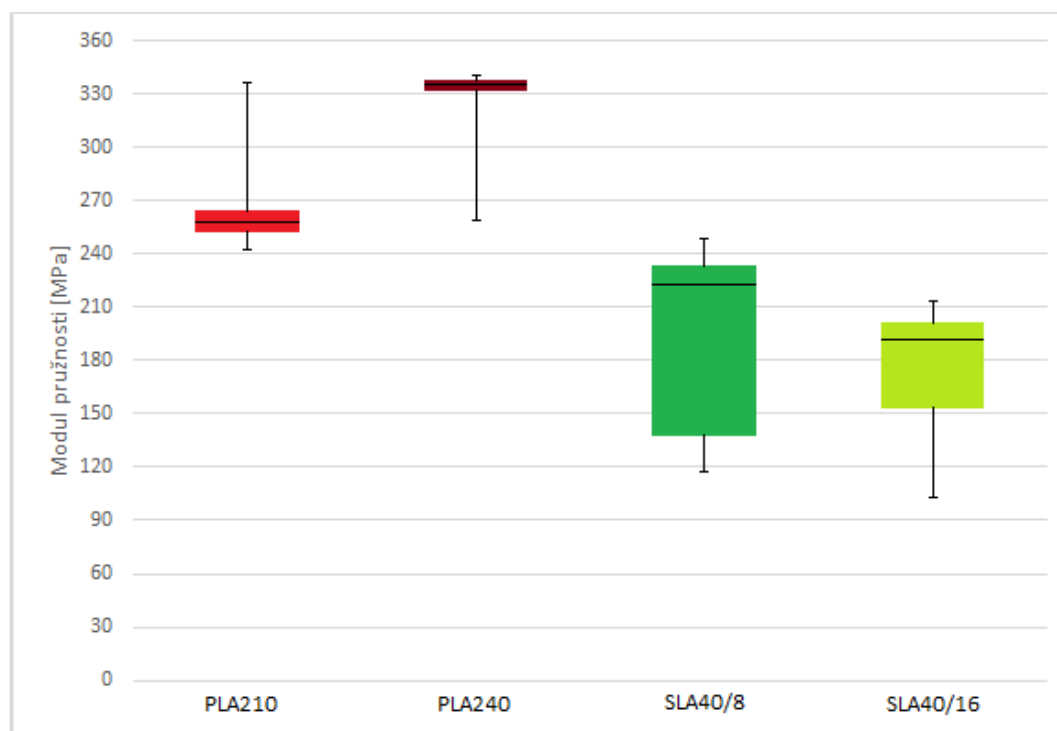
Obrázek 5.3: Příklad průběhu síly působící na vzorek v závislosti na prodloužení vzorku.



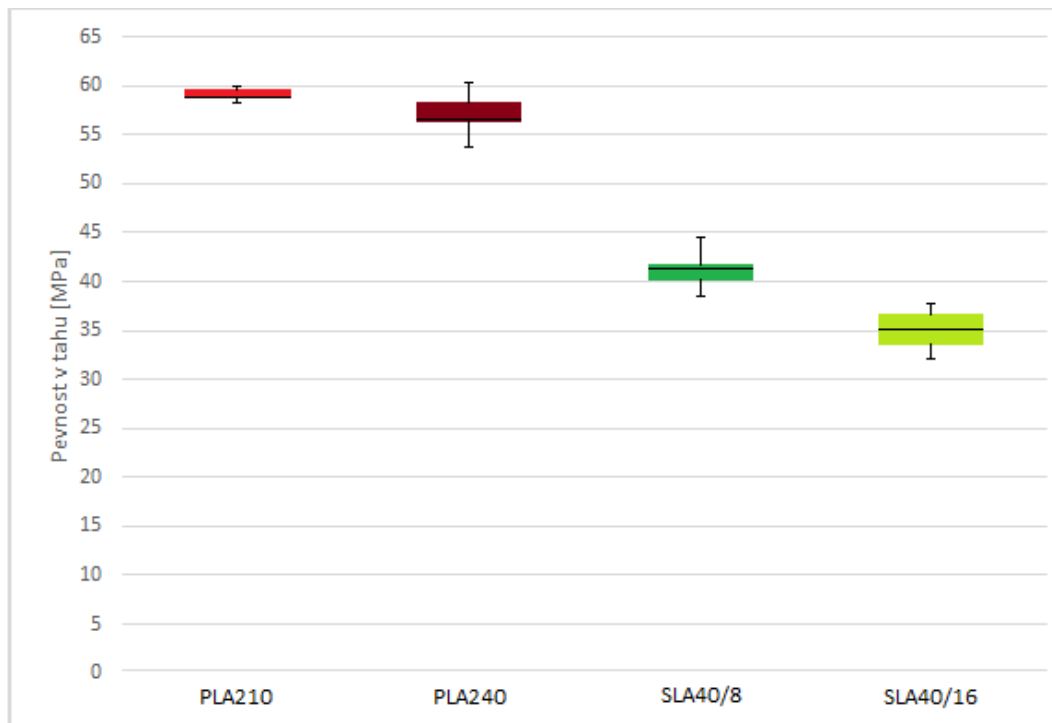
Obrázek 5.4: Příklad odečtu délky pro výpočet maximálního relativního prodloužení.



Obrázek 5.5: *Box plot maximálních relativních prodloužení.*



Obrázek 5.6: *Box plot modulů pružnosti.*



Obrázek 5.7: Box plot pevností v tahu.

| | PLA 210 | PLA 240 | SLA 40/8 | SLA 40/16 |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Maximální relativní prodloužení [%] | 19,2 ± 0,7 | 18,5 ± 0,7 | 25,2 ± 3,5 | 25,5 ± 4,3 |
| Modul pružnosti [MPa] | 269 ± 31 | 323 ± 28 | 201 ± 50 | 176 ± 39 |
| Pevnost v tahu [MPa] | 59,1 ± 0,6 | 57,1 ± 1,7 | 41,2 ± 1,8 | 35,1 ± 1,8 |

Tabulka 5.2: Přehledová tabulka průměrných hodnot tahové zkoušky.

Porovnáním průměrných hodnot materiálů mezi sebou vidíme, že resin (SLA) má vyšší maximální relativní prodloužení než vzorky z PLA (FFF). Pohledem do grafu (obrázek 5.5) však zjistíme, že výsledky nejsou konzistentní. U vytvrzeného resinu (specificky SLA 40/8) dochází k rozptylu hodnot od 15% po 30%, kdežto obě sady vzorků PLA jsou v rozmezí 18 - 20 %. Ohledně změny parametrů tisku platí, že maximální relativní prodloužení je mírně ovlivněné tiskovou teplotou. To je možné vysvětlit lepším spojením vnitřní struktury u vzorků tištěných při vyšší teplotě než u vzorků tištěných při nižší teplotě. Obě průměrné hodnoty se však příliš neliší (PLA 210 - 19,2 % a PLA 240 - 18,5 %). Resin vykazuje jiné chování. Doba osvětlení zjevně ovlivňuje schopnost materiálu se natahovat. Z hodnot (tabulka 5.2) vidíme, že průměrné hodnoty jsou sice blízké (SLA 40/8 - 25,2 % a SLA 40/16 25,5 %) ale z grafu (obrázek 5.7) vidíme, že rozptyl hodnot je nižší u déle osvětlovaného resinu.

Moduly pružnosti se liší dle parametrů tisku výrazněji. PLA je pružnější při vyšší tiskové teplotě (PLA 210 - 269 MPa a PLA 240 - 323 MPa). Rozptyl hodnot je pro obě teploty tisku podobný (přibližně od 250 MPa po 330 MPa). Liší se průměrnou hodnotou. Resin je pružnější při kratší době osvětlení (SLA 40/8 - 201 MPa a SLA 40/16 176 MPa). Rozptyl hodnot je dobou osvětlení neovlivněn.

Spočítané průměrné pevnosti v tahu měřených materiálů se liší jak dle měněného parametru tisku, tak i dle materiálu. PLA tištěné při nižší teplotě je pevnější než PLA tištěné při vyšší teplotě (PLA 210 - 57,5 MPa a PLA 240 - 55,9 MPa). Hodnoty pevnosti v tahu resinu se liší v závislosti na době osvětlení (SLA 40/8 - 40,4 MPa a SLA 40/16 33,5 MPa). Rozptyl těchto hodnot není změnou parametrů tisku ovlivněn ani u jednoho z testovaných materiálů.

Porovnání s tabulkovými hodnotami (respektive s data-sheetem výrobce) je možné pouze u PLA. Prodejce resinu žádné konkrétní hodnoty mechanických vlastností neuvádí.

| | PLA 210 | PLA 240 | Data sheet |
|-------------------------------------|----------------|----------------|------------|
| Maximální Relativní Prodloužení [%] | $19,2 \pm 0,7$ | $18,5 \pm 0,7$ | 6 |
| Modul Pružnosti [<i>MPa</i>] | 269 ± 31 | 323 ± 28 | 3600 |
| Pevnost v Tahu [<i>MPa</i>] | $59,1 \pm 0,6$ | $57,1 \pm 1,7$ | 53 |

Tabulka 5.3: *Porovnání Změřených výsledků PLA s datasheetem.*

Maximální relativní prodloužení PLA je vyšší u vzorku tištěného. Je to pravděpodobně způsobeno vnitřní strukturou. Natahováním ve směru krčku (natahováním po úhlopříčce čtverců vytvořených vrstvením) jsou čtverce deformovány a stávají se z nich kosočtverce. Při natahování vzorku mezi kleštinami bylo viditelné, jak se od sebe jednotlivé „vrstvy“ oddělují a vzorek se tak natahuje více, než kdyby byl jednolitý. Tím by se dal vysvětlit rozdíl mezi plným odlitkem testovacího vzorku s prodloužením 6 % a mezi tištěnými vzorky s průměrnými prodlouženími nad 18 %.

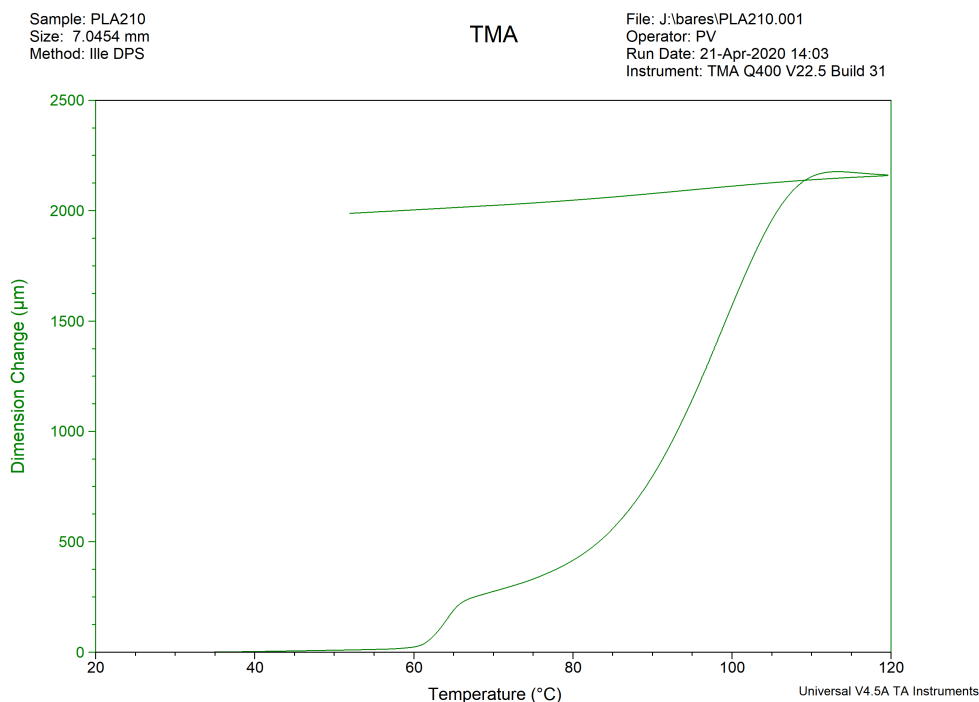
Modul pružnosti je výrazně nižší u vytištěného vzorku (změřené řádově 300 *MPa* a v data-sheetu uvedené 3600 *MPa*). Zdá se, že přestože výplň je na tiskárně nastavená na 100 %, tak vzorek není v celém objemu dokonale spojen. Tvoří tak strukturu na úrovni vrstvy tisku. Taková vnitřní struktura vzorku má vliv na jeho mechanické vlastnosti, zde konkrétně pružnost. Při natahování vzorku není natahován materiál, ale jsou od sebe odtrhávány jednotlivé tahy provedené tiskovou hlavou. Tedy by mohlo být zajímavé porovnat vzorky za použití různých typů výplně. Dalším porovnáním vidíme, že hodnoty pevnosti v tahu odpovídají datasheetu.

5.3 Termomechanická analýza

Hodnoty termomechanické analýzy byly zpracovány pomocí programu TA Universal Analysis a jeho vestavěných funkcí.

Porovnáním průběhů 5.8 a 5.9 vidíme značné rozdíly. Prvním rozdílem je měřítko změny rozměru. Vzorek z resinu Azure Blue (značeno SLA40.8) se v maximálním bodě roztáhl o přibližně $150\ \mu\text{m}$, kdežto vzorek z PLA (značeno PLA210) se roztáhl o přibližně $2100\ \mu\text{m}$. Dalším výrazným rozdílem je, že vzorek z resinu se během ochlazování zmenšuje přibližně stejně, jako se roztahoval a vzorek z PLA se, v porovnání s jeho roztahením, téměř nezmenšil. To je způsobeno tím, že v materiálu PLA probíhá takzvaná studená krystalizace [42]. U PLA by se na části průběhu, kde byl vzorek ochlazován, dal očekávat skelný přechod. Nicméně skelný přechod je možné sledovat pouze u materiálů amorfních. Vzorky z PLA, u kterých již proběhla studená krystalizace, mají většinu své hmoty v krystalické formě. Pouze malá část zůstává amorfní. Proto se tento skelný přechod na křivce neprojevuje. V resinu se jev studené krystalizace neprojevuje, a proto nemá smysl měřit změnu rozměru před a po provedení termomechanické analýzy.

Pro účely termomechanické analýzy byly v každé sadě měřeny pouze tři vzorky. Tabulka ze tří hodnot nemá dostatečnou vypovídající hodnotu a není uvedena. Výstupem termomechanické analýzy jsou průměrné hodnoty s příslušnými směrodatnými odchylkami.

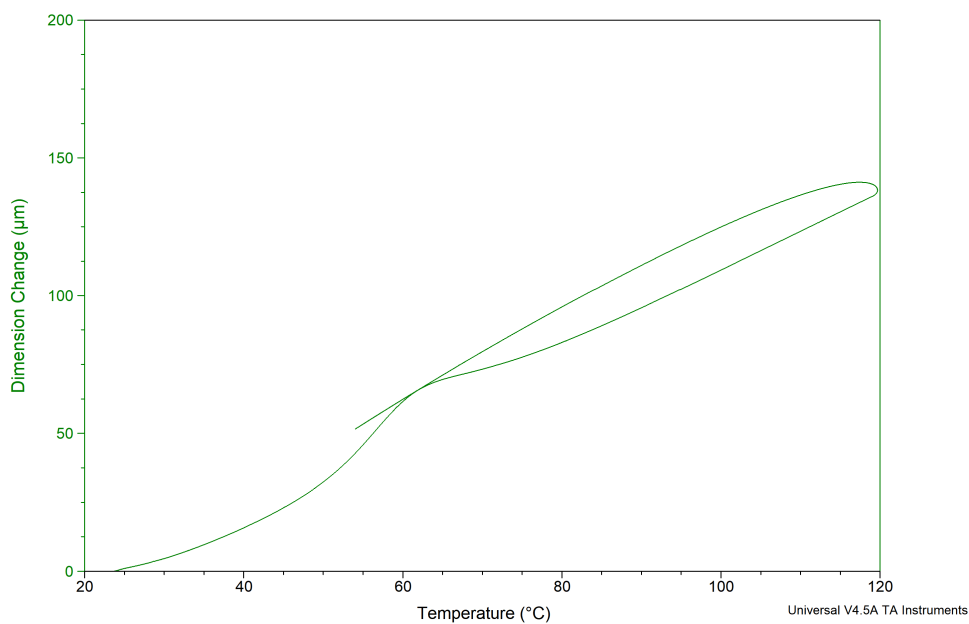


Obrázek 5.8: Příklad průběhu termomechanické charakteristiky vzorku z PLA ($210\ ^{\circ}\text{C}$). Vyrobeno pomocí TA Universal Analysis.

Sample: SLA40_8
Size: 7.0264 mm
Method: Ilie DPS

TMA

File: J:\bares\SLA40_8.001
Operator: PV
Run Date: 21-Apr-2020 15:38
Instrument: TMA Q400 V22.5 Build 31

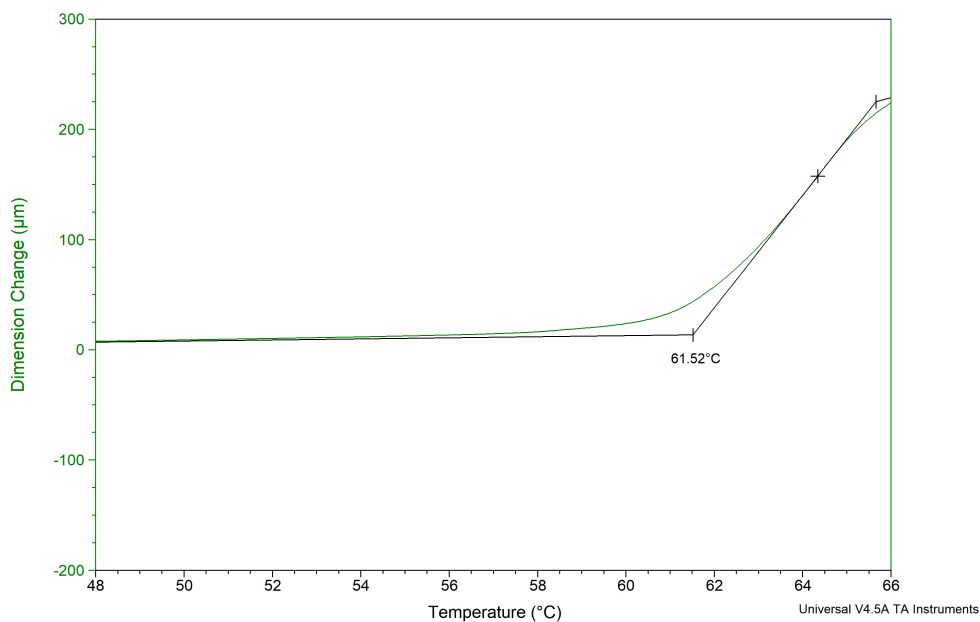


Obrázek 5.9: Příklad průběhu termomechanické charakteristiky vzorku z resinu Azure Blue. Vyrobeno pomocí TA Universal Analysis.

Sample: PLA210
Size: 7.0454 mm
Method: Ilie DPS

TMA

File: J:\bares\PLA210.001
Operator: PV
Run Date: 21-Apr-2020 14:03
Instrument: TMA Q400 V22.5 Build 31

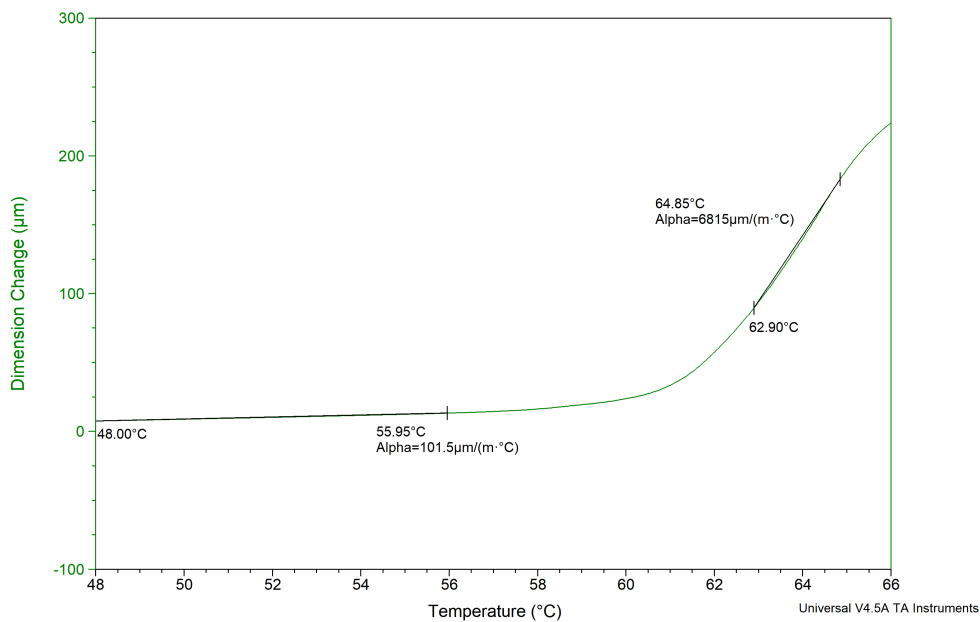


Obrázek 5.10: Příklad určení teploty skelného přechodu. Vyrobeno pomocí TA Universal Analysis.

Sample: PLA210
Size: 7.0454 mm
Method: Ilie DPS

TMA

File: J:\bares\PLA210.001
Operator: PV
Run Date: 21-Apr-2020 14:03
Instrument: TMA Q400 V22.5 Build 31

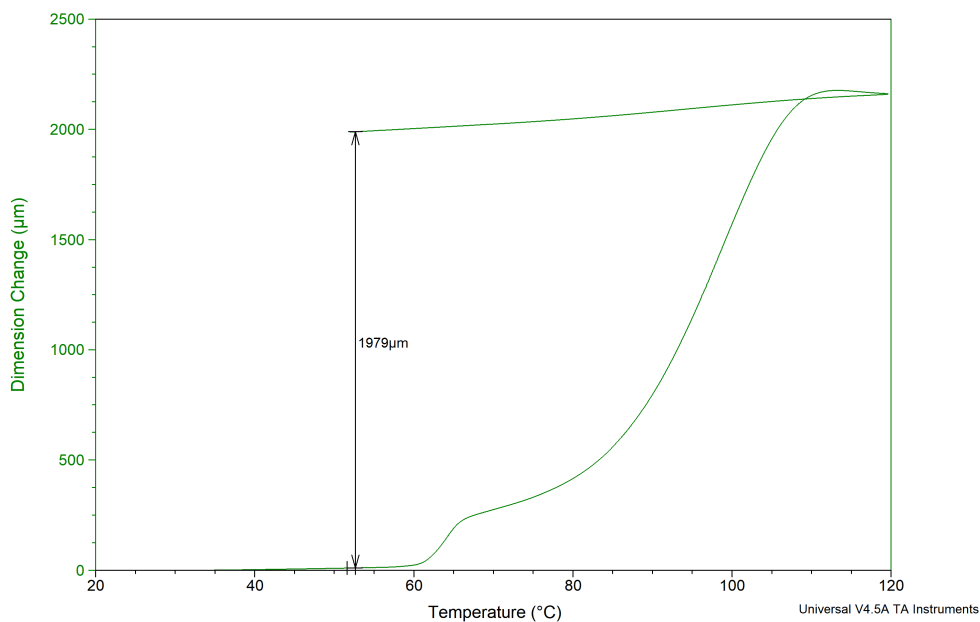


Obrázek 5.11: Příklad určení délkových teplotních roztažností. Vyrobeno pomocí TA Universal Analysis.

Sample: PLA210
Size: 7.0454 mm
Method: Ilie DPS

TMA

File: J:\bares\PLA210.001
Operator: PV
Run Date: 21-Apr-2020 14:03
Instrument: TMA Q400 V22.5 Build 31



Obrázek 5.12: Příklad určení změny rozměru vzorku po ohřátí na 120 °C. Vyrobeno pomocí TA Universal Analysis.

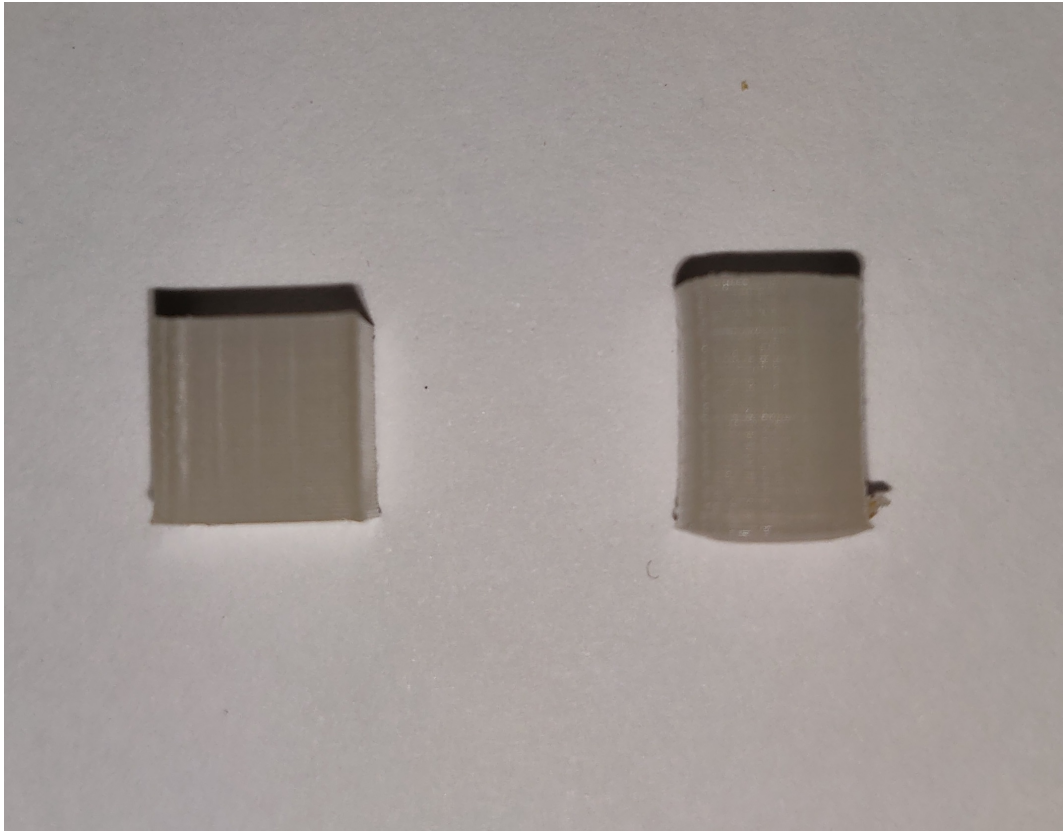
| | PLA 210 | PLA 240 | SLA40/8 | SLA40/16 |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Teplota skelného přechodu T_g [$^{\circ}C$] | $60,8 \pm 0,5$ | $62,1 \pm 0,9$ | $46,0 \pm 2,1$ | $47,4 \pm 2,0$ |
| Teplotní délková roztažnost pod T_g α_1 [$\mu m/m^{\circ}C$] | $90,8 \pm 9,5$ | $90,1 \pm 2,8$ | 160 ± 10 | 142 ± 16 |
| Teplotní délková roztažnost nad T_g α_2 [$\mu m/m^{\circ}C$] | 6896 ± 219 | 3487 ± 391 | 431 ± 25 | 581 ± 19 |
| Změna rozměru vlivem krystalizace Δ [μm] | 2108 ± 91 | 942 ± 51 | - | - |

Tabulka 5.4: Přehledová tabulka průměrných hodnot termomechanické analýzy. U vzorků z resinu (značeno SLA40/8 a SLA40/16) studená krystalizace neprobíhá a proto jsou příslušná pole tabulky nevyplněna.

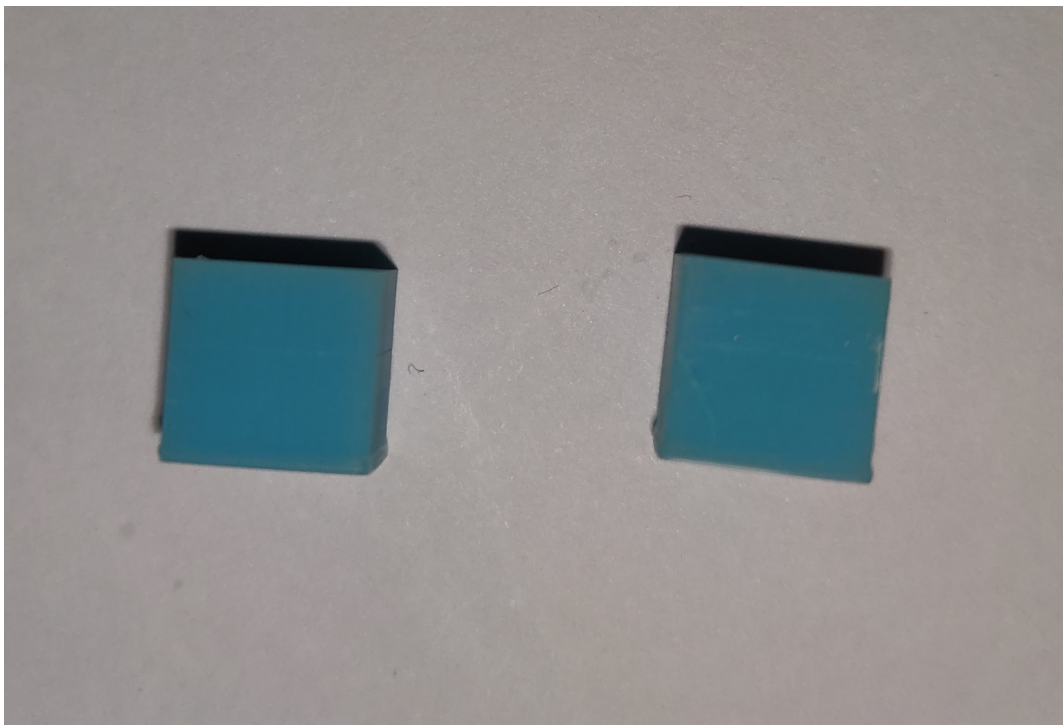
Datasheet PLA udává teplotu skelného přechodu 55 až 60 $^{\circ}C$ [26]. Naměřené hodnoty 5.4 a to teploty 60,8 $^{\circ}C$ pro vzorky tištěné při teplotě 210 $^{\circ}C$ a 62,1 $^{\circ}C$ pro vzorky tištěné při teplotě 240 $^{\circ}C$. Lze říci, že změřený výsledek odpovídá hodnotě v datasheetu. Tabulkové hodnoty vlastností vytvrzeného resinu nejsou dostupné. Proto je možné provést pouze vzájemné porovnání materiálů. Vytvrzený resin má změřené hodnoty nižší než PLA. Konkrétně 46 $^{\circ}C$ pro vzorky osvětlené 8 s a 47,4 $^{\circ}C$ pro vzorky osvětlené 16 s. Z toho bychom mohli soudit že doba osvitů mírně ovlivňuje teplotu skelného přechodu. Rozdíl teplot je však malý a pro průkazné výsledky by bylo nezbytné provést více měření.

Vzorky se tepelně roztahují pod i nad teplotou skelného přechodu. Z měření vyplývá, že se polymery nad teplotou skelného přechodu roztahují více než pod teplotou skelného přechodu. Pod teplotou skelného přechodu se PLA roztahuje méně než resin, nad teplotou výrazně více. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.4.

Studená krystalizace probíhá pouze u některých materiálů [42]. To je potvrzeno provedenými měřeními, kde měřitelnou změnu rozměru pozorujeme pouze u vzorků PLA. Další poznatek je, že materiál během tisku krystalizuje více, pokud je tisknut za vyšší teploty. To může být způsobeno tím, že během tisku materiál, poté co je extrudován, déle chladne a tím dává více času růstu krystalů.



Obrázek 5.13: Foto vzorku PLA tištěného při teplotě 210 °C. Vzorek na obrázku vlevo TMA zkouškou neprošel. Vzorek na obrázku vpravo již prošel termickou analýzou.



Obrázek 5.14: Foto vzorku resinu osvíceného 8 s. Vzorek na obrázku vlevo TMA zkouškou neprošel. Vzorek na obrázku vpravo již prošel termickou analýzou.

6. Rozšíření teoretických poznatků o výsledky měření

Teoretické úvahy týkající se použitých technologií a 3D tisku v elektrotechnice jsou uvedeny v kapitolách 2.1, 2.2 a 2.8. Zde budou tyto poznatky rozšířeny o závěry z provedených měření.

Dle kapitol zabývajících se jednotlivými 3D technologiemi, kde jsme se podrobně seznámili právě s technologiemi FFF a SLA, je tisk na tiskárně používající technologii FFF pomalejší než na tiskárně používající technologii SLA. Toto sice nebylo přesně měřeno, slicer však dává informaci o předpokládané době tisku. Ty jsou následující. Odhad doby tisku jednoho vzorku na tiskárně FFF je $16 \text{ min } 32 \text{ s}$ a odhad doby tisku jedenácti vzorku na tiskárně SLA je $21 \text{ min } 4 \text{ s}$. Tedy odhadovaná doba tisku jedenácti vzorků na tiskárně FFF je $16 \text{ min } 32 \text{ s} \times 11 = 181 \text{ min } 52 \text{ s}$. Sice se jedná o odhadované doby tisku, ale rozdíl mezi nimi je velký. Pro prototypování není doba tisku rozhodujícím faktorem. Pokud bychom však technologie uvažovali pro sériovou výrobu elektrotechnických součástek, tak důležitost tohoto faktoru stoupá. Tedy pokud uvažujeme sériovou výrobu, tak technologie FFF není vhodná.

Kvalitu povrchů rovnou po tisku je možné pomocí měření potvrdit. V kapitolách, které byly zaměřeny na technologie FFF a SLA, jsou zmíněny kvality povrchů rovnou po tisku. Je zmíněno, že kvalita povrchu vzorku rovnou po tisku FFF tiskárny není dobrá a často vyžaduje další zpracování jako je například broušení. Ohledně kvality povrchu vzorku po tisku, respektive po mytí v isopropylalkoholu a vytvrzování UV zářením, je zmíněno, že je dostatečná pro většinu použití. To lze potvrdit měřením. Vzorky SLA mají jisté nerovnosti, ale měření tvrdosti bylo možné provést bez obtíží. Vzorky vytištěné na tiskárně FFF měly z jedné strany kvalitu povrchu takovou, že nebylo možné provést měření tvrdosti. Ze strany druhé měl povrch kvalitu lepší, ale bylo nutné si dobře vybrat místo k měření. V elektrotechnice konkrétní požadavky na kvalitu povrchu, závisí na účelu a viditelnosti výtisku. Rozhodnutí o vhodnosti technologií tedy není snadné.

Dále ke konkrétním výsledkům měření provedených pro účely této práce. Termomechanická analýza ukázala, že měřené materiály mají nízkou hodnotu teploty skelného přechodu. To může být při použití v elektrotechnice mimo laboratoř nežádoucí. Například je obecně známo, že v automobilech v létě na slunci může být teplota vysoká. Součástky vyrobené těmito metodami (respektive z těchto konkrétních materiálů) změknou a ztratí svou pevnost. Dále konkrétně u PLA, probíhá nad teplotou skelného přechodu studená krystalizace, která mění rozměry součástky. To v elektrotechnice také může být nežádoucí.

Měření na trhačce ukázalo, že pokud navrhujeme součástky pro výrobu technologií FFF, tak nemůžeme brát v potaz tabulkové vlastnosti materiálu. Musíme počítat s nedokonalostmi součástky, které jsou vnesené její výrobou. Konkrétně se jedná o nedokonalou adhezi vrstev. Takového omezení u výrobků SLA neplatí.

7. Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat rešerši na tematiku technologie 3D tisku se zaměřením na technologie SLA a FFF a seznámit se s materiály používanými těmito technologiemi, shrnout jejich výhody, nevýhody a technologie porovnat. K tomu byly navrženy experimenty pro ověření mechanických a termomechanických vlastností materiálů po tisku. Posledním bodem zadání bylo experimenty vyhodnotit, porovnat jednotlivé technologie na základě výsledků a zhodnotit využití technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu.

Rešerše byla zpracována na začátku této práce. Obsahuje různé technologie 3D tisku a jejich využití s detailnějším zaměřením na technologie FFF (známou také jako FDM) a SLA, respektive MSLA která se od dříve zmíněné SLA liší způsobem osvitů resinu. Na základě této rešerše je provedeno porovnání zmíněných technologií. Významným výstupem tohoto porovnání je, že tiskárny používající technologii FFF oproti tiskárnám s technologií SLA tisknou pomaleji a na výstupu mají horší povrch výtisku. Jsou ale levnější a použité materiály mohou být biologicky rozložitelné.

Byly provedeny experimenty pro ověření mechanických vlastností materiálu po tisku. Ukázalo se, že použitá tiskárna Original Prusa i3 MK3/S zanechává uvnitř vzorku stopu cesty trysky. Materiál se totiž dokonale nespojí s materiálem již naneseným a má tak snahu se dělit „mezi vrstvami“. Tyto stopy jsou zřetelné i na povrchu výtisku. To ovlivnilo měření tvrdosti z jedné strany vzorku (spodní) a znemožnilo měření ze strany druhé (horní). Ze strany, která byla během tisku směrem nahoru byla kvalita povrchu nedostačující a nebylo možné vytvořit dobrý otisk hrotu tvrdoměru. Tento nedostatek by bylo možné během případné výroby odstranit dalšími kroky jako je například broušení. Při měření na trhačce se pak projevilo nedokonalé spojení vrstev materiálu uvnitř vzorku. Hodnoty maximálního relativního prodloužení a modulu pružnosti vzorků vytištěných, neodpovídají hodnotám uváděným výrobcem (viz. tabulka 5.3), který pro svá měření použil vzorky jednolitě. Na vzorcích vytištěných pomocí technologie MSLA podobné nedostatky nebyly pozorovány. Vrstvy jsou osvětčovány najednou a tedy není možné, aby docházelo k podobným nedostatkům. Je možné, že kdybychom během tisku změnili orientaci vzorů vůči tiskové podložce, tak by se vliv vrstvení projevil.

Měření na tvrdoměru ukázalo, že u technologie SLA tvrdost závisí na době osvitů vrstvy. Vrstvy osvětčené 8 s mají průměrnou tvrdost $9,59 \text{ kgf/mm}^2$. Dále vrstvy osvětčené 40 s mají hodnotu tvrdosti až 20 kgf/mm^2 . Na trhačce byla provedena měření, ze kterých byly vypočítány hodnoty maximálního relativního prodloužení, modulu pružnosti a pevnosti v tahu. Vzorky v vytvrzeného resinu byly nataženy více, než vzorky z PLA, ale nezávisle na parametru osvětčení. Vzorky z PLA měly lehce rozdílné hodnoty. Rozdíl byl vysvětlen vnitřní strukturou, která byla lépe spojena u vzorků tištěných při vyšší teplotě. Vzorky z resinu byly nataženy přibližně o 25 %, kdežto vzorky z PLA o 19 % nezávisle na teplotě tisku. Jak již bylo zmíněno dříve, tak hodnota maximálního relativního prodloužení a modulu pružnosti z našich měření neseď s hodnotou výrobce materiálu. To je vysvětleno rozdílnou metodou výroby vzorku. Dále modul pružnosti je vyšší u vzorků z PLA než u vzorků z resinu. Nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorků z PLA tištěných při teplotě $240 \text{ }^\circ\text{C}$ (323 MPa) a nejnižší u vzorků z resinu osvětčovaných 16 s (176 MPa). Pevnost v tahu byla naměřena nejnižší u vzorků z resinu osvětčovaných 16 s ($33,5 \text{ MPa}$). Nejvyšší hodnota byla určena u vzorků z PLA tištěných při teplotě $210 \text{ }^\circ\text{C}$ a to $59,1 \text{ MPa}$. Hodnoty pevnosti v tahu měřených vzorků odpovídají hodnotám výrobce.

Poslední provedený experiment je termomechanická analýza. Pomocí té byla určena teplota skelného přechodu a teplotní délková roztažnost pod i nad teplotou skelného přechodu. Z výsledků vyplývá, že teplota skelného přechodu není závislá na parametrech tisku. Materiál PLA má teplotu skelného přechodu $62,1^{\circ}\text{C}$. Vytvrzený resin má teplotu skelného přechodu $47,4^{\circ}\text{C}$. Délkové teplotní roztažnosti byly u všech vzorků pozorovány rozdílné pod a nad teplotou skelného přechodu. Pod teplotou skelného přechodu je PLA nezávislé na teplotě tisku a hodnota teplotní délkové roztažnosti je $90,1\ \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$. Zdá se, že tento parametr u vytvrzeného resinu není úplně nezávislý na době osvitů vrstvy. Parametr byl určen na $160\ \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ pro vzorek osvětlený $8\ \text{s}$ a $142\ \mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ pro druhý vzorek. Dále vzorky resinu se po ohřátí nad teplotu skelného přechodu roztahovaly více. Dále byl u materiálu PLA během tohoto měření pozorován jev studené krystalizace. Ta způsobila trvalou změnu rozměru vzorku. Změna je závislá na teplotě tisku. Vzorky z PLA tištěné při teplotě 210°C změnilly svou výšku o $2,1\ \text{mm}$. Vzorky tištěné při teplotě 240°C změnilly svou výšku méně ($0,9\ \text{mm}$). To je způsobeno právě teplotou tisku, kdy vzorky tištěné při vyšší teplotě chladnou déle a materiál tak má více času na růst krystalů.

Použití 3D tisku v elektrotechnice je široké. V rešeršní části práce bylo uvedeno několik příkladů použití. Nejjednodušší z nich je prototypování, ale existují i případy, kde jsou vlastnosti 3D tisku využity unikátním způsobem. Takovým příkladem je tisk organických tenkovrstvých tranzistorů nebo tisk desek plošných spojů. Provedené experimenty však ukazují, že je nutné si vhodně zvolit jak technologii tisku tak i materiál, který je tištěn.

8. Použité zkratky

| | |
|-----------|---|
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| ASA | Akrylonitril styren-akrylát |
| CAD | Computer aided design |
| DCS | Diferenciální skenovací kalorimetrie |
| DLP | Digital light processing |
| FDM | Fused deposition modeling |
| FFF | Fused filament fabrication |
| LCD | Liquid crystal display |
| LED | Light emitting diode |
| MSLA | Masked stereolitografie |
| OTFT | Organický tenkovrstvý tranzistor |
| PCB | deska plošných spojů |
| PEEK | Polyether Ether Ketone |
| PEI | Polyether Imide |
| PETG | Glykolem modifikovaný polyethyltereftalát |
| PLA | Kyselina polylaktónová |
| SLA | Stereolitografie |
| SLS | Selective laser sintering |
| TMA | Termomechanická analýza |
| UV záření | Ultrafialové záření |

Bibliografie

1. FINK, J. K. *3D Industrial Printing with Polymers*. Scrivener Publishing, 2019. ISBN 978-1-119-55526-1.
2. *RepRap* [online] [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
3. *Prusa Research a.s. - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online] [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/o-nas/>. Library Catalog: www.prusa3d.cz.
4. REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.
5. CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design* [online]. 2017, roč. 124, s. 143–157 [cit. 2020-04-06]. ISSN 0264-1275. Dostupné z DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
6. *Original Prusa i3 MK3 3D Printer* [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html>. Library Catalog: shop.prusa3d.com.
7. *Průša - Slicer* [online] [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/ovladace/>.
8. *Overheating troubleshooting* [online] [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/overheating/>.
9. *Průša - špatné přemostění* [online]. 2019-01 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/poor-bridging/>. Library Catalog: www.prusa3d.cz - Section: Troubleshooting.
10. *Polymer Properties Database - PLA* [online] [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PLA.html>.
11. *Polymer Properties Database - ABS* [online] [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/ASB.html>.
12. *Polymer Properties Database - ASA* [online] [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/ASA.html>.
13. *Polymerplastics - PETG* [online] [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://www.polymerplastics.com/transparents_petg.shtml.
14. *Polymer Properties Database - PEI* [online] [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEI.html>.
15. WU, Wenzheng; GENG, Peng; LI, Guiwei; ZHAO, Di; ZHANG, Haibo; ZHAO, Ji. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015, roč. 8, č. 99, 5834–5846. Dostupné z DOI: 10.3390/ma8095271.
16. *Filamenty - Prusa Research* [online] [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/en/16-filament?orderBy=name&orderway=asc&id_category=16&n=106.

17. FLOWERS, Patrick F.; REYES, Christopher; YE, Shengrong; KIM, Myung Jun; WILEY, Benjamin J. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. *Additive Manufacturing*. 2017, roč. 18, 156–163. ISSN 2214-8604. Dostupné z DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.002.
18. *SLA vs FDM printing - All3DP* [online] [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/sla-vs-fdm-is-resin-3d-printing-faster/>.
19. *Original Prusa SL1 3D tiskárna + Mycí a vytvrzovací stanice* [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/721-original-prusa-sl1-3d-tiskarna-myci-a-vytvrzovaci-stanice.html>. Library Catalog: shop.prusa3d.com.
20. *Prusa Knowledgebase - Warped layers SL1* [online] [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/en/article/warped-layers-sl1_1796.
21. FU, Ping; NEKHAYEV, Dmitry; EDELSBRUNNER, Herbert. *Manufacturing methods and systems for rapid production of hearing-aid shells* [online]. 2006 [cit. 2020-02-26]. Č. US7050876B1. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US7050876B1/en>.
22. SARCAR, M. M. M.; RAO, K. MALLIKARJUNA; NARAYAN, K. LALIT. *Computer Aided Design and Manufacturing*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. ISBN 978-81-203-3342-0. Google-Books-ID: zXdivq93WIUC.
23. *Fusion 360 | Free Software for Students and Educators | Autodesk* [online] [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>.
24. *Slicer | Fusion 360 | Autodesk App Store* [online] [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://apps.autodesk.com/FUSION/en/Detail/Index?id=8699194120463301363&os=Win64&appLang=en>.
25. *Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-form Deformation* [online]. 2016 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.078.
26. *Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet* [online] [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf?la=en.
27. *Markforged - porovnání FDM a SLA* [online] [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://markforged.com/blog/fdm-vs-sla/>.
28. *SLA_RESIN_SAFETY_SHEET_TOUGH.pdf* [online]. Prusa Research [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/resiny/938-seda-pryskyrice-tvrda-1kg.html>.
29. VESELÝ, P; TICHÝ, T; ŠEFL, O; HORYNOVÁ, E. Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, roč. 461, s. 012091. Dostupné z DOI: 10.1088/1757-899x/461/1/012091.
30. DIMENSION, Nano. *Nano Dimension — 3D printing applications for multi-layer PCBs* [online] [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.nano-di.com/3d-printing-applications-for-multi-layer-pcbs>.
31. DIMENSION, Nano. *Nano Dimension — 3D printing applications for electronic sensors* [online] [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.nano-di.com/3d-printing-applications-for-sensors>.
32. PAUL, Kateri; WONG, William; READY, Steven; STREET, Robert. Additive Jet Printing of Polymer Thin-Film Transistors. *Applied Physics Letters*. 2003, roč. 83, s. 2070–2072. Dostupné z DOI: 10.1063/1.1609233.
33. HENARES, Terence G.; YAMADA, Kentaro; SUZUKI, Koji; CITTERIO, Daniel. Inkjet Printing of Biomolecules for Biorecognition. In: *Design of Polymeric Platforms for Selective Biorecognition*. Ed. RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Juan; CORTAJARENA, Aitziber L. Springer International Publishing, 2015, 197–235. ISBN 978-3-319-17061-9. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-17061-9_8.

34. FISCHER-CRIPPS, Anthony C. *Introduction to Contact Mechanics, Second Edition (Mechanical Engineering Series)*. New York: Springer, 2007. ISBN 0-387-68187-6.
35. COMMITTEE, E04. *Test Method for Microindentation Hardness of Materials* [online] [cit. 2020-02-18]. Dostupné z DOI: 10.1520/E0384-17.
36. JIŘÍ, Bureš. *Vickers - tvrdost podle Vickerse* [online]. 2002 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>.
37. DOC. ING. VILÉM KOBLÍŽEK, CSC. *Materiály pro výkonovou elektrotechniku*. Fakulta elektrotechnická Technická 2 166 27 Praha 6 - Dejvice, 2017.
38. *EngArc - L - Tensile Test* [online] [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html.
39. ŠTOLL, Ivan. *Mechanika* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010 [cit. 2019-12-20]. ISBN 978-80-01-04554-1.
40. MILAN ČERVENKA, ILONA ALI BLÁHOVÁ. *Laboratorní úloha Měření teplotního součinitele délkové roztažnosti*. 2015.
41. MENCZEL, Joseph D.; PRIME, R. Bruce. *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-471-76917-0. Google-Books-ID: qEuQDwAAQBAJ.
42. DOC. ING. IRENA PROKOPOVÁ, CSc. *Makromolekulární chemie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
43. PETRUCHA, Bc. Roman. *NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY ŠNEKOVÉHO SOUKOLÍ Z PLASTU*. 2017. Dis. Vysoké učení technické v Brně.
44. *PLA Crystal Clear "Transparent" 750g* [online]. Prusa Research [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/en/filament/189-pla-crystal-clear-transparent-750g.html>.
45. *ABS | Ultimaker | Datasheet* [online] [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <http://ultimaker.com/en/resources/49912-abs>.
46. *Azurově modrá pryskyřice (tvrdá)* [online] [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/resiny/937-azurove-modra-pryskyrice-tvrda-1kg.html>.
47. *Standard Tensile Test ASTM D638 Specimen Type I - V (1-5) by znanzhu* [online] [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2332080>.
48. *DuraScan G5* [online] [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.emcotest.com/en/products-services/hardness-testing-machines/durascan-g5/>. Library Catalog: www.emcotest.com.
49. *Trhacka.cz - Trhačka DEFORM 02 - přenosné zkušební deformační zařízení* [online] [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/text-trhacka-deform-02-prenosne-zkusebni-deformacni-zarizeni>.
50. *Q400 TMA* [online] [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.tainstruments.com/q400/>. Library Catalog: www.tainstruments.com.