

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Posouzení anizotropie struktur vyrobených aditivní technologií

Evaluation of Anisotropy of Structures Prepared by Additive Manufacturing

Bakalářská práce

2020

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

Markéta Klimtová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klimtová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **474589**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Posouzení anizotropie struktur vyrobených aditivní technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Evaluation of Anisotropy of Structures Prepared by Additive Manufacturing

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.
2. Navrhněte a proveďte experiment pro ověření anizotropie vytištěných struktur z hlediska mechanických a termomechanických vlastností.
3. Výsledky experimentu vyhodnoťte, zhodnoťte anizotropii struktur a srovnajte jednotlivé technologie, zhodnoťte využití technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu.
4. Proveďte ekonomické zhodnocení investice do technologie 3D tisku, srovnajte FFF a SLA.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Redwood, F. Schöffer, 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. Střiteský, 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: **13.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

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

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci Posouzení anizotropie struktur vyrobených aditivní technologií vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Chtěla bych poděkovat Ing. Petrovi Veselému za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Děkuji také Ing. Lukášovi Dvořáčkovi za pomoc při psaní ekonomické části.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá posouzením anizotropie struktur vytvořených 3D tiskem a ekonomickým zhodnocením těchto technologií se zaměřením na Fused Filament Fabrication (FFF) a stereolitografii (SLA). V první části jsou vzorky vytištěné těmito technologiemi podrobeny mechanické zkoušce v tahu a termomechanické analýze. Výsledky těchto experimentů jasně ukazují u vzorků vytištěných na FFF tiskárnách vyšší míru anizotropie oproti SLA výtiskům. V případě termomechanické analýzy je rozdíl v anizotropii znatelnější než u výsledků mechanické zkoušky v tahu. Výsledek této práce by mohl být brán v potaz při navrhování modelů, aby finální produkt měl co nejlepší vlastnosti.

Ekonomická část bakalářské práce se zaměřuje na kalkulaci investičních a provozních nákladů FFF a SLA tiskáren. Investice do FFF tiskáren se ukázala ve všech provedených scénářích finančně výhodnější než SLA technologie.

Abstract

This bachelor thesis focuses on the evaluation of the anisotropy of the structures made by 3D printing and economic evaluation of these technologies, in particular Fused Filament Fabrication (FFF) and Stereolithography (SLA). In the first part, the specimens printed by these two technologies were subjected to tensile testing and thermomechanical analysis. The results from both measurements clearly showed a higher level of anisotropy of the FFF process compared to SLA. In the case of the thermomechanical analysis, the difference in anisotropy is more apparent than in the tensile testing. The outcome of this work can be taken into account while designing a model so the final product will display the best properties possible.

The economic part of the thesis calculates the investment and operation costs of FFF and SLA printers. Investment in FFF printers in all carried out scenarios turned out to be lower than SLA technology.

Klíčová slova

Aditivní výroba, 3D tisk, anizotropie, FFF technologie, stereolitografie, mechanická zkouška tahem, termomechanická analýza, kalkulace investičních a provozních nákladů tisku

Key words

Additive manufacturing, 3D printing, anisotropy, FFF technology, stereolithography, tensile testing, thermomechanical analysis, calculation of printing investment and operation costs

Obsah

Úvod.....	8
1 Aditivní výroba	9
1.1 Metoda FFF (<i>Fused Filament Fabrication</i>)	10
1.1.1 Části.....	11
1.1.2 Materiál	12
1.1.3 Princip FFF.....	14
1.2 Metoda SLA (<i>Stereolitografie</i>)	15
1.2.1 Části.....	15
1.2.2 Mycí a vytvrzovací linka CW1	16
1.2.3 Princip MSLA	17
1.2.4 Materiál	18
1.3 Využití aditivní technologie v elektrotechnice	18
2 Posouzení anizotropie.....	22
2.1 Popis experimentů.....	22
2.1.1 Použité materiály.....	22
2.1.2 Mechanická zkouška v tahu	23
2.1.3 Termomechanická analýza (TMA)	27
2.2 Výsledky experimentu.....	31
2.2.1 Výsledky mechanické zkoušky v tahu	31
2.2.2 Výsledky termomechanické analýzy.....	36
2.3 Vyhodnocení anizotropie.....	40
3 Ekonomické porovnání FFF a SLA technologie.....	42
3.1.1 NPV.....	42
3.1.2 Anuita.....	43
3.1.3 EAC.....	43
3.2 Investiční náklady	43
3.3 Provozní náklady.....	45
3.3.1 Náklady na tisk.....	45
3.3.2 Náklady na údržbu	46
3.3.3 Náklady na obsluhu tiskáren	47
3.3.4 Náklady na spotřebu energie	47
3.4 Porovnání nákladů stejného výrobku při tisku FFF a SLA	50
3.4.1 Zmetkovitost	54
3.4.2 Vyhodnocení	55
Závěr.....	57
Seznam příloh	59
Seznam použité literatury.....	60
Seznam obrázků	64
Seznam tabulek.....	65

Úvod

3D tisk (aditivní výroba) je proces, během kterého se z digitální předlohy vytvoří reálný model. Svůj původ má v Japonsku v 80. letech, kdy Hideo Kodama předvedl poprvé tisk tří dimenzionálního modelu pomocí UV světla. Zanedlouho nato, v roce 1984, Charles W. Hull patentoval tuto technologii pod názvem SLA (Stereolithography), ta byla následována metodou FFF (Fused Filament Fabrication) patentovanou v roce 1988. V této době byla nová technologie 3D tisku kvůli vysoké ceně a nízké dostupnosti využívána především firmami [1].

Postupem času se však 3D tisk dostával více mezi širší veřejnost. V roce 2005 vznikl open source projekt RepRap, jehož cílem bylo vytvořit takovou tiskárnu, která by si sama dokázala replikovat součástky. Pak v roce 2009 vypršel patent na technologii FFF a výrobci začali prodávat cenově dostupnější tiskárny [1].

V dnešní době existuje mnoho metod aditivní výroby. V této práci se zaměřím na porovnání dvou z nich, a to FFF (Fused Filament Fabrication) a SLA (Stereolithography). Technologie budeme porovnávat jak z hlediska anizotropie výtisků (nestejných vlastností v závislosti na směru měření), tak i z hlediska ekonomického.

Technická část bude zaměřená na dvě zkoušky, mechanickou zkoušku v tahu a termomechanickou analýzu. U mechanické zkoušky v tahu se bude zkoumat pevnost vytištěných vzorků a ostatní parametry týkající se mechanických vlastností v tahu. U termomechanické analýzy se bude vzorek tepelně namáhat a budou pozorovány změny v deformaci vzorku. Předpokládám, že vytištěné objekty budou mít určitou míru anizotropie vzhledem k tomu, že jde o aditivní výrobu, kdy objekt vzniká postupným přidáváním vrstev.

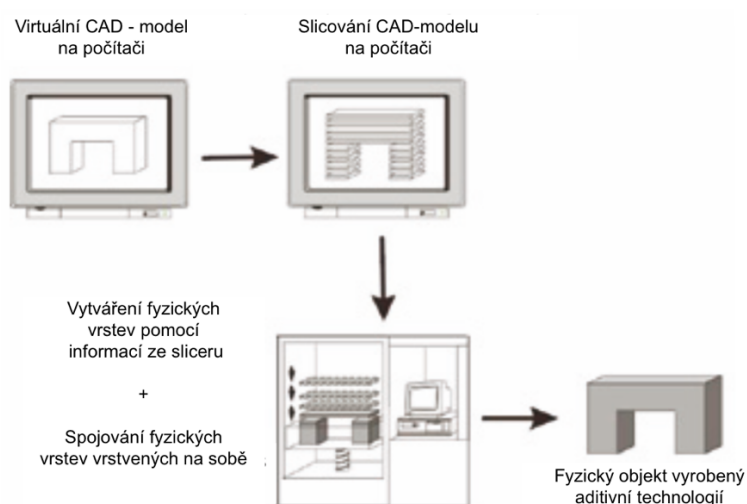
V ekonomické části porovnáám náklady na obě technologie, jak investiční, tak i provozní. Zhodnotím velikost vstupních investic, náklady na provoz jako jsou energetická spotřeba, údržba, obsluha tiskáren, životnost, náklady na materiál, náhradní díly atd.

1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je synonymem k dnes stále více populárnímu 3D tisku. Dříve byla také nazývána rapid prototyping, jelikož tento způsob výroby byl vhodný k rychlému a relativně levnému vytváření prototypů. Stále více se nacházejí i jiná využití než pouze výroba prototypů, proto se od tohoto pojmenování ustupuje. Ostatní typy výroby (subtraktivní – obrábění, formativní – odlévání) vyžadují pečlivou a detailní analýzu objektu, aby mohl být určen přesný postup výroby [2].

Aditivní výroba spočívá v postupném vrstvení materiálu až do vytvoření celého objektu. Každá vrstva je průřezem dané části objektu. Jelikož vrstva nemůže být nekonečně tenká, bude finální výrobek vykazovat většinou známky nanášených vrstev. Čím tenčí vrstva bude, tím se bude finální výrobek podobat prvotnímu modelu. Výhodou aditivní výroby je možnost zhotovení téměř jakýchkoliv tvarů. Naopak nevýhodou je jisté omezení v materiálech, které lze použít [2].

Celý proces začíná vytvořením digitálního modelu. Model, který chceme vytvořit, je nutné mít převeden do počítače a uložen nejlépe ve formátu STL. Převádět se může například skenováním objektu nebo přímo vytvořením daného objektu v některém z dostupných programů CAD. Následně je model rozdělen na jednotlivé vrstvy tzv. slicováním. Programu, v kterém k tomuto dochází, se říká slicer. Při slicování dochází k převodu na formát G-code, který je pro výrobní stroje (tiskárny) čitelný. Ve sliceru se dají nastavit i různé parametry tisku, které jsou pro jiné typy materiálu a tiskáren různé, a je proto nutné pro každý typ nastavovat parametry a „slicovat“ znovu [3, 4].

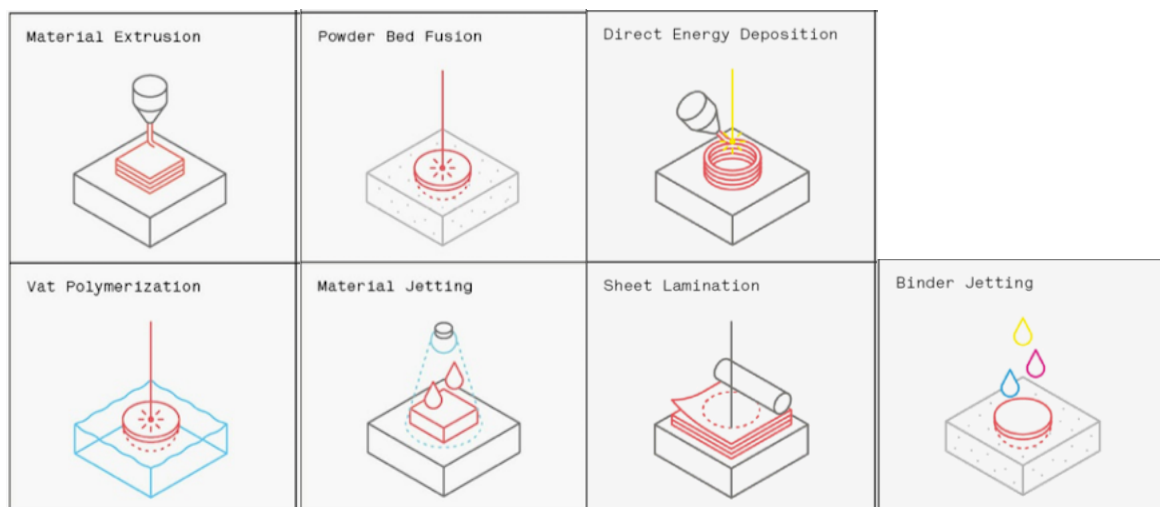


Obrázek 1 Aditivní výroba. Převzato z [3]

Technologie aditivní výroby se rozdělují do sedmi kategorií. Tyto technologie se liší především v použitém materiálu, metodě vzniku vrstev a jejich vzájemném spojení. Na tom pak závisí přesnost výroby, vlastnosti výrobku, doba výroby, následná úprava výtisků i náklady na výrobu [5].

Asi nejnámější technologie Material Extrusion je založena na vytlačování roztaveného materiálu, který vzápětí tuhne. Do této výroby spadá i FFF (Fused Filament Fabrication), výroba roztaveným vláknem. Dalším výrobním procesem je Vat Polymerization, do které spadá technologie SLA (stereolitografie). Jeho princip spočívá ve vytvrzování tekutého fotopolyméru (látka měnící své vlastnosti po vystavení záření) [5].

Mezi ostatní kategorie, do kterých se dělí aditivní výroba, patří Powder Bed Fusion (selektivní tavení vrstvy prášku tepelným paprskem), Material Jetting (postupné naprašování materiálu na podložku, který je neprodleně vytvrzen), Binder Jetting (naprašování kapaliny jako pojidla na určitá místa práškové vrstvy), Direct Energy Deposition (tavení materiálu během jeho nanášení) a Sheet Lamination (vrstvení celých plátů, které se vzápětí spojí) [5].



Obrázek 2 Kategorie aditivní výroby. Převzato z [5]

1.1 Metoda FFF (Fused Filament Fabrication)

Metoda FFF je známá i pod názvem FDM (Fused Deposition Modeling), který je ale registrovanou značkou společnosti Stratasys, proto není tolik používán [4].

FFF je nejrozšířenější technologií 3D tisku, která vytváří objekty vrstvením roztaveného plastu. Zjednodušeně můžeme říct, že jde o přesnější a komplexnější tavnou pistoli. Kvůli nízké ceně,

dostupnosti a jednoduchému ovládní je tato metoda velice oblíbenou a většinou se stane i první technologií 3D tisku, se kterou se člověk seznámí [4].

V této práci jsem pracovala s tiskárnou i3 MK3S od společnosti Prusa Research s.r.o., budu proto princip FFF tiskárny popisovat na tomto modelu. Komerční tiskárny od jiných výrobců však pracují na stejném principu a mají podobnou konstrukci, a lze tedy níže popsané informace aplikovat i na ně.



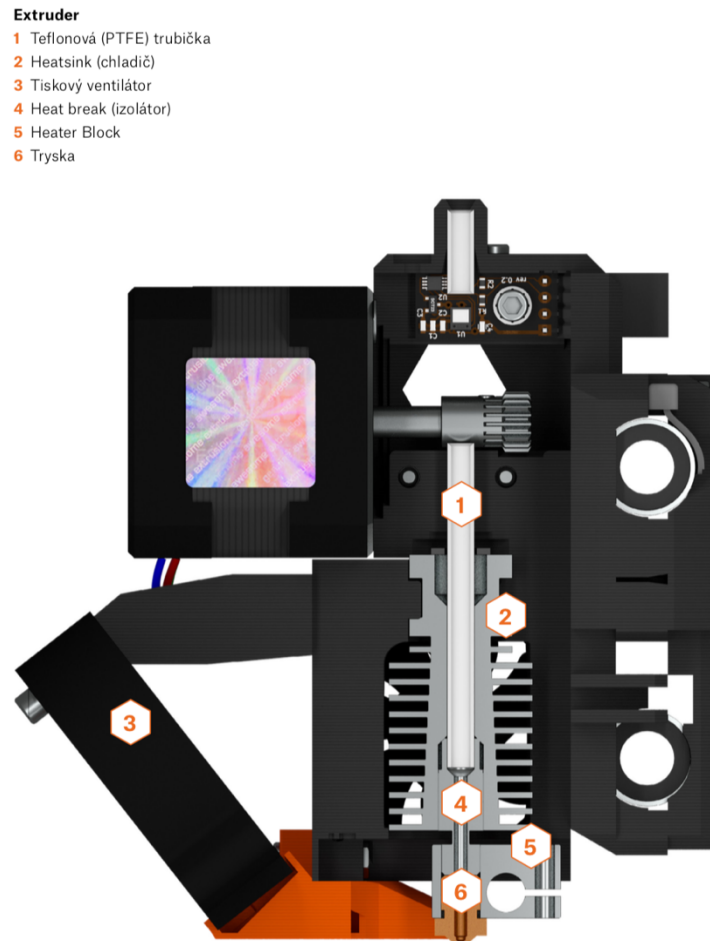
Obrázek 3 Tiskárna i3 MK3S. Převzato z [4]

1.1.1 Části

Tiskárna i3 MK3S se skládá z pevného rámu, na kterém je připojena tisková hlava (extruder) poháněná jedním z krokových motorů. Další krokové motory zajišťují pohyb podložky a podávání filamentu do tiskové hlavy. Tiskárna se ovládá pomocí řídicí jednotky [4].

Hlavní částí tiskárny je extruder, který slouží k tavení a nanášení filamentu. Filament prochází teflonovou trubičkou přes chladič (heatsink) do izolátoru (heat break). Chladič má za úkol odvádět teplo přicházející od izolátoru, aby přechodová oblast mezi pevným a roztaveným filamentem byla co nejmenší. Izolátor se postupně zužuje a navazuje na něj tryska, ze které je roztavený filament vytlačován ven. Na úrovni přechodu izolátoru a trysky je Heater Block, ve kterém se nachází termistor a topné těleso ohřívající materiál. Části, které se podílejí

na roztavení a zároveň chlazení filamentu, se nazývají Hotend. Aby se zabránilo ohýbání výtisků vlivem teplotní roztažnosti, je tisková podložka vyhřívána. Zároveň je magneticky připevněná, a nepotřebuje proto žádné složité upevnění [4, 5].



Obrázek 4 Extruder FFF tiskárny. Převzato z [4]

1.1.2 Materiál

Materiálem pro tisk na FFF tiskárně bývá termoplast ve formě struny (filamentu) většinou o průměru 1,75 mm v různých barevných provedeních. Existuje mnoho druhů plastů vhodných pro tisk, které mají odlišné vlastnosti (pevnost, pružnost, odolnost vůči chemikáliím či ostatním vlivům, teplotu tání). Platí, že čím vyšší je teplota nutná k tisku, tím komplikovanější je materiál pro tisk. Je totiž náchylnější ke kroucení a odlepování od podložky. Při volbě materiálu proto záleží hlavně na budoucím využití vytištěného objektu. Mezi nejčastěji používané termoplasty spadá ABS, ASA, PETG a PLA. ABS (Akrylonitril butadien styren) je první dostupný materiál pro tisk na bázi oleje, jehož nástupcem je ASA (Akrylonitril styren akrylát). Oba tyto materiály

jsou rozpustné v acetonu, je proto možné výtisky následně touto látkou vyhladit, nebo navzájem slepovat. Oproti ostatním zmíněným plastům má PLA (kyselina polyléčná) rostlinný původ v kukuřici, bramborách či cukrové třtině. PLA je proto biologicky rozložitelný a jsou spolu s PETG (Polyethylentereftalát obohacený o glykol) nezávadné při styku s potravinami. V následující tabulce jsou zmíněny hlavní vlastnosti těchto materiálů a doporučené teploty pro tisk s nimi [4–7] .

Tabulka 1 Vlastnosti filamentů.[2, 4–6]

ABS	+	Teplotní odolnost	Mechanická odolnost	Zdravotní nezávadnost	Chemická odolnost
	-	Smršťování při tisku	Závadné pro potraviny	Silné výpary	Odlepování od podložky
	Teplota extruderu: 220 - 275 °C		Teplota podložky: 100 - 130 °C		
PLA	+	Jednoduchý tisk	Detailní tisk	Rozpustný v NaOH	Nezapáchá
	-	Pevnost (křehký)	Teplotní odolnost (měkne při 60 °C)	Pohlčuje vzdušnou vlhkost	Špatné odstranění podpůrných částí
	Teplota extruderu: 150 - 210 °C		Teplota podložky: 0 - 60 °C		
ASA	+	Mechanická odolnost	Odolnost proti UV záření	Kvalita tisku	Teplotní odolnost
	-	Pohlčuje vzdušnou vlhkost	Kroucení	Odlepování od podložky	Silné výpary
	Teplota extruderu: 250 - 260 °C		Teplota podložky: 60 - 100 °C		
PETG	+	Chemická odolnost	Teplotní odolnost	Snadné broušení	Nezávadné pro potraviny
	-	Smršťování při tisku	Kroucení	Tendence stringovat	Silné výpary
	Teplota extruderu: 240 - 250 °C		Teplota podložky: 80 - 100 °C		

Mezi jiné typy materiálů patří například filament pod názvem FLEX, který se vyznačuje značnou ohebností (flexibilitou). Další materiál, složený z termoplastu a dodatečné prachové složky (dřevo, bronz, karbon), se nazývá kompozitní. Pro tisk s ním se doporučuje použití tvrzené trysky [4].



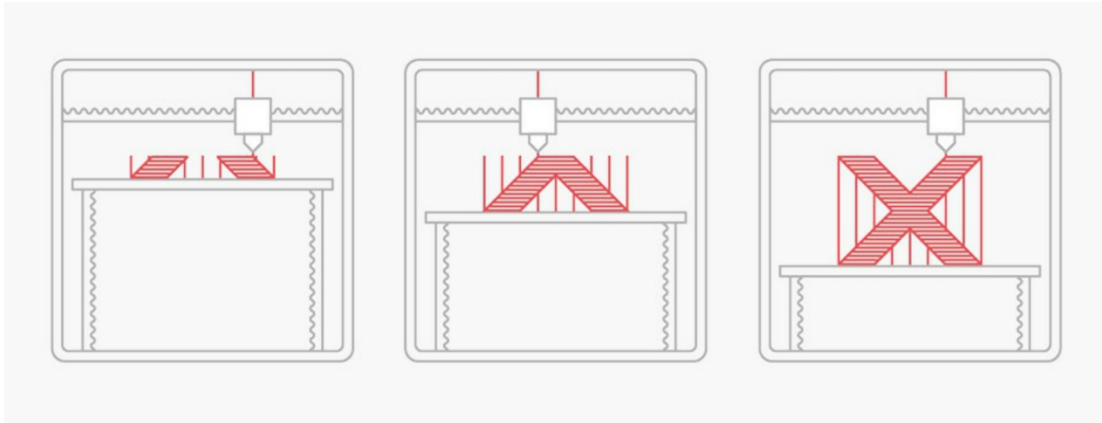
Obrázek 5 Termoplastové struny. Převzato z [8]

1.1.3 Princip FFF

Existuje více druhů tiskáren pro FFF technologii, které se liší v ovládní a pohybu tiskové hlavy či podložky. Tiskárna i3 MK3S je vytvořena na principu kartézských souřadnic, kdy dochází k pohybu částí ve třech osách X, Y, Z. Extruder se pohybuje ve směru XZ a podložka ve směru Y. Další známé typy tiskáren jsou tzv. polar tiskárna a delta tiskárna. Princip polar tiskárny spočívá v pohybu podle polárních souřadnic. Extruder se pohybuje pouze po ose Z a podložka se pohybuje ve směru další osy a zároveň rotuje. Delta tiskárna využívá tři ramen pohybuujících se po ose Z a na jejichž konci je zavěšený extruder. Princip tisku je pro výše zmíněné typy tiskáren stejný [4].

Po spuštění tisku se nejdříve začne ohřívat podložka a hotend na přednastavenou hodnotu podle použitého materiálu, tento proces trvá pár minut a poté začne samotný tisk. Pevný termoplast prochází extruderem, kde se taví a dále je vytlačován skrz tryčku ven. Je nanášen na podložku po vrstvách po předurčených cestách slicerem a opět tuhne. Nejkritičtější je tisk první vrstvy a její připevnění na podložku. Následující vrstvy už tak problematické nejsou. Nanášený materiál se totiž přichytí na předchozí vrstvu tak, že ji znovu rozehřeje, částečně roztaví, a dochází tedy k pevnějšímu spojení nové a předchozí vrstvy.

Po ukončení tisku je někdy vyžadována dodatečná úprava vytištěných objektů. Patří mezi ni například odstranění podpěr (pomocná struktura při složitějším tisku), vyhlazení viditelných vrstev či barvení.



Obrázek 6 Proces FFF tisku. Převzato z [5]

1.2 Metoda SLA (Stereolitografie)

Stereolitografie je metoda založená na vytvrzování a ztužení tekuté pryskyřice zářením. Existují tři technologie vytvrzování. První z nich využívá laser, který přes potřebná místa přejede, a tím se fotopolymer vytvrdí. Další způsob je tzv. DLP (Digital Light Processing), kdy je tisková vrstva osvětlena projektorem. Podobná tomu je třetí metoda MSLA (Mask Stereolithography), kdy se také osvětlí celá plocha, ale část vrstvy, kterou nechceme vytvrdit, je kryta maskou. První metoda je oproti ostatním dvěma poněkud pomalá, jelikož doba tisku závisí na složitosti a objemu tištěného objektu.

Pro praktickou část jsem používala tiskárnu SL1 od Průši, která je založena na principu MSLA, proto z dříve zmíněných popíšu podrobněji tuto. Všechny typy jsou ale založeny na podobném principu a tolik se od sebe neliší.

1.2.1 Části

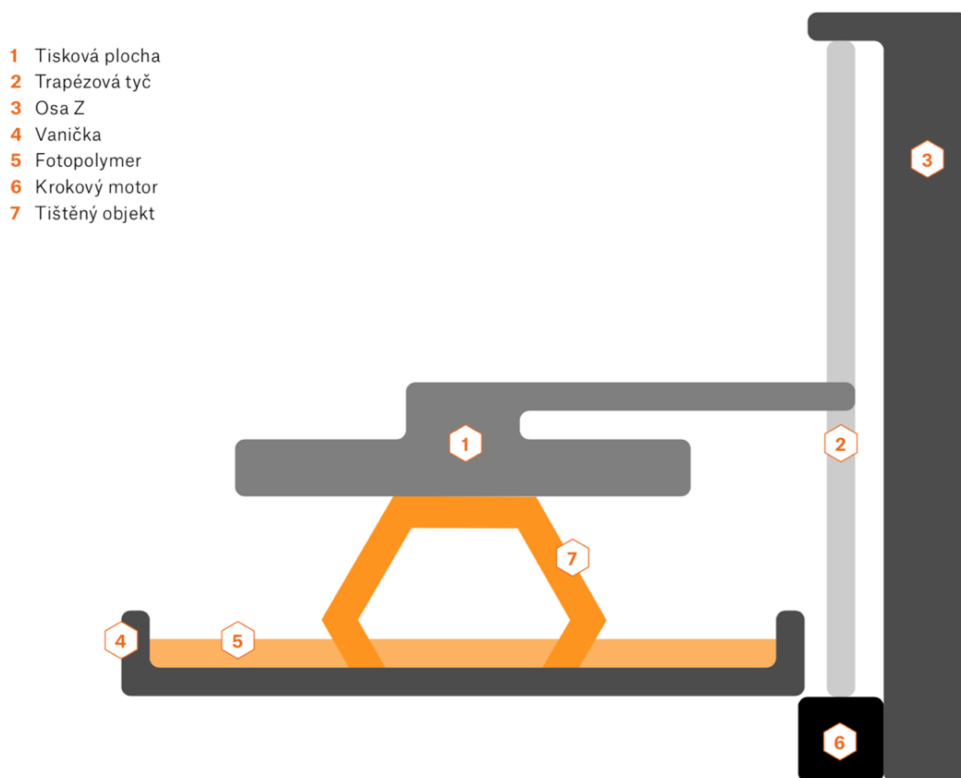
Mezi nejdůležitější části SL1 tiskárny patří tisková plocha, vanička na pryskyřici, UV lampa a krokové motory.

Tisková kovová plocha musí být před začátkem každého tisku pečlivě vyčištěna (například izopropylalkoholem), aby se na ni dobře uchytil tištěný vzorek.

Tiskárna SL1 od Průši, na které jsem tiskla, má tiskovou plochu orientovanou vzhůru nohama a její pohyb zajišťuje krokový motor. Vanička se pak nachází pod tiskovou plochou. Před tiskem se do ní nalije tekutá pryskyřice tak, aby nepřesáhla maximální hranici označenou ryskou a nehrozilo vylití při naklánění vaničky v průběhu tisku. Zároveň obsahuje i senzory,

kteře kontrolují množství pryskyřice, aby nedošlo k jejímu nedostatku při tisku. Dno vaničky je tvořeno FEP folií a je průhledné. Při tisku jí totiž prostupuje záření z UV lampy uložené pod vaničkou, a vytvrzuje tak tekutou pryskyřici. I dno se musí před tiskem řádně vyčistit. Mezi UV lampou a vaničkou se nachází LCD panel zajišťující maskování vrstev, jinak by vrstva po osvětlení byla vytvrzena po celé ploše dna vaničky.

Jsou také tiskárny, jež mají tiskovou plochu orientovanou opačně (směrem nahoru). K osvětlení vrstvy pak nedochází skrz dno vaničky, ale shora. Tisková plocha je ponořena pod hladinou pryskyřice přesně na vzdálenost tloušťky vrstvy, která se po vytvrzení vrstvy zářením shora posune směrem dolů. Vanička proto musí být hlubší, aby se do ní vešla celá tisková plocha spolu s výtiskem, které jsou po celou dobu tisku ponořené v pryskyřici. Proto jsou rozměry tiskárny větší a spotřeba materiálu vyšší. Výhodou tohoto rozvržení je spolehlivější tisk oproti tiskárnám, které mají tiskovou plochu vzhůru nohama [5].



Obrázek 7 Zjednodušené schéma SL1 tiskárny. Převzato z [4]

1.2.2 Mycí a vytvrzovací linka CW1

Stanice CW1 je doplněk k SL1 tiskárně. Slouží zatím jen k postprocessingu (dodatečné úpravě) vytištěných vzorků. Čerstvé výtisky jsou poněkud lepkavé a měkké, protože pryskyřice ještě

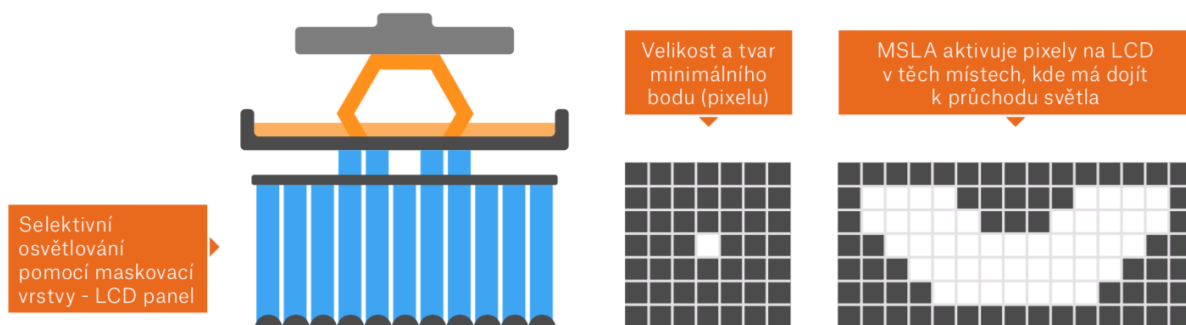
není v dokonale vytvrzeném stavu a na povrchu ulpívají zbytky tekuté pryskyřice z vaničky. Je proto nutné je omýt v isopropylalkoholu, vysušit a poté vytvrdit UV světlem [9].

Chystá se vylepšení, kdy tato stanice bude mít i funkci předehřívání resinu. Resin má totiž tendenci hrudkovatět a je nutné pryskyřici před tiskem promíchat. Pokud ani to nepomůže, bude možné v této stanici pryskyřici předehřát a zbavit ji hrudek kompletně [9].

1.2.3 Princip MSLA

Před tiskem je stejně jako u FFF metody nutné mít navržený vzorek spolu s parametry tisku převedený do formátu G-code, který byl vytvořen přímo pro tuto danou tiskárnu. Tiskárna SL1 zvládá tisknout mnohem tenčí vrstvy než tiskárna i3 MK3S. Klasická tloušťka jedné vrstvy je 50 μm , je však v rozmezí 10-100 μm libovolně nastavitelná. Zároveň se dá měnit doba vytvrzování vrstvy, která trvá při tisku obvykle 6 až 8 sekund nezávisle na obsahu vrstvy [9].

V úplném začátku tisku se zkontroluje hladina pryskyřice ve vaničce a tisková plocha pomocí krokových motorů sjede dolů a ponoří se do pryskyřice. Ve vaničce je mezi jejím dnem a tiskovou plochou (či poslední natištěnou vrstvou na ploše) množství pryskyřice přesně na jednu vrstvu. UV lampa osvítí dno vaničky přes masku. Takto vytvrzená vrstva se ode dna vaničky odloupne, na tiskové ploše ale zůstane. Neodlupuje se však přímo. Vanička se začne naklánět, což vede k šetrnějšímu odlupování, promíchání pryskyřice a také ke zrychlení doby tisku. Po odlepení tisková plocha popojede výš, přesně o vzdálenost jedné vrstvy, a postup se dále opakuje [9].



Obrázek 8 Princip MSLA. Převzato z [4]

1.2.4 Materiál

Materiálem využívaným pro tisk touto metodou je pryskyřice, často také označována jako resin. Jedná se o tekutý monomer, z kterého se následným vytvrzením UV světlem stane pevný polymer. Oproti filamentu je pryskyřice křehčí, dražší a její výběr barev je omezený. Pryskyřice se nerozlišují podle materiálu, ale hlavně podle jejich účelu [4, 5].

Tabulka 2 Druhy pryskyřice. Převzato z [4]

Typ resinu	Charakteristiky
Standardní resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ hladký a detailní povrch⊖ křehký⊖ není vhodný pro mechanické díly
Clear resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ částečně transparentní⊖ po dodatečném opracování je na pohled téměř čirý
Odlévací resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ detailní povrch⊕ vhodný pro vytváření odlévacích forem⊕ po vyhoření zbývá naprosté minimum popela
Tvrdé a odolné resiny	<ul style="list-style-type: none">⊕ vlastnostmi podobné materiálu ABS či PP⊕ částečně pružné⊕ vhodné pro mechanické díly⊖ nízká teplotní odolnost
Teplotně odolný resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ vysoká teplotní odolnost⊕ používá se na vstřikovací formy⊖ vysoká cena
Dentální resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ zdravotně nezávadný⊕ vhodný pro tvorbu zubních implantátů⊕ vysoce odolný otěru⊖ vysoká cena
Flexibilní resin	<ul style="list-style-type: none">⊕ vlastnostmi podobný gumě (tvrdost 70A)⊖ menší rozměrová přesnost výtisku

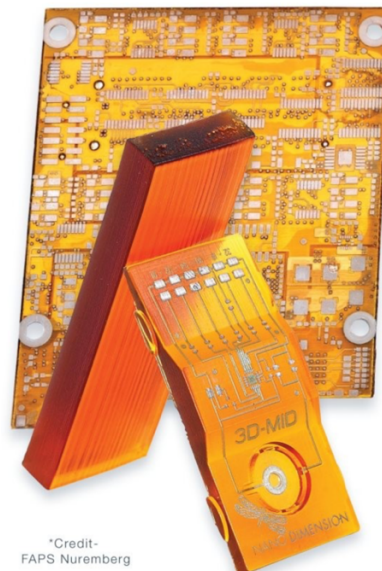
1.3 Využití aditivní technologie v elektrotechnice

3D tisk má velký potenciál pro využití v elektrotechnickém průmyslu. I přestože se nyní využívají především na výrobu prototypů a jejich testování, objevuje se už několik technologií, které dokáží vyrobit přímo dané elektrotechnické součástky - jako jsou například desky plošných spojů, rezistory, kondenzátory či indukory. Praktické využití takto vyrobených součástek není ale zatím tolik rozšířené, jelikož jsou tyto technologie ve fázi vývoje [10–12].

Firma Nano Dimension představila tiskárnu, která dokáže vytisknout desku plošných spojů pomocí inkoustu s částicemi stříbra a nevodivého inkoustu s podobnými vlastnostmi jako má

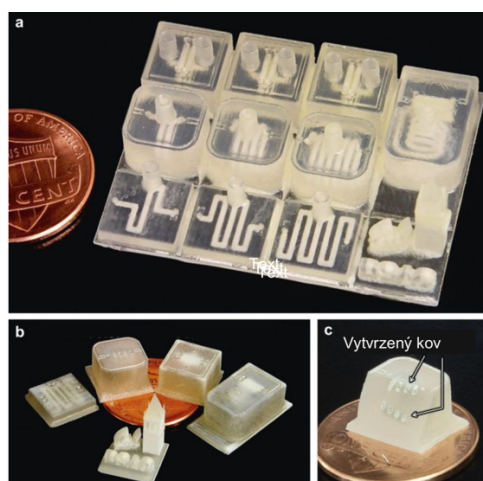
FR4. Podobnou technologií se zabývají i další společnosti či univerzity. Jedním z jejich cílů je vytvořit vícevrstvé obvody i o stovce vrstev [13, 14].

Stejná společnost umožnila pomocí 3D tisku využití bočních stran desek. S tiskem funkčních částí na bok se zvýšila plocha, na kterou lze připájet SMD (surface mount device) součástky nebo lze plochu využít k propojení dalších desek [14].



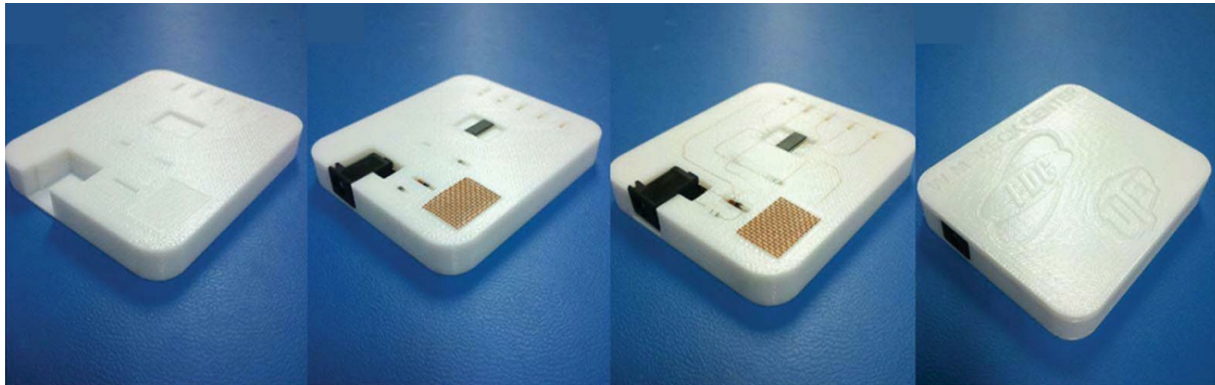
Obrázek 9 Deska plošných spojů vyrobená aditivní technologií. Převzato z [14]

Další možnou metodou výroby je vstřík suspenze se stříbrnými částicemi do vytištěného objektu, kde následně tuhne a vytváří jednoduché elektronické součástky (rezistory, kondenzátory či induktory). Spojením těchto součástek by pak bylo možné vytvořit složitější obvody [12].



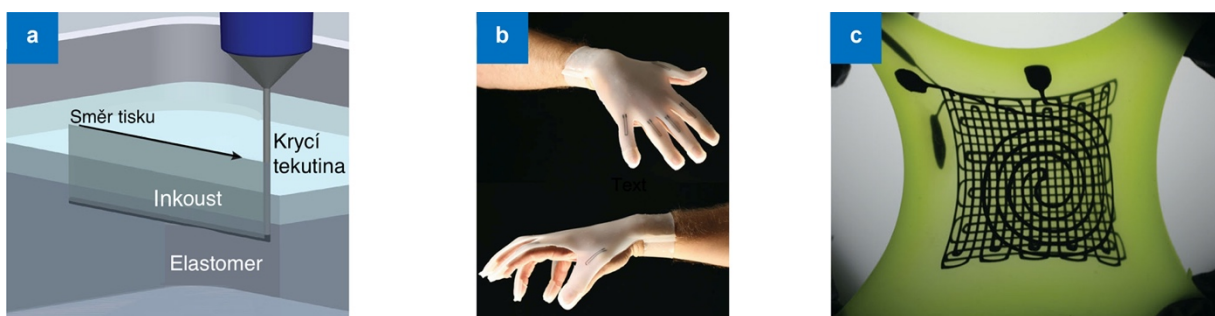
Obrázek 10 Vytištěné součástky. Převzato z [12]

Výhodou 3D tisku je možnost zasáhnout do výroby kdykoliv v jeho procesu, a tím získání přístupu k libovolné vrstvě. To umožňuje výrobu zabudovaných elektronických součástek, kdy se některou technologií 3D tisku vytvoří objekt (kostra), do kterého jsou následně vloženy elektrické komponenty, jejichž propojení je zajištěno tekutým vodivým inkoustem nanášeným disperzerem, který je později vytvrzen. Poté se může pokračovat v tisku dalších vrstev, ve kterých lze uložit další součástky [15].



Obrázek 11 Zabudované elektronické součástky. Převzato z [15]

S rozvojem elektroniky se objevil zájem o nositelnou elektroniku, jejímž předpokladem je flexibilita, aby se přizpůsobila různým povrchům. K její výrobě je možné využít 3D tisk, který ji natiskne na ohebný a pružný materiál s integrovanými obvody. Například výroba napěťových senzorů probíhá tak, že je viskoelastický inkoust pomocí trysky vtlačován do nádržky s elastomerním materiálem. Na něm je krycí tekutina, která vyplňuje stopy v elastomeru způsobené průchodem trysky. Ke konci se musí všechny tři komponenty po nanesení inkoustu vytvrdit. Inkoust slouží jako odporový snímací prvek a elastomer drží tvar celého objektu [15].



Obrázek 12 Proces výroby a příklady elastické elektroniky. Převzato z [15]

Další možná aplikace 3D tisku, která je momentálně pořád ve vývoji, spočívá ve využití dielektrických vlastností některých materiálů, například na výrobu izolátorů nebo kondenzátorových průchodek. Dielektrické materiály jako jsou například PLA nebo ASA však

nevykazují požadované vlastnosti, a proto je potřeba najít vhodné příměsi pro jejich zlepšení. Oproti klasické výrobě lze aditivní technologií vytisknout i složitější struktury [16].

2 Posouzení anizotropie

V této části se zaměřím už na samotné porovnání anizotropie vytištěných vzorků vyrobených metodami FFF a SLA.

Anizotropie je vlastnost nějakého objektu, který má rozdílné fyzikální vlastnosti v závislosti na směru měření. Nejlépe lze pozorovat anizotropii na krystalech. Naopak plyny a kapalně látky bývají zřídka anizotropní [17].

Předpokládám, že části vyrobené aditivní technologií budou do určité míry anizotropní, což je způsobeno typem výrobní metody (vrstvením), ale také možnou anizotropní podstatou použitého materiálu. Orientace tisku může mít tedy vliv na vlastnosti vytištěného výrobku. Je proto potřebné znát a brát v potaz jeho anizotropní mechanické a teplotní vlastnosti, aby se podle nich mohl navrhnout model části tak, že bude mít výrobek co nejlepší vlastnosti pro své budoucí užití [18, 19].

Tiskla jsem proto vzorky ve třech směrech podle os XY, YZ a XZ, změřila jejich vlastnosti v těchto orientacích a porovnála případné rozdíly. K porovnání vzorků jsem zvolila dvě metody, mechanickou zkoušku v tahu a termomechanickou analýzu.

2.1 Popis experimentů

2.1.1 Použité materiály

Materiály, ze kterých se tiskly vzorky pro dané zkoušky, jsou dodané společností Prusa Research. Pro tisk na FFF tiskárně byl použit materiál **Prusament PLA**, typ Natural, tedy bez přidaných pigmentů. Typické hodnoty teploty extruderu jsou od výrobce doporučené mezi 190 °C a 210 °C a rychlost tisku kolem 30 – 40 mm/min. Tisk s PLA je relativně jednoduchý, jelikož nedochází k téměř žádnému kroucení a zápachu. Je také vhodný pro detailní tisk. Pro tisk metodou SLA byla zvolena azurově modrá tvrdá pryskyřice s označením **UV- SENSITIVNÍ PRYSKYŘICE PRO 3D TISK**. Její doba vytvrzení je poměrně krátká, pohybuje se mezi 6 až 9 vteřinami. Před vytvrzením kapalina vydává zápach podobný esteru. Pryskyřice by se také měla vyhnout světlu, teplu a zdrojům kontaminace. Po vytvrzení je pryskyřice silná, pevná, ale křehká [7].

2.1.2 Mechanická zkouška v tahu

Mechanická zkouška v tahu sleduje deformaci vzorku tahem s působením síly. Deformace tahem mění rozměry tělesa. Můžeme tedy sledovat zvyšování působícího normálového napětí v závislosti na relativním prodloužení vzorku. Této závislosti se říká křivka deformace, ze které lze určit potřebné veličiny k vyhodnocení vlastností vzorku. Normálové (tahové) napětí σ_n je podíl síly působící k ploše průřezu. Relativní prodloužení ε je změnou délky vzorku v poměru k její původní délce [20].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

ε ...relativní prodloužení

Δl ...prodloužení

l_0 ...původní délka

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (2)$$

σ_n ...normálové napětí

F ...působící síla

S ...plocha průřezu

Deformace tělesa se dělí na elastickou (pružnou) a plastickou (trvalou). Elastická deformace vzniká při působení menších sil a po skončení jejich působení se těleso vrátí zpět do původního stavu. Kdežto deformace plastická probíhá při vyšších silách až po destrukci tělesa a po skončení jejich působení se do původního stavu už nevrátí [20].

Začátek plastické deformace si můžeme v grafu všimnout v bodě nazývaném mez pružnosti. Do té doby byla deformace elastická. Při elastické deformaci je závislost relativního prodloužení na normálovém napětí přímo úměrná. Tomuto poznatku se říká Hookův zákon.

Z toho zákona byla odvozena veličina modulu pružnosti (Youngův modul pružnosti v tahu), která vyjadřuje podíl normálového napětí na relativním prodloužení [20].

$$E = \frac{\sigma_n}{\varepsilon} \quad (3)$$

E...modul pružnosti (Youngův modul)

σ_n ...normálové napětí

ε ...relativní prodloužení

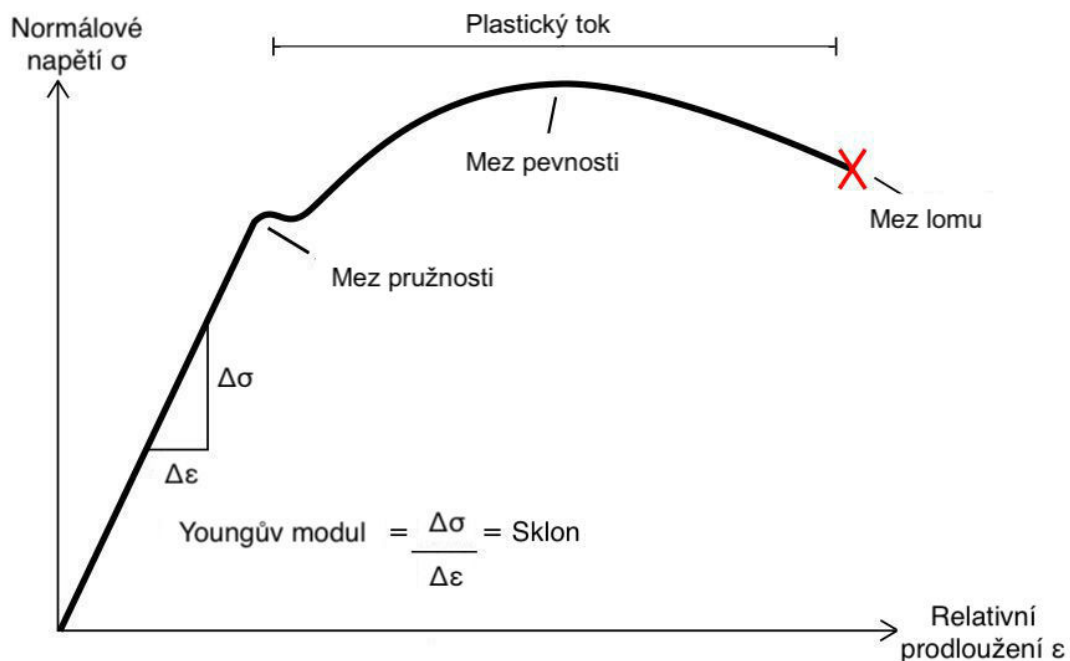
Maximální hodnota napětí, při kterém vzorek vydrží soudržný, se nazývá mez pevnosti. Není však pravidlem, že při této hodnotě napětí dojde k přetržení [20].

$$R_m = \frac{F_{max}}{S} \quad (4)$$

R_m ...mez pevnosti v tahu

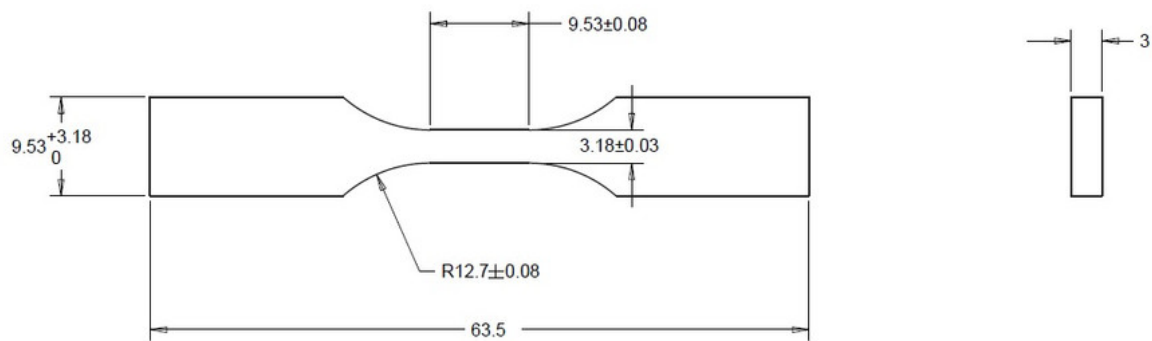
F_{max} ...maximální působící síla

S...plocha průřezu



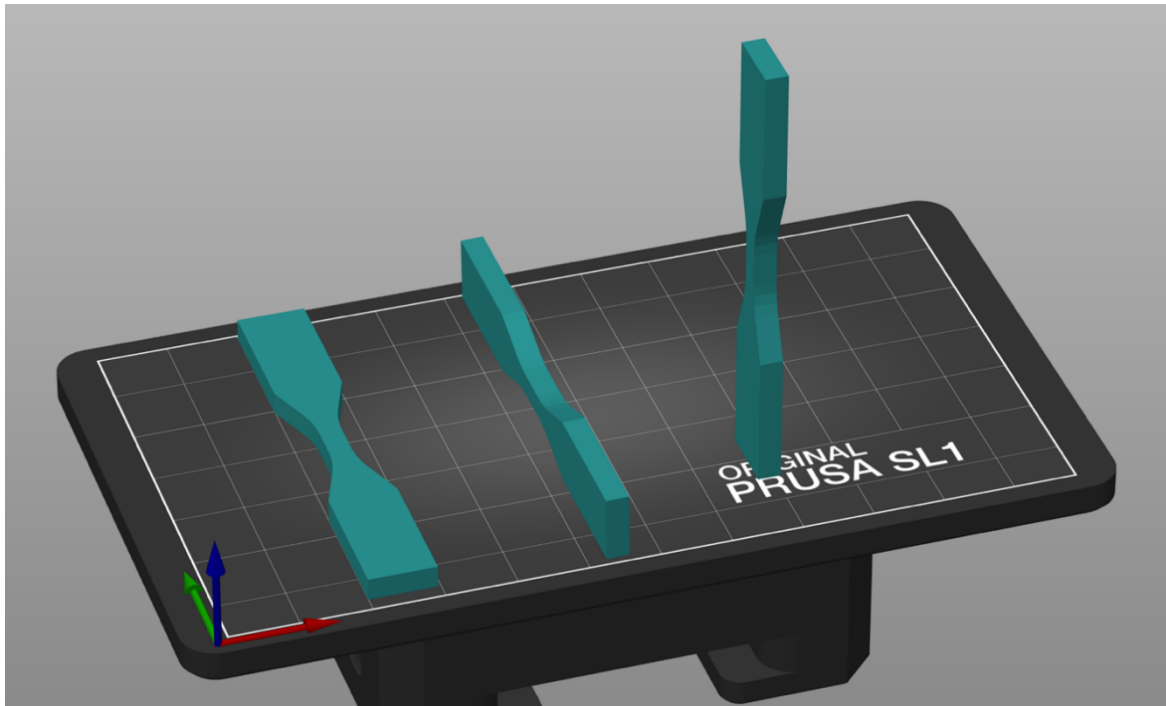
Obrázek 13 Křivka deformace. Převzato z [21]

Mechanická zkouška v tahu byla provedena podle normy ASTM D638, která udává přesné podmínky a pokyny pro tahovou zkoušku plastů a dalších pryskyřicových materiálů. Norma ASTM D638 využívá pěti druhů vzorků s odlišnými předepsanými rozměry. V tomto měření jsem použila vzorek typu V, který je ze všech typů nejmenší [22].



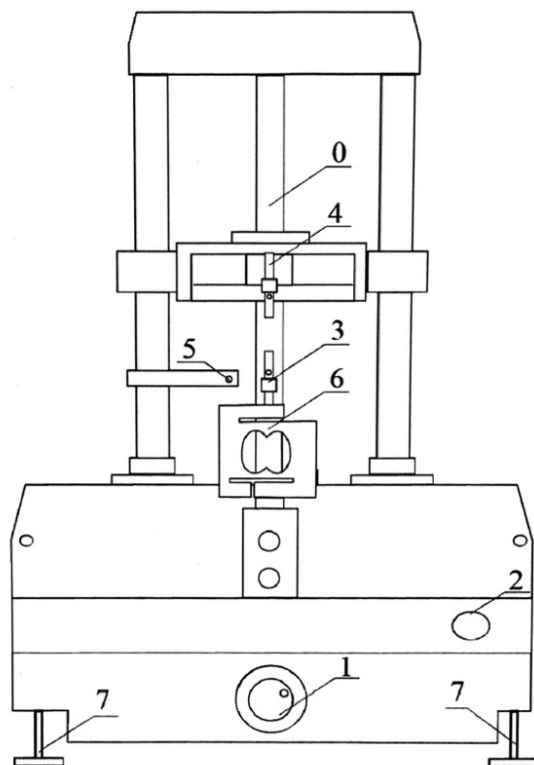
Obrázek 14 ASTM D5638 typ V. Převzato z [23]

Ve sliceru jsem nastavila dodatečné parametry vzorku. Pro všechny tři orientace dané metody byly nastaveny parametry tisku stejné, zanedbávám-li, že v případě tisku FFF orientace YZ a XZ byly použity podpěry, které na mechanickou zkoušku nebudou mít vliv. V případě tisku FFF metodou se tisklo při teplotě extruderu 210 °C a 240 °C. Ostatní nastavení byla pro obě teploty extruderu stejná, teplota podložky 60 °C s první vrstvou širokou 0,2 mm, následující vrstvy měly 0,15 mm. Tloušťka vnějšího pláště byla 2 perimetry, hustota výplně 100 %, úhel výplně 45° a vzor výplně přímočarý. Doba počátečního vytvrzování u SLA metody pro prvních 10 vrstev byla 40 sekund, pro ostatní vrstvy buď 8 sekund nebo 16 sekund. Výška vrstvy byla pro všechny vzorky 0,05 mm.



Obrázek 15 Vzorky v různých orientacích ve sliceru.. Zleva: XY, YZ, XZ

Zkouška se provádí na univerzálním trhacím stroji tzv. „trhačce“. Pro měření jsem využila deformační zařízení Deform 02 od firmy Pemar (Česká republika) s pomocí vyhodnocovacího programu Trhey!. Trhačka je přístroj, který je schopný měřit mechanické vlastnosti materiálu v tlaku, tahu, ohybu apod. Její důležitou částí jsou utažitelné čelisti. Před měřením se do nich upevní testovací vzorek tak, aby během měření z čelistí nevyklouznul. Jak už zní její název, tak se čelisti s přednastavenou rychlostí a silou od sebe vzdalují a upevněný vzorek natahují až do jeho přetržení. Parametry zkoušky se nastaví v programu, ve kterém lze pozorovat působící síly a změny v deformaci. Tyto veličiny jsou měřeny tenzometrem umístěným pod spodní čelistí.



Obrázek č. 2: Schéma deformačního zařízení zepředu: 1 - polohovací kolečko
 2 - tlačítko STOP
 3 - dolní čelistový trn
 4 - horní čelistový trn
 5 - teploměr
 6 - tenzometr
 7 - nastavitelné nohy

Obrázek 16 Schéma trhačky. Převzato z [24]

Zkoušku na trhačce jsem prováděla podle programu, který nastavoval rychlost vzájemného vzdalování se čelistí. Rychlost čelistí byla 1 mm/min.

Tabulka 3 Rozměry testovacího vzorku

S (mm²)	9,54
l (mm)	9,53

2.1.3 Termomechanická analýza (TMA)

Termomechanická analýza patří do skupiny termických analýz, které sledují chemické a fyzikální změny látek v závislosti na teplotě. V případě termomechanické analýzy se měří rozměrové změny jako funkce teploty nebo času při působení konstantní síly [25].

Z měření lze vyčíst mnoho parametrů charakterizujících vlastnosti materiálu jako je například teplota tání a měknutí, proces krystalizace a jiné. V tomto měření se zaměřím na vyhodnocení bodu skelného přechodu a teplotní roztažnost [25].

Při změně teploty dochází ke změně rozměrů vzorku. Tento jev se nazývá teplotní roztažnost a je definován koeficientem teplotní roztažnosti [26].

$$\alpha_x = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (5)$$

ΔL ...změna rozměru

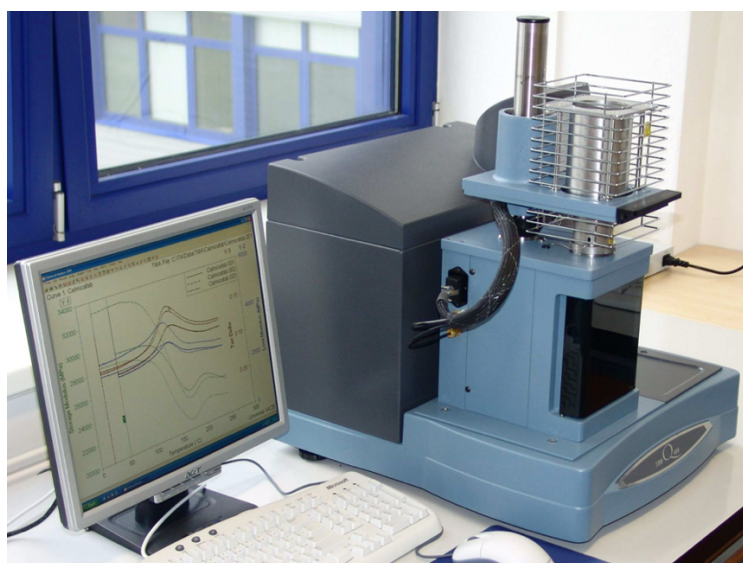
ΔT ...změna teploty

L_0 ...původní rozměr (výška)

α ... lineární koeficient teplotní roztažnosti

Rozlišuje se mezi lineární a objemovým koeficientem teplotní roztažnosti. Rozdíl mezi nimi spočívá v měřeném rozměru (délka nebo objem). Na rozdíl od lineárního koeficientu lze objemový koeficient teplotní roztažnosti využít při zkoumání kapalin. Jelikož je nutné koeficient teplotní roztažnosti určovat v daném teplotním intervalu, lze rozlišovat také mezi koeficientem před bodem skelného přechodu α_1 a za bodem skelného přechodu α_2 [26].

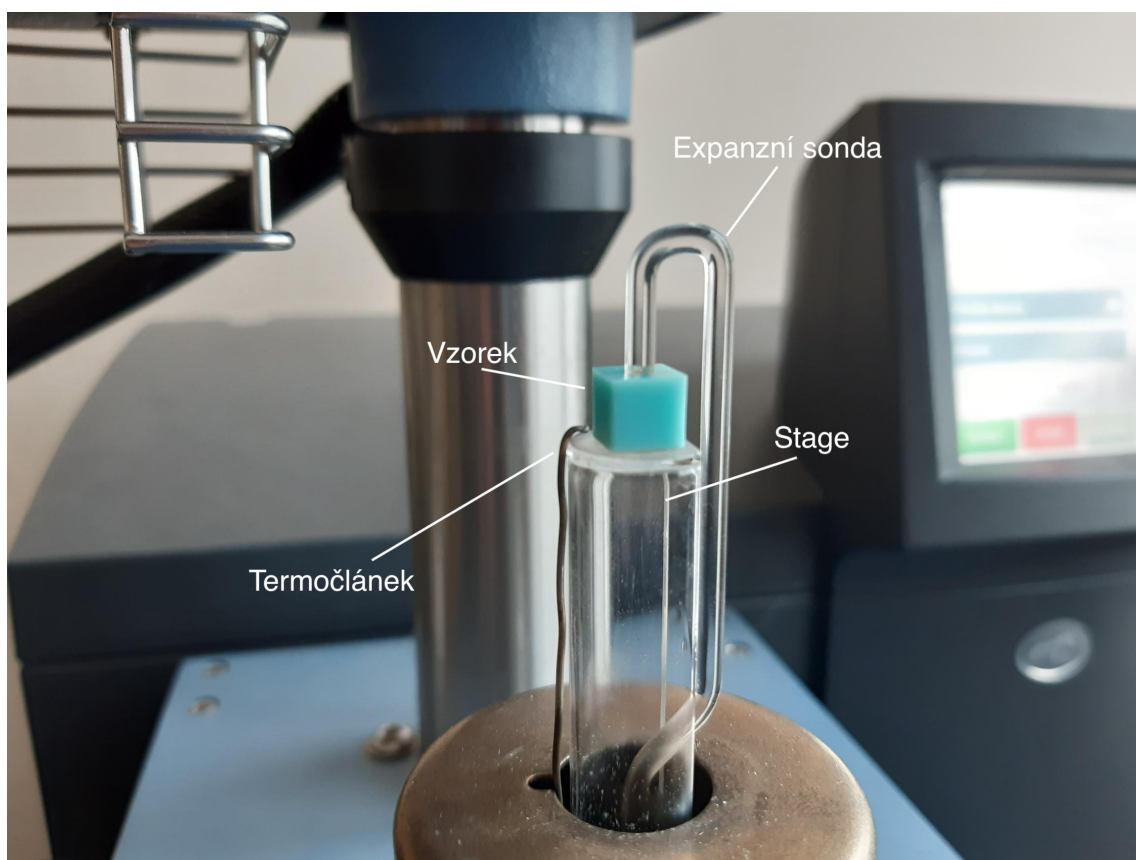
Bod skelného přechodu T_g udává hranici mezi sklovitým a kaučkovitým stavem materiálu. Pod teplotou skelného přechodu má látka vlastnosti podobné sklu. To znamená, že je materiál pevný a tuhý. Při překročení teploty T_g látka měkne a získává vlastnosti jako guma/tekutina. Bod skelného přechodu lze pozorovat pouze u amorfních nebo semikrystalických látek (látky s nepravidelným uspořádáním částic) [27, 28].



Obrázek 17 Přístroje k měření TMA. Převzato z [26]

Měření se provádělo na termomechanickém analyzátoru TMA Q400 od firmy TA Instruments. Při měření je vzorek uzavřen v peci a dosedá na něj s předdefinovanou silou současně i zvolená sonda. Existuje mnoho typů sond (např. penetrační, expanzní, makroexpanzní, hemisférické). Pro měření tepelné roztažnosti je vhodné využít expanzní sondu, která vzorek stlačuje s minimální až nulovou silou. Pec slouží k rychlému ohřívání a chlazení vzorku při daných atmosférických podmínkách (vzduch, vnitřní atmosféra) [26].

Měřeným vzorkem pro termomechanickou analýzu byla krychle o rozměrech 7x7x7 mm ze stejných materiálů a se stejnými tiskovými parametry jako u vzorků pro mechanickou zkoušku. Pro tisk FFF metodou byly parametry následující: teplota extruderu 210 °C nebo 240 °C, teplota podložky 60 °C, tloušťka první vrstvy 0,2 mm, tloušťka následujících vrstev 0,15 mm, tloušťka vnějšího pláště 2 perimetry, výplň přímočará, hustota 100 % s úhlem 45°. Při tisku SLA metodou byla doba prvního osvětlení 40 s, následujících 8 s nebo 16 s a výška vrstvy 0,05 mm. Vzorek byl zkoumán ve dvou orientacích na výšku podél osy Z a na bok podél osy X nebo Y (v tomto případě mezi orientacemi X a Y není rozdíl). Vzorky byly opět vyrobeny metodou FFF z materiálu PLA a metodou SLA z vytvrzené tekuté pryskyřice.



Obrázek 18 Expanzní sonda dosedající na vzorek v zařízení TMA Q400

Termomechanickou analýzu jsem prováděla opět v závislosti na orientaci tisku vzorku. Vrstva se nanášela do výšky podle osy Z. Osy X a Y udávaly půdorys vzorku, proto není potřeba provádět termomechanickou analýzu na tyto orientace zvlášť, jelikož výsledky budou identické.

Zkouška probíhala podle programu uvedeného v tabulce 5:

Tabulka 4 Program pro zkoušku TMA

	Funkce programu	Probíhající děj
1.	Flow rate 100 ml/min	Napouštění komory 100 ml/min dusíkem
2.	Force 0,01 N	Působící síla na vzorek je 0,01 N
3.	Ramp 2 °C/min to 120 °C	Teplota se zvyšuje do 120 °C s rychlostí 2 °C/min
4.	Ramp 2 °C/min to 30 °C	Teplota se snižuje do 30 °C s rychlostí 2 °C/min
5.	Flow rate 0 ml/min	Koncentrace dusíku spadne zpět na nulu

2.2 Výsledky experimentu

2.2.1 Výsledky mechanické zkoušky v tahu

Veličiny získané z mechanické zkoušky v tahu jsou v následujících tabulkách a platí pro oba typy tiskáren s předdefinovanými vlastnostmi tisku. Hodnoty Δl_{\max} a ε_{\max} popisují maximální prodloužení a maximální relativní prodloužení při přetržení.

Tabulka 5 Výsledky mechanické zkoušky v tahu

			F_m (N)	Mez lomu (N)	Δl_{\max} (μm)	ε_{\max} (%)	R_m (MPa)	E (Gpa)
FFF	210 °C	XY	536	491	1767	19	56	0,40
		XZ	333	333	1039	11	35	0,37
		YZ	570	539	1850	19	60	0,38
	240 °C	XY	580	568	1962	21	69	0,38
		XZ	370	370	1182	12	39	0,37
		YZ	567	556	1823	19	59	0,36
SLA	8 s	XY	506	493	2049	22	53	0,32
		XZ	418	409	2181	23	44	0,27
		YZ	489	477	2072	22	51	0,32
	16 s	XY	511	484	2362	25	54	0,34
		XZ	534	524	2332	24	56	0,32
		YZ	527	503	2582	27	55	0,32

Z výsledků zkoušky lze říct, že míra anizotropie u FFF metody je vyšší než u SLA metody. Nejmenší pevnost u FFF metody má orientace XZ, tedy tisk na výšku, a to nezávisle na teplotě extruderu. Průměrná hodnota maximální působící síly se pohybuje při tisku s extruderem o teplotě 210 °C kolem 333 N a s teplotou extruderu 240 °C 370 N. V těchto případech je maximální působící síla rovna síle, při které dochází k rozlomení vzorku (mez lomu). S tím souvisí i hodnota maximálního prodloužení (resp. maximálního relativního prodloužení), které je u orientace XZ při pohybu čelistí 1 mm za minutu nejmenší. Vzorky tištěné s vyšší teplotou extruderu vykazují větší pevnost.

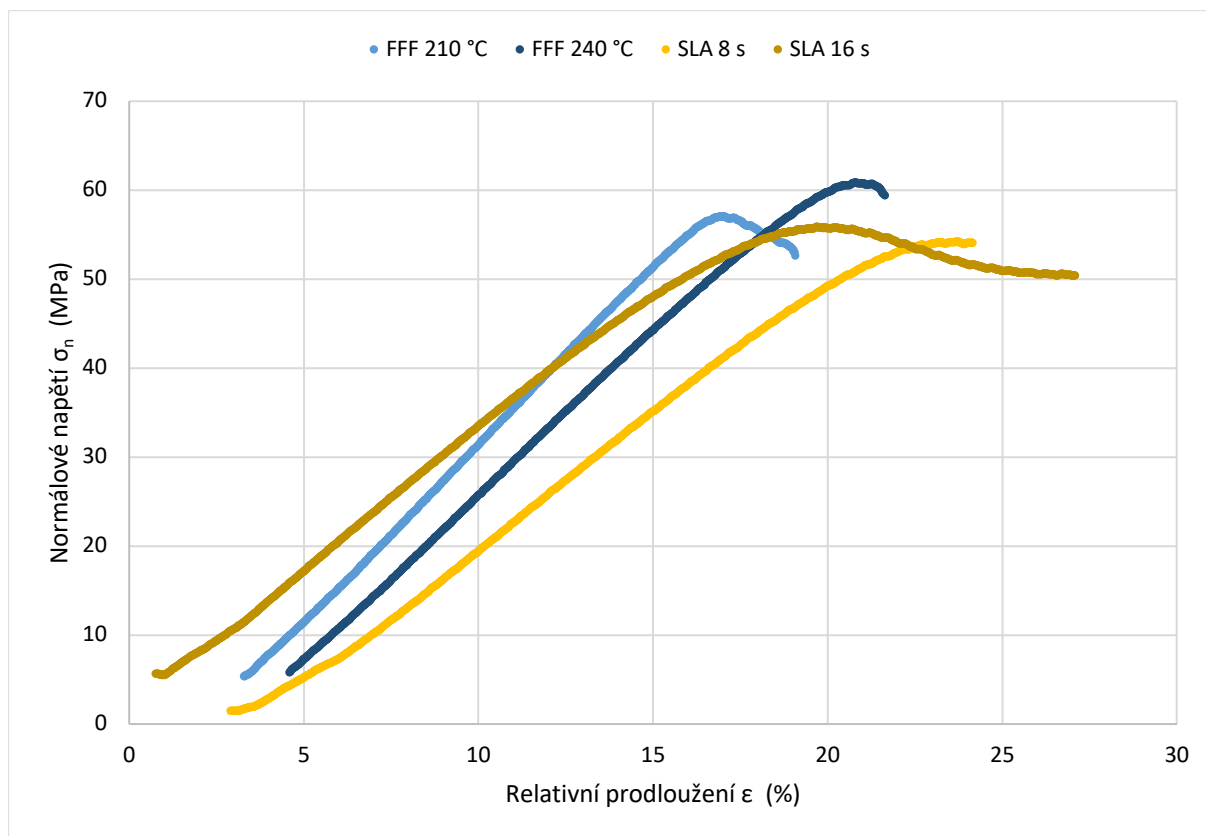
U vzorků vyrobených SLA technologií není pokaždé nejméně pevná orientace XZ. Vzorky vytvrzované po dobu 8 sekund mají nejslabší orientaci XZ, u vzorků vytvrzovaných po dobu 16 sekund je to ale orientace XY. Rozdíly mezi hodnotami působících sil a mezí lomu oproti hodnotám ostatních orientací jsou také odlišné. Lze si ale povšimnout, že s delší dobou vytvrzování se pevnost vzorku zvýšila a naopak se snížila jeho míra anizotropie.

Youngův modul u výtisků obou technologií se v závislosti na orientaci tisku nijak výrazně nemění.

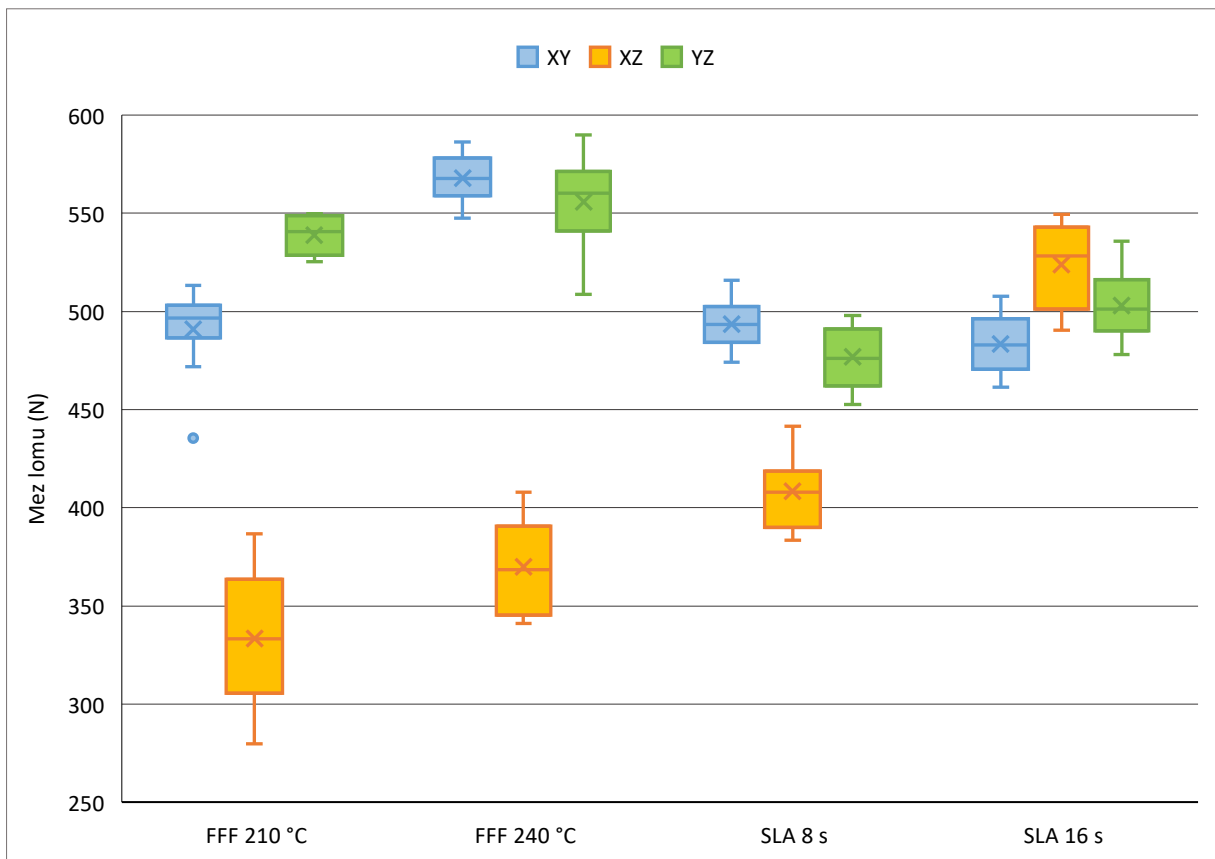
Pokud výsledky srovnám s jinými publikacemi, Youngův modul vychází v této práci menší než 1 GPa, naopak ve zmíněných publikacích je pro všechny orientace roven 2 GPa a výše, jak pro technologii FFF tak i SLA. Tento rozdíl mohl vzniknout například výběrem testovacího vzorku. Porovná-li hodnoty mezi pevnosti, rozdíly výsledků této práce a jiných vědeckých publikací již nejsou tak velké. Pro SLA jsou hodnoty z článků téměř identické jako pro tisk s dobou vytvrzování 16 sekund. U FFF technologie se hodnoty z článků od výsledků této práce liší více jak u technologie SLA, ale stále v přijatelném rozmezí [29, 30].

Tabulka 6 Hodnoty E a R_m získané z publikací zabývajících se podobnou tematikou. Převzato z [29, 30]

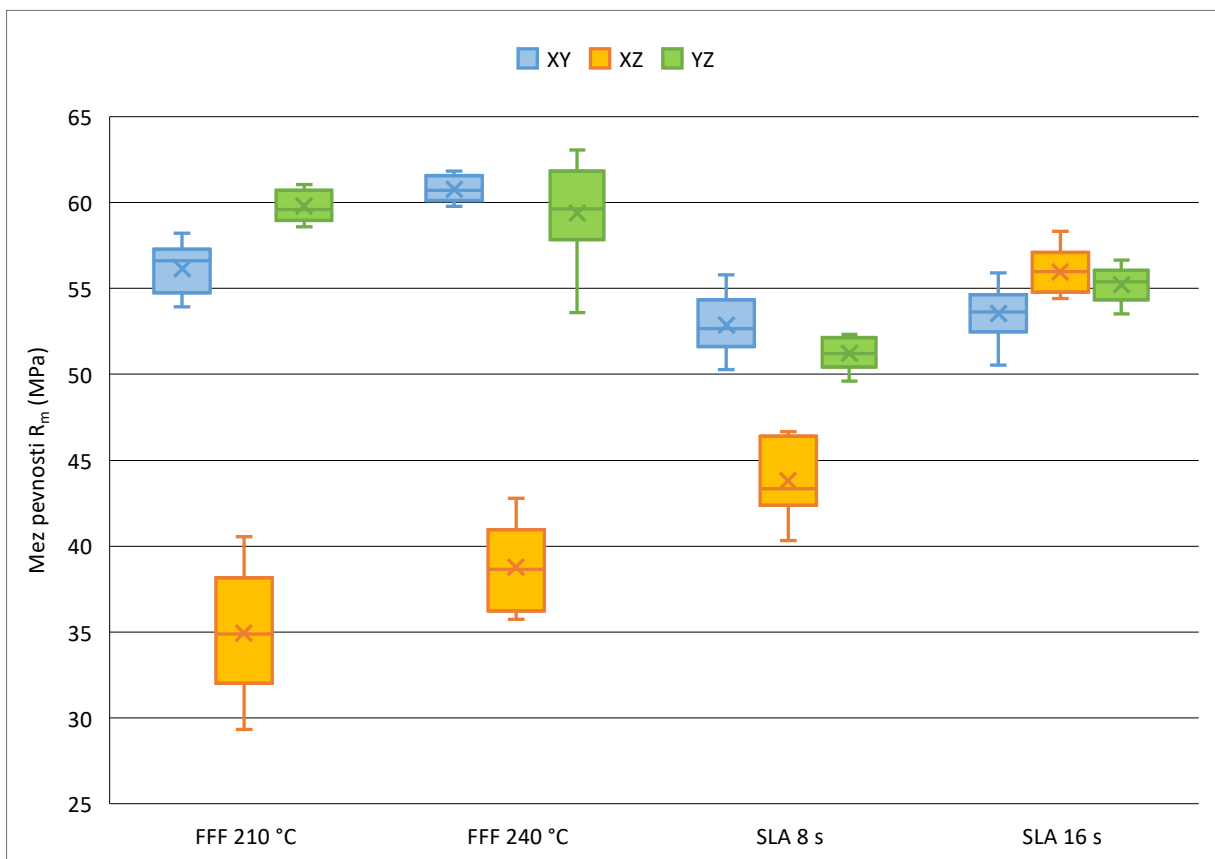
	FFF			SLA		
	XY	XZ	YZ	XY	XZ	YZ
E (Gpa)	3,8	3,5	3,9	2,6	2,7	2,7
R_m (Mpa)	77	38	65	54,9	56,4	53,7



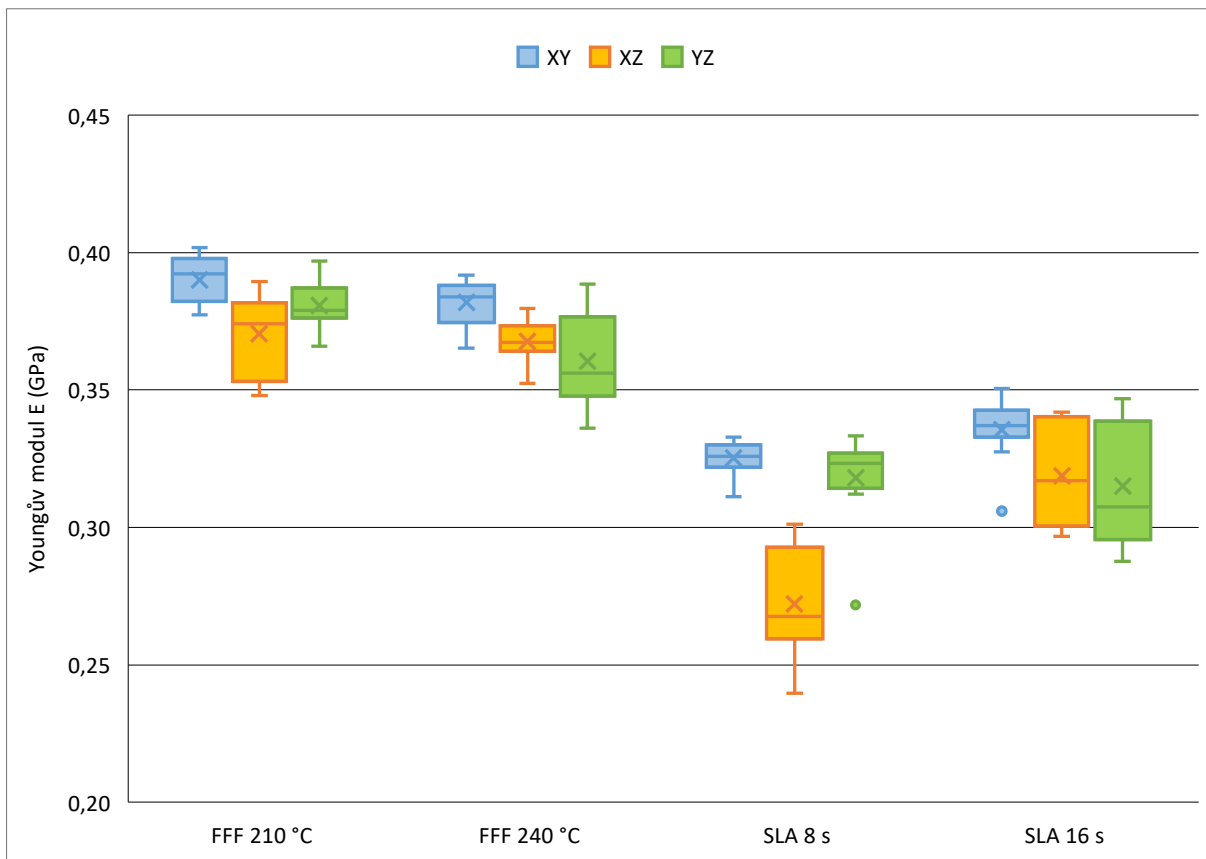
Graf 1 Křivka deformace pro orientaci XY



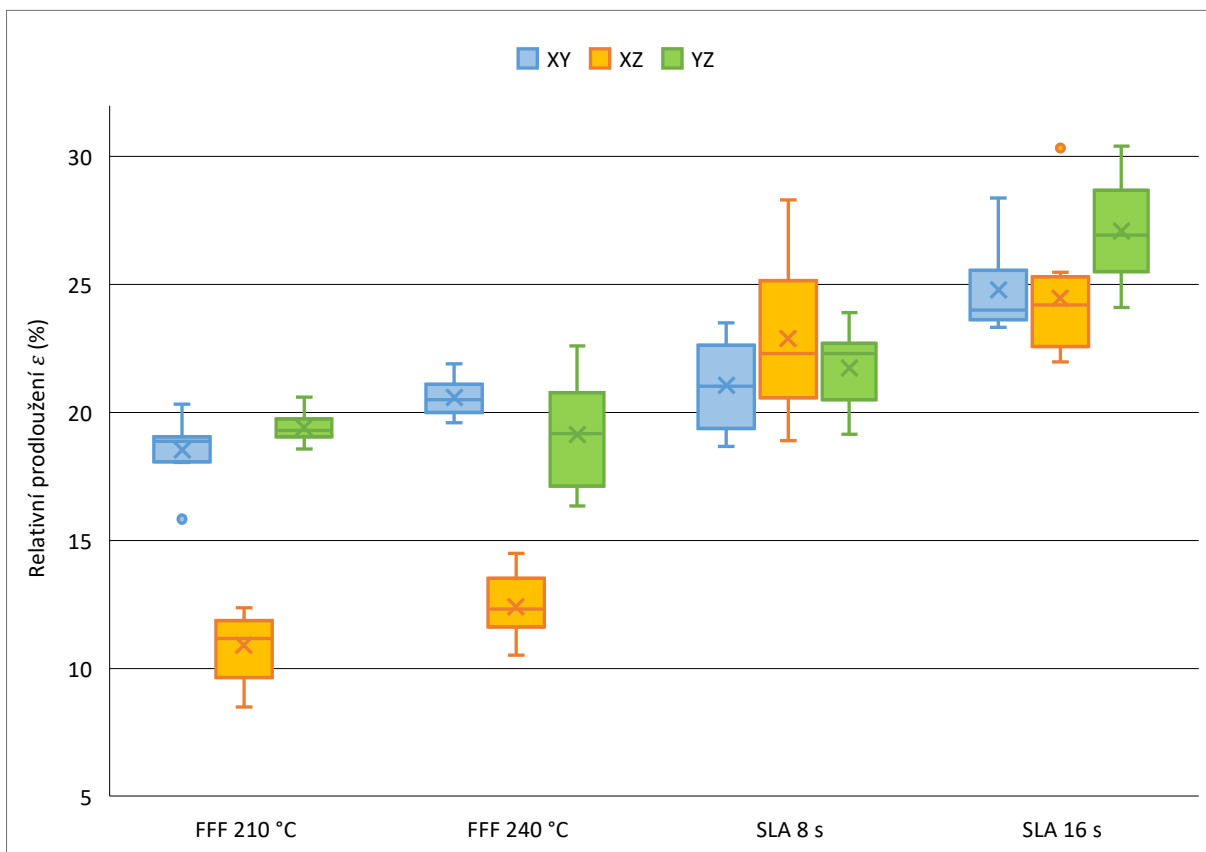
Graf 2 Mez lomu



Graf 3 Mez pevnosti v tahu



Graf 4 Youngův modul



Graf 5 Relativní prodloužení

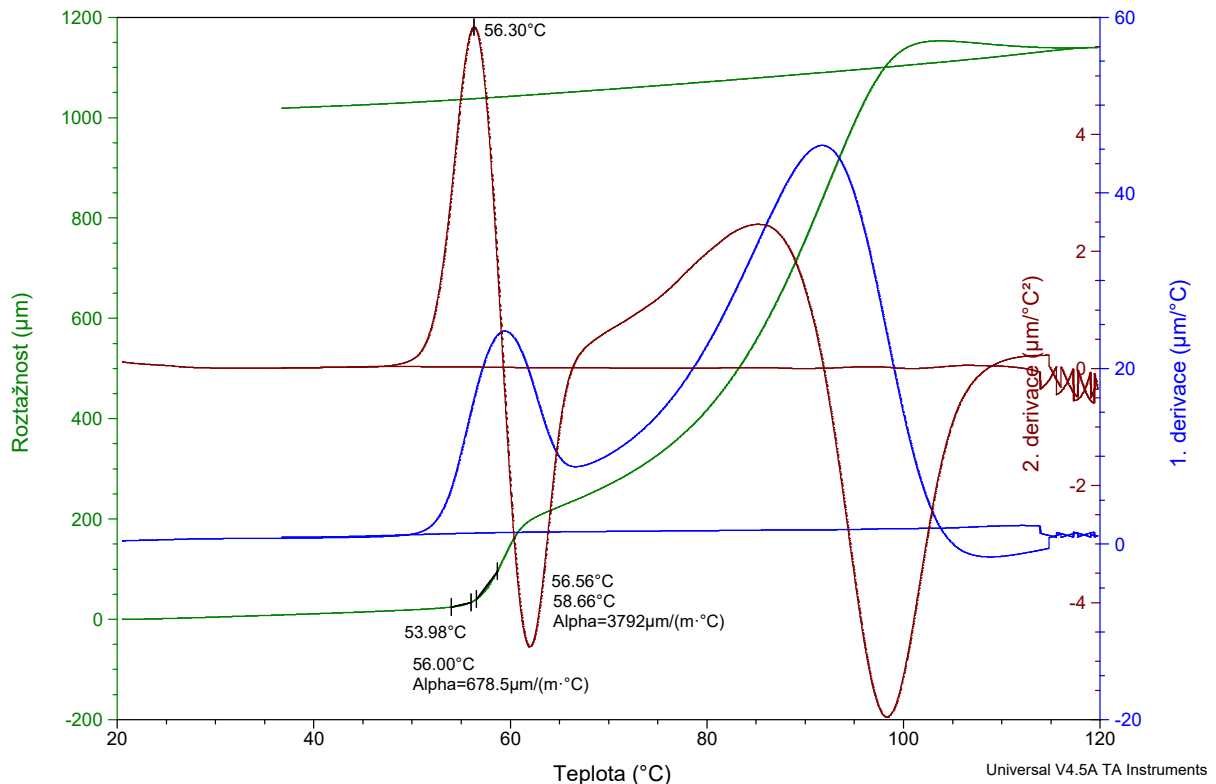
Pro určení, zda jsou změny v mechanických vlastnostech pro různé orientace statisticky významné, jsem provedla Studentův T-test pro hodnoty maximální síly F_m , jehož výsledky jsou v tabulce níže. Hladinu testu jsem zvolila 0,05. Pod tuto hladinu je změna orientace významná. Z výsledků tedy vychází, že ve všech případech kromě dvou je volba orientace tisku důležitá. Pouze v případě FFF výtisku s teplotou extruderu 240 °C, kdy byly porovnávány orientace XY-YZ, a u SLA výtisku s dobou vytvrzování 16 s v orientacích XZ – YZ není rozdíl příliš významný.

Tabulka 7 Výsledné p hodnoty statistického T-testu – porovnání rozdílné orientace tisku

	FFF		SLA	
	210 °C	240 °C	8 s	16 s
XY - XZ	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011
XZ - YZ	0,0000	0,0000	0,0000	0,1706
XY - YZ	0,0000	0,1881	0,0154	0,0095

2.2.2 Výsledky termomechanické analýzy

Průběhy termomechanické analýzy jsem vyhodnocovala v programu TA Universal Analysis. Vyhodnocování bodu skelného přechodu jsem převzala z normy IPC-TM-650, ve které se bod skelného přechodu T_g určuje v inflexním bodě křivky CTE, neboli v maximu druhé derivace roztažnosti podle teploty. Koeficienty α jsem vyhodnotila pomocí funkce v programu ve vybraném intervalu v okolí bodu T_g . Postup je znázorněn v následujícím grafu.



Graf 6 Určení T_g a koeficientů α (průběh FFF - Z 240 °C)

V tabulkách jsou zaznamenány hodnoty, které jsem určila z výsledků měření. Naměřené hodnoty bodu skelného přechodu jsou u obou orientací a u obou technologií velice podobné a orientace vzorků na něj nemá značný vliv.

Naopak lineární koeficienty teplotní roztažnosti u FFF vzorků se od sebe výrazně liší. V intervalech za bodem skelného přechodu nabývají u orientace Z dokonce záporných hodnot. U vzorků SLA se od sebe hodnoty koeficientů liší také, ale v porovnání s technologií FFF rozdíly v hodnotách nejsou tak velké.

Tabulka 8 Výsledky TMA pro PLA při teplotě extruderu 210 °C

FFF, teplota extruderu 210 °C						
	T _g (°C)	α ₁ (μm/(m°C))	interval 1 (°C)	α ₂ (μm/(m°C))	interval 2 (°C)	Δl (μm)
Z	54,9	408,5	51,67 - 53,95	4798	55,58 - 57,54	1398
X,Y	55,14	175,9	51,18 - 53,79	-2168	55,95 - 58,25	-368,5

Tabulka 9 Výsledky TMA pro PLA při teplotě extruderu 240 °C

FFF, teplota extruderu 240 °C						
	T _g (°C)	α ₁ (μm/(m°C))	interval 1 (°C)	α ₂ (μm/(m°C))	interval 2 (°C)	Δl (μm)
Z	56,3	678	53,98 - 56,0	3792	56,56 - 58,66	1139
X,Y	55,9	190,4	51,72 - 55,11	-1655	56,81 - 59,95	-323,2

Tabulka 10 Výsledky z TMA pro pryskyřici vytvrzovanou po 8 s

SLA, doba vytvrzení 8 s						
	T _g (°C)	α ₁ (μm/(m°C))	interval 1 (°C)	α ₂ (μm/(m°C))	interval 2 (°C)	Δl (μm)
Z	41,76	182,2	39,05 - 41,55	208,5	42,2 - 44,7	127,1
X,Y	41,58	229	37,36 - 41,23	290	42,52 - 45,59	114,8

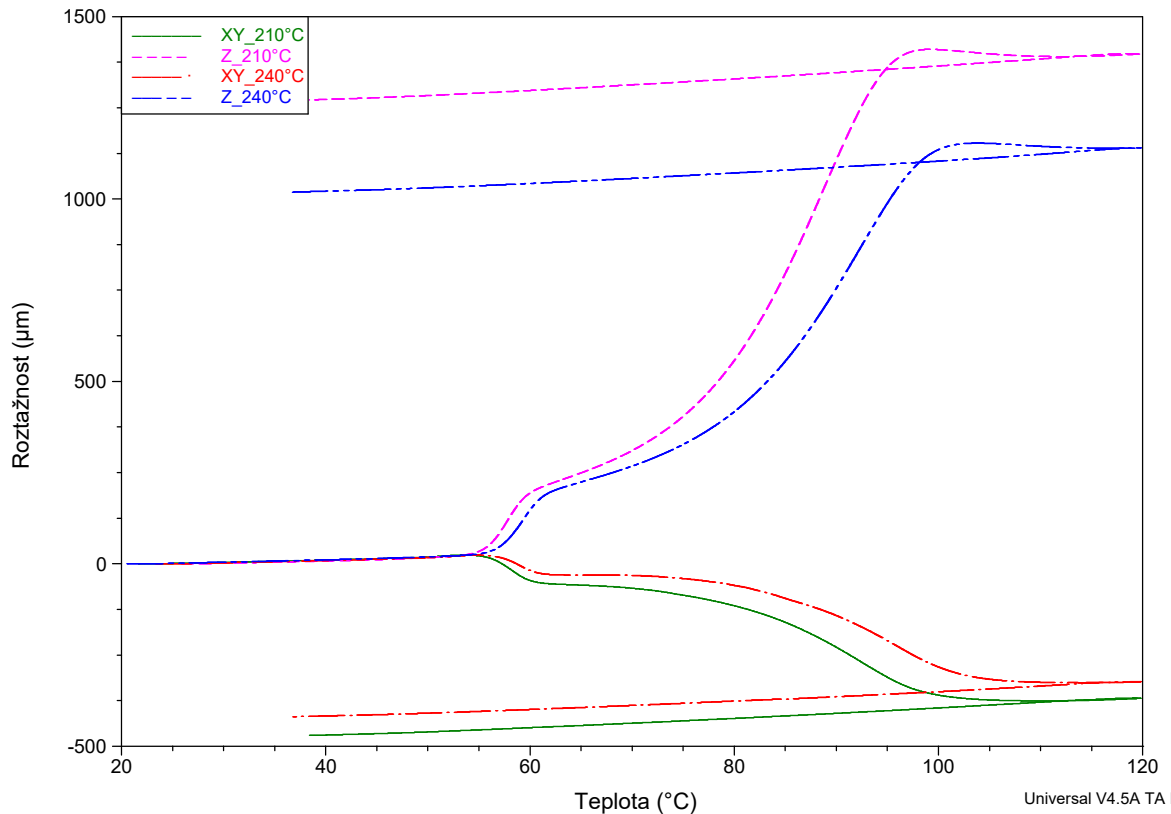
Tabulka 11 Výsledky z TMA pro pryskyřici vytvrzovanou po 16 s

SLA, doba vytvrzení 16 s						
	T _g (°C)	α ₁ (μm/(m°C))	interval 1 (°C)	α ₂ (μm/(m°C))	interval 2 (°C)	Δl (μm)
Z	38,39	156,4	36,09 - 37,91	184	38,77 - 43,19	119
X,Y	40,33	190,3	37,92 - 40,02	177,2	41,88 - 43,81	111,9

Křivka závislosti roztažnosti vzorku FFF na zvyšující se teplotě má v případě, kdy proměřujeme orientaci Z, kladný růst. Naopak při zkoumání orientace X (resp. Y) roztažnost nabývá záporných hodnot. To znamená, že se vzorek vlivem zvyšující se teploty roztahuje pouze v jednom směru, a to podél osy Z. Podél osy X (resp. Y) dochází ke smršťování vzorku.

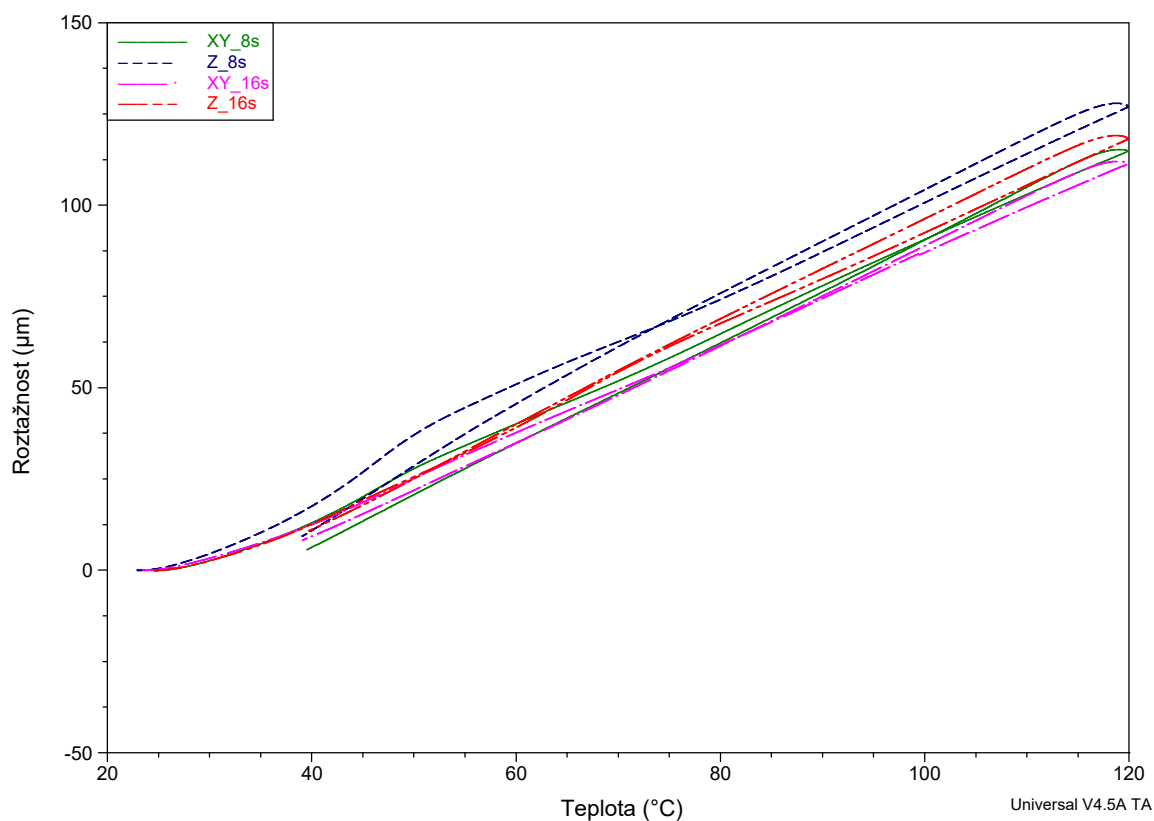
Rozměrová změna je před bodem skelného přechodu pozvolná. Za bodem T_g dojde k rychlému nárůstu (resp. poklesu). Molekuly se kvůli získání dostatečné energie začnou uspořádávat do krystalické mřížky. Tento děj se nazývá studená krystalizace [31] a vrcholí kolem 95 °C. Za touto teplotou již nedochází k tak výrazným rozměrovým změnám. U zpětného chlazení nedochází k žádnému přechodu a křivka lineárně klesá. Materiál má pravděpodobně po tomto teplotním cyklu velký podíl krystalinity.

Rozměrová změna se také liší pro jednotlivé teploty extruderu. Může to být způsobeno rozdílnou tepelnou historií materiálu. Při tisku s vyšší teplotou dochází k menší teplotní roztažnosti, podíl krystalické fáze je vyšší, a tím pádem nedojde k tak výraznému ději studené krystalizace.



Graf 7 FFF – Teplotní roztažnost

U SLA výtisků je závislost deformace vzorku (prodloužení) na změně teploty prostředí podobná lineární závislosti. Bod skelného přechodu je u těchto křivek téměř nezatelný. Ve všech případech nabývají při zvýšení teploty prostředí hodnoty roztažnosti kladných hodnot. Rozdíly ve změně rozměrů vzorku orientace Z a X (resp. Y) jsou ve srovnání s původním rozměrem vzorku malé. Ale i v tomto případě mají vzorky, které byly vytvrzovány po delší dobu, menší teplotní roztažnost.



Graf 8 SLA – Teplotní roztažnost

Z vědeckých publikací lze získat teplotu skelného přechodu pro PLA, která se od výsledků této práce liší přibližně o 7 °C. T_g pryskyřice se bude lišit podle jejího složení, pohybuje se ale kolem 45 °C. Teploty jsou pro oba materiály vyšší, než jsou výsledky této práce, kde se hodnoty pro PLA pohybují kolem 55 °C a pro pryskyřici kolem 40 °C, rozdíly jsou ale přijatelné [32–34].

Tabulka 12 Hodnoty T_g získané z publikací zabývajících se podobnou tematikou. Převzato z [32–34]

	Hodnoty z článků			Zaokrouhlené hodnoty z experimentů	
	PLA		Pryskyřice	PLA	Pryskyřice
	210 °C	240 °C	39/ 49	55 °C	40 °C
T_g (°C)	63,1	62,4			

2.3 Vyhodnocení anizotropie

Z provedených experimentů jsem získala hodnoty, ze kterých si lze udělat obrázek o anizotropii struktur vytištěných technologiemi FFF a SLA. Pro přesnější určení míry anizotropie jsem vybrala následující ukazatele.

U mechanické zkoušky v tahu jsem jako ukazatel míry anizotropie zvolila podíl mezi pevnosti v tahu nejméně pevné orientace a orientace nejpevnější, který následně odečtu od 1.

V případě FFF vzorků tištěných s teplotou extruderu 210 °C je rozdíl orientace XZ a YZ roven 0,42. U teploty extruderu 240 °C se rozdíl XZ a XY rovná 0,43.

U SLA vzorků při době tvrzení 8 sekund je nejméně pevná orientace XZ a nejpevnější XY, jejich rozdíl je roven 0,17. Vzorek, který byl tvrzen po 16 sekund, má rozdíl XY a XZ roven 0,04.

Z těchto koeficientů lze vidět, že mez pevnosti nejslabší a nejpevnější orientace v případě FFF technologie je v obou případech odlišná o téměř polovinu. Naopak u struktur vytištěných SLA tiskárnou se hodnoty liší nejvíce o 17 % a v případě tvrzení po dobu 16 sekund dokonce jen 4 %. Z toho také vyplývá, že delší doba tvrzení snižuje míru anizotropie.

Ukazatelem míry anizotropie u výsledků termomechanické analýzy jsem zvolila podíl teplotních roztažností vzorku orientace s nejmenší a největší deformací, který opět odečtu od 1.

Rozdíl roztažností se u FFF vzorků tištěných s teplotou extruderu 210 °C rovná 0,74 a s teplotou 240 °C 0,72. U SLA vzorku tvrzeného po 8 sekund je ukazatel 0,1 a u vzorku tvrzeného po 16 sekund je hodnota 0,06.

Vyšší míra anizotropie u FFF výtisků je zde ještě patrnější než u mechanické zkoušky. Rozdíl teplotních roztažností obou orientací je v případě SLA výtisků 10 %. Kdežto u struktur vytvořených FFF technologií je rozdíl v roztažnosti orientace Z a orientace X (resp. Y) odlišný o téměř 75 %.

Tabulka 13 Ukazatele anizotropie

	Mechanická zkouška	Termomechanická analýza
FFF 210 °C	0,42	0,74
FFF 240 °C	0,43	0,72
SLA 8 s	0,17	0,10
SLA 16 s	0,04	0,06

Z výsledků provedených experimentů lze tvrdit, že orientace tisku má vliv na mechanické a teplotní vlastnosti struktur vytvořených aditivní technologií, a to především u technologie Fused Filament Fabrication. Pokud tedy chceme dosáhnout největší možné pevnosti výtisku pomocí FFF, je vhodné už při návrhu modelu myslet na to, které části mají být pevnější, a ty navrhnout pro tisk v orientaci XY. Pokud tiskneme pomocí SLA, je vhodné volit vyšší časy osvětlení, pak jsou vzorky prakticky izotropního charakteru.

Výše zmíněné ukazatele jsou uvedeny pouze pro větší názornost a bližší určení anizotropie. Nejedná se o žádné oficiální hodnocení anizotropie.

3 Ekonomické porovnání FFF a SLA technologie

Pro porovnání investic je nejlepší využití kritérií hodnocení projektů, kterých je mnoho druhů. V této práci použijí kritérium NPV (Net Present Value) a EAC (Equivalent Annual Cost), jehož výpočet zahrnuje anuitu. V těchto případech se porovnává splnitelnost požadovaných cílů (zisků).

3.1.1 NPV

NPV (Net Present Value), čistá současná hodnota, je současná hodnota toku peněz daného projektu, který zahrnuje jak počáteční investici, tak i další zisky (ztráty) v průběhu životnosti projektu. Jelikož hodnota peněz se časem mění, využívá se zde diskontu pro přepočítání z budoucí na současnou hodnotu. Diskont je úroková sazba, která v sobě zohledňuje i požadovanou návratnost investice, rizika, čas a jiné [35].

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (6)$$

NPV čistá současná hodnota

CF peněžní tok za daný rok

r diskontní sazba

T životnost projektu

Výhodnost investice lze posoudit pomocí kritéria NPV (Net Present Value). Toto kritérium je maximalizační, vybírá se mezi projekty ten, který má hodnotu NPV maximální. Pro zápornou hodnotu NPV má investice menší výnosnost, než je požadovaná (volba výše diskontu). Nulové hodnoty NPV dosahuje investice, jejíž výnosnosti se přesně rovná té stanovené. Pro hodnoty NPV větší jak nula, dosahuje výnosnost investice vyšší hodnoty, než při zvoleném diskontu.

3.1.2 Anuita

Pro výpočet EAC je potřeba znát anuitu. Anuita je pravidelná splátka dlouhodobého dluhu. „Při stanovení anuity se vychází z podmínky, že součet všech anuit za celé období splácení úvěru diskontovaných k okamžiku uzavření půjčky se rovná nominální hodnotě dluhu“ [36].

$$a = \frac{(1 + r)^T \times r}{(1 + r)^T - 1} \quad (7)$$

a anuitní faktor

r diskontní sazba

T životnost investice

3.1.3 EAC

EAC (Equivalent Annual Cost), také známá pod zkratkou RCF (Roční Cash Flow), udává ekvivalentní roční peněžní tok z projektu (investice) po dobu jeho vlastnictví, provozu a údržby. Dané kritérium je vhodné použít zejména při porovnávání dvou a více projektů s různou dobou životnosti. Při určení EAC může dojít k nepřesnostem způsobeným možnou změnou diskontu či životnosti investice v průběhu let. EAC se vypočítá ze součinu NPV a anuity.

$$EAC = NPV \times a \quad (8)$$

3.2 Investiční náklady

Tato část je zaměřená na investiční náklady obou typů tiskáren. V obou porovnávaných metodách tisku je vždy za vstupní investiční náklad požadován nákup daného modelu FFF a SLA tiskárny, který je navíc v případě SLA metody rozšířen o pořízení mycí a vytvrzovací stanice CW1. Obě tiskárny se dají koupit sestavené a rovnou připravené k provozu nebo jako stavebnice, které je nutné před vlastním použitím nejdříve sestavit.

Tabulka 14 Investiční náklady na tiskárny

	Stavebnice	Sestavená	CW1	Stavebnice + CW1	Sestavená + CW1	Životnost
SL1	34 990 Kč	43 990 Kč	16 990 Kč	44 980 Kč	51 980 Kč	8 let
i3 MK3S	19 990 Kč	26 990 Kč	-	-	-	6 let

Nesestavená tiskárna je samozřejmě levnější, ale v případě zakoupení stavebnice je nutné započítat i náklady spojené se sestavením tiskárny. Dobu sestavení jsem pro oba typy tiskárny určila na 3 hodiny. Pro hodinovou mzdu 115 Kč a 130 Kč jsou ceny za sestavení spolu s celkovou cenou tiskárny vypsány v tabulce níže.

Tabulka 15 Sestavení tiskárny

Sestavení tiskárny	
Čas	3 hod
Hodinová mzda (Kč/hod)	115 130
Cena sestavení	345 Kč 390 Kč
Cena tiskárny i3 MK3S s prací	20 335 Kč 20 380 Kč
Cena tiskárny SL1 a CW1 s prací	45 325 Kč 45 370 Kč

V následující tabulce porovnávám jednotlivé investice, kdy uvažuji pouze investiční náklady a tříprocentní hodnotu diskontu, kterou jsem si zvolila tak, aby hodnota zohledňovala bezrizikový výnos a možnou rizikovost dané investice. V případě SL1 tiskárny jsem zahrнула i mycí a vytvrzovací stanici CW1, která je pro úspěšnou výrobu nezbytná.

Tabulka 16 Investiční náklady

	i3 MK3S	i3 MK3S (stavebnice)	SL1 + CW1	SL1 + CW1 (stavebnice)
Diskont	3 %			
Anuita	0,18		0,14	
CF₀	26 990 Kč	20 335 Kč	51 980 Kč	45 325 Kč
RCF	4 982 Kč	3 754 Kč	7 405 Kč	6 457 Kč

Tabulka níže ukazuje, jak se změní ekvivalentní roční náklady za tiskárny při změně diskontu.

Tabulka 17 Citlivostní analýza – diskont

Diskont	RCF			
2%	4 818 Kč	3 630 Kč	7 096 Kč	6 187 Kč
3%	4 982 Kč	3 754 Kč	7 405 Kč	6 457 Kč
4%	5 149 Kč	3 879 Kč	7 720 Kč	6 732 Kč
5%	5 318 Kč	4 006 Kč	8 042 Kč	7 013 Kč
	i3 MK3S	i3 MK3S (stavebnice)	SL1 + CW1	SL1 + CW1 (stavebnice)

3.3 Provozní náklady

Samotný proces tisku pomocí SL1 tiskárny je v porovnání s FFF výrazně náročnější. SL1 tiskárna v porovnání s FFF vyžaduje důkladnější přípravu před samotným tiskem, úpravu výtisku po dokončení procesu tisknutí i větší opatření pro zajištění požadované bezpečnosti během procesu tisknutí. Je proto potřeba v případě SLA metody počítat i s dodatečnými náklady, do kterých patří i laboratorní pomůcky jako jsou laboratorní plášť, speciální nádoba na odpad na předměty od resinu a další možné náklady v souvislosti s bezpečnostním opatřením. Používání daných pomůcek je ale spíše individuální a v této práci zahrnuté nebudou.

Uvažované ceny materiálů a komponentů tiskáren jsou převzaty především z internetového obchodu Prusa3d.cz.

3.3.1 Náklady na tisk

Pro obě metody jsou náklady na tisk různé. Cena materiálu se od sebe výrazně liší. Liší se i požadavky na přípravu před tiskem a post-processing. Mezi společné náklady lze zařadit isopropylalkohol a ubrousky na odmaštění tiskové plochy a dna vaničky. K manipulaci s resinem je nutné použít gumové rukavice. Tyto náklady na jednotlivý tisk jsou ale velice malé, a proto zanedbatelné.

Náklady na tisk FFF metodou zahrnují hlavně materiál. Cena strun se pohybuje v rozmezí 500 až 900 Kč. Cena strun závisí především na typu použitého materiálu a samozřejmě i na jeho barvě. Za vyšší pořizovací cenu je možné zakoupit struny s velmi neobvyklými barvami (metalické, transparentní atd).

Tabulka 18 Cena materiálu FFF

Materiál	PET	PLA		ASA	ABS	FLEX	PRUSAMENT	
Cena (Kč)	599	549	890	699	599	890	599	699
Množství (kg)	1	1	0,75	0,85	1	0,5	1	0,85

Náklady na pryskyřice jsou poněkud vyšší. Jejich cena se pohybuje přibližně od 1500 Kč za kilogram, jde-li o tvrdou pryskyřici. Flexibilní pryskyřice se využívají pro pružnější modely. Odlévací pryskyřice jsou cenově dražší, jelikož se tyto pryskyřice používají pro specializovanou výrobu například pro dentální nebo šperkařskou výrobu.

Tabulka 19 Cena materiálu SLA

Prskyřice	Tvrdá	Odlévací	Flexibilní
Cena (Kč/kg)	1499	5500	2190

V této kalkulaci počítám s tiskem deseti vzorků na mechanickou zkoušku v tahu ve všech třech orientacích. Jelikož se tiskne na obou tiskárnách s přibližně stejným objemem materiálu, je zřejmé, že výtisky z SL1 tiskárny budou dvakrát až třikrát dražší, jelikož prskyřice je oproti filamentu také dvakrát až třikrát dražší. Není to však přímo úměrný vztah, jelikož v případě FFF metody je nutné pro tisk těchto vzorků využívat podpěr či podložky. U SLA metody se tiskne s podložkou pouze jednou při tisku YZ. U FFF metody se využívají pro tisk s orientací XZ podpěry a u orientace YZ podložka. Materiál na podpěry a podložku započítávám do použitého materiálu, jelikož je to pro úspěšný tisk nezbytné.

Tabulka 20 Náklady na materiál na tisk deseti vzorků

Náklady na tisk (10 ks)						
	FFF				SLA	
	Materiál (g)	Cena (Kč)	Objem (mm ³)	Délka (m)	Materiál (ml)	Cena (Kč)
XY	20,11	11,04	16 217	6,74	15,53	23,3
XZ	22,07	12,12	17 802	7,4	16,46	24,7
YZ	22,78	12,51	18 370	7,64	15,73	23,6

3.3.2 Náklady na údržbu

Při používání dochází k opotřebení jednotlivých součástí tiskáren. Pro zajištění dobré kvality tisku je nutné opotřeбенé komponenty pravidelně měnit, a proto je nutné náklady, které jsou s udržováním tiskáren v dobré kondici spojené, v provozních nákladech také uvažovat. V tabulce jsou zaznamenány nejčastěji měněné komponenty s jejich cenou a předpokládanou životností. Četnost výměn bude ovlivněna především celkovým zacházením a náročností tisku.

Tiskneme-li produkt, na jehož kvalitu neklademe vysoké nároky, je možné pro jeho výtisk využít již použitou a třeba i poškrábanou destičku s horší přilnavostí. Tím dosáhneme nižších nákladů na údržbu.

Předpokládám ale, že se požaduje co nejlepší kvalitu tisku, a budu tedy počítat s životností komponentů z tabulky, jejíž hodnoty jsem získala přímo od výrobce.

Tabulka 21 Životnost komponentů

Životnost komponentů tiskárny			
	i3 MK3A		SL 1
	Tryska	Ocelový plát	FEP fólie
Životnost	1000 hod	1500 hod	500 hod
Cena	199 Kč	899 Kč	200 Kč

3.3.3 Náklady na obsluhu tiskáren

V případě, kdy se jedná o výrobní činnost firmy, je nutné do nákladů započítat i pracovníka obsluhující tiskárnu. Jeho platové ohodnocení se pohybuje v rozmezí 20 000 – 23 000 Kč/měsíc, zde vycházím z inzerátů nabídek práce firmy Prusa. Zároveň počítám s tím, že pracovní doba je 8 hodin denně, 5 dnů v týdnu a 52 týdnů v roce. To vychází na 260 pracovních dnů v roce (pro zjednodušení jsem zanedbala svátky). Přibližně tedy vychází hodinová mzda od 115 do 130 Kč [37].

Tabulka 22 Peněžní ohodnocení

Měsíční plat (Kč)	20 000 - 23 000
Hodinová mzda (Kč)	115 - 130

3.3.4 Náklady na spotřebu energie

Dalším nákladem na provoz tiskárny je spotřeba elektrické energie. U i3MK3s se počítá se spotřebou elektrické energie pouze při samotném tisku. Naopak u tisku s SLA technologií je potřeba započítat i dodatečný postprocessing, který je zajištěn mycí a vytvrzovací linkou CW1.

Jelikož předpokládám, že tiskárny nebudou jediným spotřebičem provozované ve výrobě, bude fixní položka regulované části platby za elektrickou energii hrazena nezávisle na využívání tiskáren a nebudu ji tedy při výpočtu uvažovat. Pokud tomu tak nebude, lze fixní náklady zanedbat stejně, jelikož v případě využívání jakékoliv z tiskáren budou fixní náklady identické. Nejsou proto pro porovnání tiskáren tolik klíčové, a jsou tím pádem zanedbatelné.

Spotřeba elektrické energie tiskárny se získá z výkonu, který tiskárna odebírá (příkon spotřebiče) po celou dobu tisku. Spotřeba elektrické energie se lze tedy získat z integrálu výkonu podle času. V případě, kdy je výkon konstantní, lze spotřebu vypočítat z následujícího zjednodušeného vzorce. V tomto případě se místo s konstantním výkonem počítá s jeho průměrnou hodnotou [38].

$$W = P_{avg} \times t \quad (9)$$

W ... celková spotřeba

P_{avg} ...průměrný příkon spotřebiče

t...čas

Jelikož si každý dodavatel účtuje rozdílnou cenu za odběr energie, rozhodla jsem se počítat s průměrnou cenou proměnných plateb za rok 2019, která činí za 1 kWh přibližně 4,56 Kč [39].

Tabulka 23 Cena energie

Průměrná cena energie 2019	
1 kWh	4,56 Kč

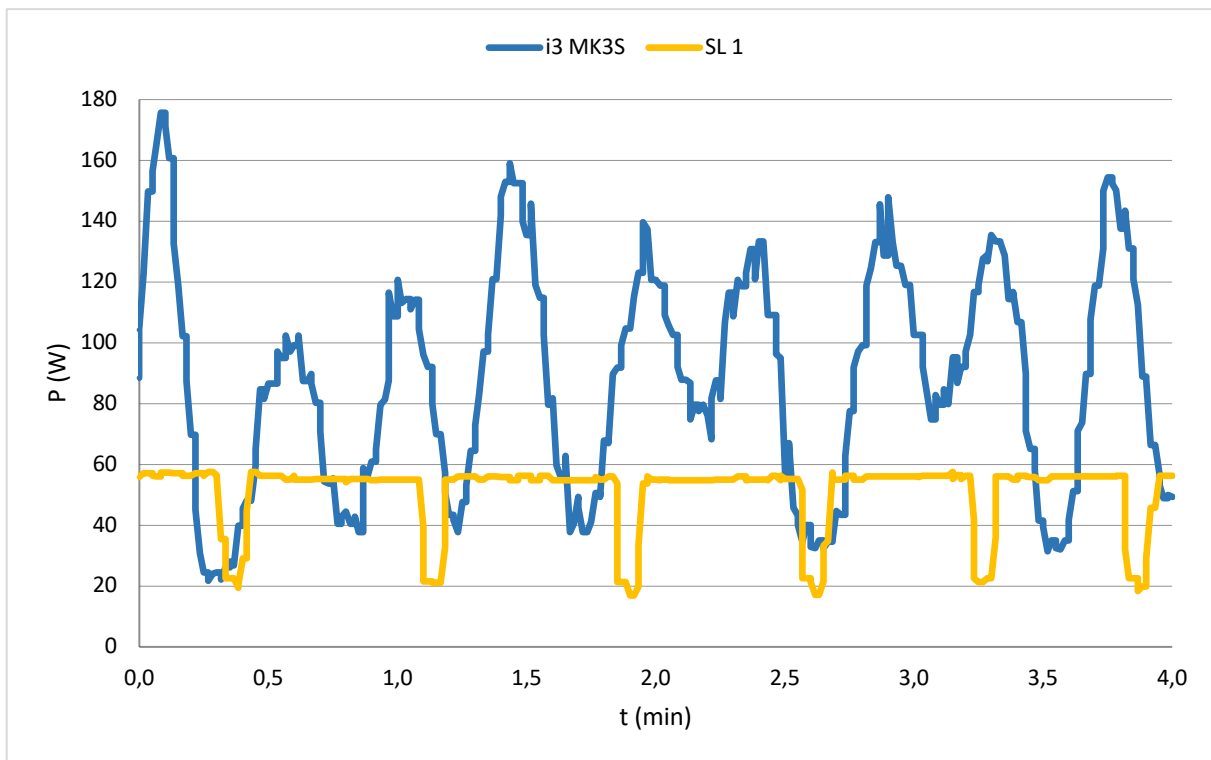
Při tisku deseti vzorků pro mechanickou zkoušku tahem jsem měřila spotřebu elektrické energie u všech tří orientací a při obou metodách tisku. U SLA metody je navíc změřena i spotřeba stanice CW1 při mytí a vytvrzování. Pro přesnější porovnání se náklad na chod této stanice přičítá k nákladům na spotřebu samotného tisku SLA metodou.

Tabulka 24 Spotřeba pro SL1 a CW1

SLA - 10 vzorků					
	Doba tisku	Průměrný výkon (W)	Spotřeba (Wh)	Cena (Kč)	Celková cena (Kč)
XY	20 min 21 s	42,5	14,4	0,066	0,132
YZ	44 min 43 s	42,8	31,9	0,146	0,212
XZ	4 h 43 min 3 s	42,2	201,1	0,917	0,983
Mytí	4 min	6,7	0,4	0,002	-
Vytvrzování	10 min	84,3	14,0	0,064	-

Tabulka 25 Spotřeba pro i3 MK3S

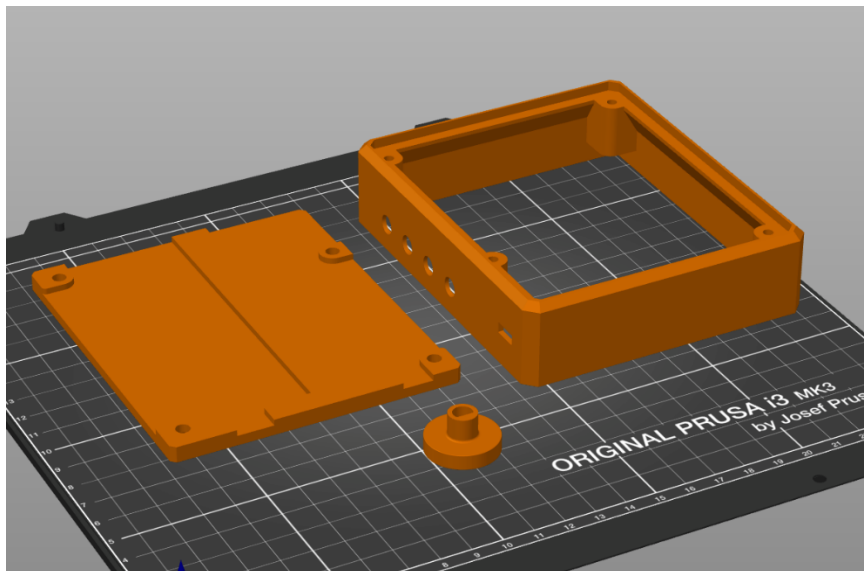
FFF - 10 vzorků				
	Doba tisku	Průměrný výkon (W)	Spotřeba (Wh)	Cena (Kč)
XY	1 h 36 min 35 s	98,4	172,9	0,07
YZ	3 h 37 min 12 s	105,3	381,1	0,17
XZ	4 h 47 min 48 s	93,7	449,3	0,20



Graf 9 Odebraný výkon - i3 MK3S a SL1

3.4 Porovnání nákladů stejného výrobku při tisku FFF a SLA

Pro praktické porovnání dvou typů tiskáren jsem zvolila jeden výrobek, na kterém porovnám jednotlivé metody tisku z hlediska nákladů. Uvažuji zde výše zmíněné vstupní investiční náklady vynaložené na pořízení tiskárny, dále pak náklady spojené s materiálem, údržbou, obsluhou a spotřebou energie.



Obrázek 19 Krabička, dno, tlačítko

Výrobek, který byl použit ke kalkulaci nákladů, se skládá ze tří částí: krabičky, dna a tlačítka. Krabičku a dno lze tisknout vždy po jednom kusu, naopak tlačítek je možné vytisknout během jednoho cyklu i více. K tisku byla využita jedna tiskárna FFF a jedna tiskárna SLA.

Tisk je rozvržen do pracovní doby obsluhy (8 hodin) s tím, že může doběhnout v době jeho nepřítomnosti, jelikož není při tisku nutný nepřetržitý dohled. Aby byl čas vyplněn co nejlépe, tisknou se v případě FFF tiskárny tři celkové výrobky (krabička, dno a tlačítko) za dva pracovní dny. Na začátku prvního dne se tiskne třikrát po sobě dno krabičky a ke konci pracovní doby nechám tisknout krabičku, která se dotiskne během nepřítomnosti obsluhy. Druhý den se na začátku dají tisknout tlačítka, u kterých jsem v rámci ucelení cyklu zvolila tisk po třech kusech, poté se dvakrát za sebou nastaví tisk krabičky. Tímto způsobem se vyrobí 360 kusů za rok.

Tabulka 26 Podrobnosti o tisku FFF

FFF			
	Krabička	Dno krabičky	Tlačítko
Materiál	ASA Extrafill 1716 Kč/2500 g		PETG 699 Kč/1 kg
Čas	6 hod 1 min 26 s	2 hod 37 min 54 s	48 min 58 s
Filament (mm³)	40061	25616	4896
Váha filamentu (g)	42,87	27,41	6,22
Cena filamentu (Kč)	29,42	18,81	4,35
Počet kusů za tisk	1	1	3

V případě tisku na SLA tiskárně trvá tisk jednoho celkového výrobku jeden den. Nejdříve se tiskne tlačítko, poté dno a nakonec krabička. Vyrobí se tak 260 kusů za rok.

Tabulka 27 Podrobnosti o tisku SLA

SLA			
	Krabička	Dno krabičky	Tlačítko
Materiál	Azure Blue Tough – 1499 Kč/1 kg		
Čas	7 h 15 min 35 s	7 h 0 min 25 s	57 min 56 s
Filament (ml)	44,2	40,3	2,3
Cena materiálu (Kč)	66,3	60,4	3,5
Počet kusů za tisk	1	1	1

Mezi investiční náklady je započítán nákup tiskáren (stavebnic) a práce k jejich sestavení. V cenách tiskáren je tedy zahrnuta i mzda za práci potřebnou k jejímu složení.

Tabulka 28 RCF tiskáren

	i3 MK3S (stavebnice)	SL1 + CW1 (stavebnice)
Cena	20 335 Kč	45 325 Kč
Diskont	3 %	
RCF	3 754 Kč	6 457 Kč

Mezi provozní náklady jsem zahrнула údržbu, obsluhu, materiál a spotřebu energie. Náklady na laboratorní pomůcky jsem vynechala, jelikož se jedná spíše o individuální záležitost a také nijak finančně výraznou. Lze předpokládat, že v rámci životnosti tiskárny bude potřeba vyměnit více částí, než jsou pouze trysky, pláty a fólie. Od výrobce jsem však dostala údaje pouze o těchto součástkách, proto nejsou do výpočtu zahrnuty jiné možné komponenty. Jelikož je životnost těchto částí při takto rozvrženém tisku daného výrobku malá (nepřekračuje ani půl roku), jsou ekvivalentní roční náklady vyšší než původní cena komponentu.

Tabulka 29 RCF údržba

		Životnost (let)	RCF (Kč)
i3 MK3S	Tryska	0,29	693
	Ocelový plát	0,43	2 086
SL1	FEP folie	0,13	1 584

Tabulka 30 Spotřeba při tisku krabičky

	FFF	SLA
Průměrný výkon (kW)	99,13	43,71
Cyklus (dny)	2	1
Počet výrobků/cyklus	3	1
Doba tisku za cyklus (h)	26,77	15,23
Tiskové hodiny/rok	3480	3960
Spotřeba (MWh)	345	173
Cena spotřeby/rok (Kč)	1573	789

Tabulka 31 Náklady na obsluhu

Roční pracovní doba	260 dní/rok
Denní pracovní doba	8 h/den
Hodinová mzda	115 Kč
Roční náklady na obsluhu	240 000 Kč

Tabulka 32 Náklady na materiál

	FFF	SLA
Na 1 cyklus	217 g	87 ml
Cena na 1 cyklus	149 Kč	130 Kč
Cena za 500 výrobků	24 840 Kč	65 102 Kč
Počet výrobků za rok	390	260
Cena materiálu za rok	19 375 Kč	33 853 Kč

V tabulce níže lze vidět celkové roční náklady na tisk krabiček se všemi jejími částmi pro oba typy tiskáren. Počáteční investice obou tiskáren byla přepočtena pomocí anuitního faktoru na RCF, ostatní náklady mají roční charakter. Dále předpokládám, že se nebude měnit cena materiálu, náhradních dílů, obsluhy a energie. Z výpočtu vychází, že jsou roční náklady pro tisk na SLA tiskárně přibližně o 15 tisíc větší než pro tisk na FFF tiskárně.

Tabulka 33 Finální RCF

	FFF	SLA
RCF Investice	3 754 Kč	6 457 Kč
RCF Materiál	19 375 Kč	33 853 Kč
RCF Spotřeba	1 573 Kč	789 Kč
RCF Údržba	2 778 Kč	1 584 Kč
RCF Obsluha	240 000 Kč	
Celkové RCF	267 481 Kč	282 683 Kč
Cena na kus	686 Kč	1 087 Kč
Cena za kus bez započítání obsluhy	70 Kč	164 Kč

Náklady na obsluhu jsou největší výdajovou položkou při tisku. Obsluha tiskárny je ale vyžadována pouze mezi tiskem jednotlivých částí a případně při občasné kontrole kvality probíhajícího procesu tištění. Pokud by šlo o tisk v podniku s více zaměstnanci, tuto roli by mohl hravě zvládnout dodatečně některý z nich a nebylo by nutné platit tak velké náklady za dalšího pracovníka. Proto je v tabulce uvedena cena výrobku za kus jak s obsluhou, tak bez ní.

V případě, kdy bych nepočítala roční náklady, ale náklady například pět set vytištěných kompletních produktů tištěných na dvaceti tiskárnách zároveň, byly by náklady následující.

Tabulka 34 Náklady na tisk 500 ks (20 tiskáren)

20 tiskáren	FFF	SLA
Doba tisku	16,7 dní	25 dní
Investice	4 822 Kč	12 417 Kč
Materiál	24 840 Kč	65 102 Kč
Spotřeba	2 021 Kč	1 518 Kč
Údržba	3 569 Kč	3 046 Kč
Obsluha	15 364 Kč	23 000 Kč
Celkové náklady	50 616 Kč	105 083 Kč
Cena za kus	101 Kč	210 Kč
Cena za kus bez započítání obsluhy	70 Kč	164 Kč

Tisk takového množství FFF metodou by trvalo 16,7 pracovních dní. U SLA metody by výroba trvala 25 pracovních dnů.

Při tisku na 20 tiskárnách lze vidět, že ceny za kus bez započítání obsluhy se nijak výrazně nezměnily. Je to kvůli stálým nákladům, jako je materiál, údržba i spotřeba. Hlavní změnou jsou náklady na obsluhu, které se díky zrychlení produkce výrazně snížily.

V následující tabulce byla provedena citlivostní analýza, kde se změnila cena za materiál pro SLA tiskárnu. Aby se náklady za kus bez započítání obsluhy rovnaly přibližně nákladům FFF tiskárny, musela by cena pryskyřice klesnout na třetinu.

Tabulka 35 Citlivostní analýza - změna ceny materiálu SLA

Cena pryskyřice/kg	RCF Materiál	Cena za kus bez započítání obsluhy
1 300 Kč	29 359 Kč	147 Kč
1 200 Kč	27 100 Kč	138 Kč
1 000 Kč	22 584 Kč	121 Kč
800 Kč	18 067 Kč	103 Kč
600 Kč	13 550 Kč	86 Kč
400 Kč	9 033 Kč	69 Kč

I přestože je průměrná spotřeba SLA tiskárny přibližně dvojnásobná, na finální cenu výrobku nemá příliš velký vliv.

Tabulka 36 Citlivostní analýza - změna ceny elektřiny

Cena elektřiny /kWh	RCF Spotřeba		Cena za kus bez započítání obsluhy	
	FFF	SLA	FFF	SLA
10 Kč	4 420 Kč	3 330 Kč	78 Kč	174 Kč
8 Kč	3 536 Kč	2 664 Kč	75 Kč	171 Kč
6 Kč	2 652 Kč	1 998 Kč	73 Kč	169 Kč
4 Kč	1 768 Kč	1 332 Kč	71 Kč	166 Kč
2 Kč	884 Kč	666 Kč	69 Kč	164 Kč

3.4.1 Zmetkovitost

Zmetkovitost udává procentuálně počet nepovedených výrobků v rámci nějakého pracovního úseku. Jedná se ryze o přibližný ukazatel spolehlivosti tisku. Jeho hodnota závisí především na zkušenosti uživatele a podmínkách tisku. Dané hodnoty zmetkovitosti pro tiskárny SLA a FFF byly získány po konzultaci s odborníky ze společností Prusa Research.

Tabulka 37 Zmetkovitost

SLA	FFF
0,75%	1,15 %

Započítáním zmetkovitosti se náklady na výrobek zvýší. Hodnota zmetkovitosti je však velice malá a nebude mít takový vliv na výslednou cenu výrobku. V následující tabulce jsou započítány náklady na dodatečný tisk výrobků, aby výsledná výroba obsahovala 500 kusů povedených výrobků. I přestože je zmetkovitost u SLA tiskárny nižší, výsledné náklady jsou pro ni stále vyšší než pro technologii FFF.

Tabulka 38 Náklady na zmetky

	FFF	SLA
Zmetky	5,5	3,75
Doba tisku	0,21 dní	0,10 dní
Investiční	60 Kč	61 Kč
Materiál	273 Kč	488 Kč
Spotřeba	22 Kč	11 Kč
Údržba	19 Kč	12 Kč
Obsluha	197 Kč	90 Kč
Celkové náklady	572 Kč	662 Kč
Cena za kus	104 Kč	177 Kč
Cena za kus bez započítání obsluhy	68 Kč	153 Kč

Pokud dodatečné náklady započítám do celkové kalkulace, vyjde mi následující tabulka. Výsledná cena tabulky ukazuje náklady na tisk při celkové výrobě 500 ks na dvaceti tiskárnách se započítanými náklady způsobenými chybným tiskem.

Tabulka 39 Náklady na tisk 500 ks se započítanou zmetkovitostí

	FFF	SLA
Doba tisku	16,9 dní	25,1 dní
Investiční	4 883 Kč	12 478 Kč
Materiál	25 113 Kč	65 590 Kč
Spotřeba	2 043 Kč	1 529 Kč
Údržba	3 588 Kč	3 058 Kč
Obsluha	15 561 Kč	23 090 Kč
Celkové náklady	51 188 Kč	105 745 Kč
Cena za kus	102 Kč	211 Kč
Cena za kus bez započítání obsluhy	71 Kč	165 Kč

3.4.2 Vyhodnocení

U zvoleného výrobku, krabičky, dna a tlačítka, jsem počítala náklady na tisk. U obou výpočtů, jak při ekvivalentních ročních nákladech, tak i při kalkulaci nákladů u tisku 500 kusů se dvaceti tiskárnami najednou, vyšla SLA metoda výrazně draž.

Pokud opomenou náklady na obsluhu, tak rozdíl v nákladech způsobuje především pořizovací cena tiskáren i náklady na výrobní materiál.

Dále jsem v kalkulaci započítala i vliv zmetkovitosti daných technologií. Procentuální hodnota zmetkovitosti u obou technologií je však velice malá a cenu téměř neovlivní. I přestože je

zmetkovitost u SLA nižší v porovnání s FFF technologií, náklady způsobené nepovedenými výtisky jsou u SLA vyšší.

Hodnoty zmetkovitosti byly konzultovány s odborníky ze společnosti Prusa Research, kteří ji vztahují k velkému objemu výroby v tiskové farmě s profesionální obsluhou. Pro tento experiment by byly nejvhodnější hodnoty získané z vlastního měření, které kvůli uzavření škol nebylo možné provést. Je pravděpodobné, že hodnoty zmetkovitosti získané z vlastního měření by byly vyšší, alespoň pro technologii FFF, která se na základě mého pozorování během experimentu jeví méně spolehlivější.

Dalším negativem je samotný typ modelu, který byl navržen pro FFF tiskárnu, a tisk je proto pro ni vhodnější. Je možné, že při volbě jiného výrobku by byl rozdíl v nákladech pro FFF a SLA tisk menší.

Při výběru technologie by se výrobce měl rozhodovat nejen na základě financí, ale také podle vlastností produktu. Stereolitografie proto může být vhodnější i přes její vyšší cenu. Její výtisky bývají detailnější, s hladším povrchem a s nižší mírou anizotropie, jak je vidět z výsledků této práce.

Závěr

Cílem této práce bylo porovnání aditivní technologie Fused Filament Fabrication (FFF) a stereolitografie (SLA).

V první části jsou tyto dvě technologie porovnávány z hlediska anizotropie vytištěných struktur. Anizotropie má vliv na vlastnosti finálního výrobku. Je proto důležité ji brát v potaz už při návrhu digitálního modelu, aby se docílilo těch nejlepších možných vlastností výrobku. Výtisky vyrobené oběma technologiemi s různými parametry tisku byly podrobeny mechanické zkoušce v tahu, u které se zkoumala především mechanická pevnost výtisku, a termomechanické analýze zkoumající teplotní roztažnost.

Tyto experimenty dokázaly určitou míru anizotropie výtisků u obou technologií. Z výsledků je patrné, že míra anizotropie u FFF výtisků je zásadně vyšší než u výtisků vyrobených stereolitografií. Míra anizotropie se u mechanické zkoušky pohybuje pro výtisky tištěné s teplotou extruderu 210 °C kolem 42 % a pro teplotu 240 °C kolem 43 %. Vzorky vyrobené SLA technologií mají míru anizotropie výrazně nižší, a to pro výtisky s dobou vytvrzování 8 sekund 17 % a po 16 sekund dokonce 4 %. Termomechanická analýza potvrzuje výsledky mechanické zkoušky. Míra anizotropie FFF technologie vzrostla na 74 % u výtisků vytištěné extruderem o teplotě 210 °C a na 72 %, kdy teplota extruderu byla 240 °C. Naopak SLA technologie má míru anizotropie nízkou. Pro výtisky s dobou vytvrzování 8 sekund se míra anizotropie rovná 10 % a pro 16 sekund 6 %. Důležitým poznatkem u SLA technologie je snížení anizotropie vytištěné struktury s delší dobou vytvrzování. U FFF technologie k ničemu takovému nedochází.

Ekonomická část byla zaměřená na kalkulaci investičních a provozních nákladů těchto dvou technologií a na porovnání jejich nákladů při tisku konkrétního výrobku. Nejdřív jsem změřila a spočítala investiční a provozní náklady a poté jsem výsledky aplikovala pro porovnání provozních nákladů tiskáren technologie FFF a SLA. Provedla jsem kalkulaci nákladů tisku konkrétního výrobku, krabičky, dna a tlačítka, pro tisk 500 kompletních výrobků s tiskem na 20 tiskárnách a zároveň spočítala ekvivalentní roční náklady. Oba možné scénáře ukázaly, že technologie SLA je oproti FFF výrazně dražší. Náklady na jeden kompletní výrobek vychází u FFF tiskárny bez započítání obsluhy přibližně na 70 Kč, u SLA tiskárny na 164 Kč. Ani po započítání zmetkovitosti se rozdíl cen nijak nezmění, jelikož se cena za výrobek u obou technologií zvýší přibližně o 1 Kč za kus.

V této oblasti by dále bylo možné zkoumat vliv změny parametrů tisku na anizotropii výtisků. Například, jak by se měnila anizotropie při tisku s jiným materiálem nebo při změně tloušťky vrstvy. U FFF technologie lze pozorovat i vliv výplně na anizotropii. Možností, jak měnit vlastnosti výtisků, je mnoho. Další možností rozšíření této práce je provést více druhů experimentů než pouze mechanickou zkoušku v tahu nebo termomechanickou analýzu.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Výsledky mechanické zkoušky v tahu

Seznam použité literatury

- [1] ČÁSLAVSKÝ, František. *Zkoušky vybraných vlastností materiálů pro 3D tisk* [online]. Brno, 2019. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/177751/Testovani%20vybranych%20materialu%20pro%203D%20tisk.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Software Issues for Additive Manufacturing. In: Ian GIBSON, David ROSEN a Brent STUCKER, ed. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* [online]. New York, NY: Springer, 2015 [vid. 2019-12-07], s. 351–374. ISBN 978-1-4939-2113-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2113-3_15
- [3] GEBHARDT, Andreas. *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping • Rapid Tooling • Rapid Manufacturing* [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011 [vid. 2019-12-07]. ISBN 978-3-446-42552-1. Dostupné z: doi:10.3139/9783446431621
- [4] STRÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019. První vydání. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [5] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook - Technologies design and applications*. Amsterdam: Coers & Roest, 2017.
- [6] *Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG* [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [7] *Prusa3d* [online]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/en/>
- [8] *FFF Vs. SLA Vs. SLS: 3D Printing_Best 3D Printer Supplies & Manufacturer| Best 3D Printer 2019|3 d printer OEM ODM and OBM* [online]. 2018 [vid. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://www.dcreate3d.com/a/news/68.html>
- [9] PRŮŠA, Josef. *Introducing Original Prusa SL1* [online]. 2018 [vid. 2019-11-22]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/introducing-original-prusa-sl1-open-source-sla-3d-printer-by-josef-prusa/#_ga=2.139237939.1696460438.1574370219-424481986.1573486142&_gac=1.258891384.1574416540.Cj0KCQiAq97uBRCwARIsADTziyY2dkexRfOsNRiFgws3vczQfAEegQit--7gMWWIZMH0OzkePDLDE2oaArC8EALw_wcB
- [10] GOULDING, Charles. 3D Printing in the Electrical Industry. *Fabbaloo* [online]. 2017 [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/5/27/3d-printing-in-the-electrical-industry>
- [11] JACKSON, Chad. *3D Printing Electronics: What are the Applications? | Lifecycle Insights* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.lifecycleinsights.com/tech-guide/3d-printing-electronics/>
- [12] WU, Sung-Yueh, Chen YANG, Wensyang HSU a Liwei LIN. 3D-printed

microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *Microsystems & Nanoengineering* [online]. 2015, **1**(1), 15013 [vid. 2020-04-02]. ISSN 2055-7434. Dostupné z: doi:10.1038/micronano.2015.13

[13] S.R.O, oXy Online. 3D tisk elektronických obvodů vylepšen pomocí UV světla. *Svethardware.cz* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-elektronickych-obvodu-vylepsen-pomoci-uv-svetla/45521>

[14] *3D tisk elektroniky úspěšně pokračuje* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:63988/3d-tisk-elektroniky-uspesne-pokracuje>

[15] *Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics* [online]. [vid. 2020-04-25]. Dostupné z: http://www.ojournal.org/mv_html/j00002/2018-01/180209000001_WEB.htm

[16] VESELÝ, P, T TICHÝ, O ŠEFL a E HORYNOVÁ. Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **461**, 012091 [vid. 2020-04-27]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/461/1/012091

[17] *Anisotropy* [online]. B.m.: Encyclopædia Britannica, 2006. Dostupné z: <https://academic-eb-com.ezproxy.techlib.cz/levels/collegiate/article/anisotropy/7649>

[18] SZYKIEDANS, Ksawery a Wojciech CREDO. Mechanical Properties of FDM and SLA Low-cost 3-D Prints. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **136**, 257–262 [vid. 2020-04-01]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.01.207

[19] BAKER, Andrew M., John MCCOY, Bhaskar S. MAJUMDAR, Brittany RUMLEY-OUELLETTE, Jacob WAHRY, Alexandria N. MARCHI, John D. BERNARDIN a Dusan SPERNJAK. Measurement and Modelling of Thermal and Mechanical Anisotropy of Parts Additively Manufactured using Fused Deposition Modelling (FDM). In: *Structural Health Monitoring 2017: Structural Health Monitoring 2017* [online]. B.m.: DEStech Publications, Inc., 2017 [vid. 2020-04-01]. ISBN 978-1-60595-330-4. Dostupné z: doi:10.12783/shm2017/13917

[20] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/632-krivka-deformace>

[21] PHILIPFIGARIFOLLOW. Steps to Analyzing a Material's Properties From Its Stress/Strain Curve. *Instructables* [online]. [vid. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Steps-to-Analyzing-a-Materials-Properties-from-its/>

[22] LAWRENCE, Erica. ASTM D638: The Definite Guide to Plastic Tensile Testing. *Instron* [online]. [vid. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.instron.us/testing-solutions/by-standard/astm/multiple-testing-solutions/astm-d638>

[23] *ASTM D638-14 TYPE V | 3D CAD Model Library | GrabCAD* [online]. [vid. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/astm-d638-14-type-v-1>

[24] Trhačka DEFORM 02 - přenosné zkušební deformační zařízení. *Trhačka* [online]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/page-index>

[25] *Termické analýzy* [online]. B.m.: Univerzita Tomáše Bati. Dostupné

z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf

[26] POLANSKÝ, Ing Radek. Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy. 2008, 12.

[27] PASCAULT, J. P. a R. J. J. WILLIAMS. Glass transition temperature versus conversion relationships for thermosetting polymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* [online]. 1990, **28**(1), 85–95 [vid. 2019-12-08]. ISSN 08876266, 10990488. Dostupné z: doi:10.1002/polb.1990.090280107

[28] ŠMÍDOVÁ, Irena, Jana ČOPÍKOVÁ a Antonín SIKORA. Krystalizace a skelný přechod kandytů vyrobených z isomaltu. *Chem. Listy* [online]. 2004, 6. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2004_03_05.pdf

[29] HAGUE, R., S. MANSOUR, N. SALEH a R. HARRIS. Materials analysis of stereolithography resins for use in Rapid Manufacturing. *Journal of Materials Science* [online]. 2004, **39**(7), 2457–2464 [vid. 2020-04-24]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1023/B:JMSC.0000020010.73768.4a

[30] CHACÓN, J.M., M.A. CAMINERO, E. GARCÍA-PLAZA a P.J. NÚÑEZ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design* [online]. 2017, **124**, 143–157 [vid. 2020-04-24]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065

[31] SHI, Nan a Qiang DOU. Non-isothermal cold crystallization kinetics of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate)/treated calcium carbonate composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2015, **119**(1), 635–642 [vid. 2020-05-01]. ISSN 1588-2926. Dostupné z: doi:10.1007/s10973-014-4162-z

[32] HUANG, Bi Wu, Zi Xiang WENG a Wei SUN. Study on the Properties of DSM SOMOS 11120 Type Photosensitive Resin for Stereolithography Materials. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **233–235**, 194–197 [vid. 2020-04-24]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.194

[33] DORFINGER, Peter, Jürgen STAMPFL a Robert LISKA. Toughening of Photopolymers for Stereolithography (SL). *Materials Science Forum* [online]. 2015, **825–826**, 53–59 [vid. 2020-04-24]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.53

[34] VESELÝ, Petr. Nozzle Temperature Effect on 3D Printed Structure Properties. In: *ELEKTROTECHNOLÓGIA 2019: Zborník príspevkov z medzinárodnej konferencie ELEKTROTECHNOLÓGIA 2019*. Zuberec, Slovakia: Združenie elektrotechnikov Slovenska, 2019. ISBN 978-80-969729-1-3.

[35] LARRABEE, David a Jason VOSS. *Valuation Techniques : Discounted Cash Flow, Earnings Quality, Measures of Value Added, and Real Options*. CFA Institute Investment Perspectives Ser. B.m.: John Wiley & Sons, 2012.

[36] FIALOVÁ, Helena a Jan FIALA. *Malý ekonomický slovník*. Praha: A plus, 2006.

[37] Obsluha strojů na výrobu a zpracování výrobků z plastu. *Kurzy.cz* [online]. Dostupné

z: <https://prace.kurzy.cz/urad-prace/nabidka-prace/obsluha-stroju-na-vyrobu-zpracovani-vyrobku-z-praha-31243e2f5.html>

[38] *Znáte výpočet spotřeby elektrické energie?* | *E.ON* [online]. [vid. 2019-12-03].
Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/vypocet-spotreby-elektricke-energie>

[39] *Cena elektřiny za kWh 2019 u ČEZ, E.ON, PRE a dalších.* *Elektrina.cz* [online]. 2019.
Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/cena-elektriny-za-kwh-2019-cez-eon-pre-a-dalsi-dodavatele?fbclid=IwAR3gmXj8vS-008IO6rdx516p3CNZQ48rYJK5XQ4UQx0yYNxmlT-zKfpT6t4>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 ADITIVNÍ VÝROBA. PŘEVZATO Z [3]	9
OBRÁZEK 2 KATEGORIE ADITIVNÍ VÝROBY. PŘEVZATO Z [5]	10
OBRÁZEK 3 TISKÁRNA I3 MK3S. PŘEVZATO Z [4]	11
OBRÁZEK 4 EXTRUDER FFF TISKÁRNY. PŘEVZATO Z [4]	12
OBRÁZEK 5 TERMOPLASTOVÉ STRUNY. PŘEVZATO Z [8].....	14
OBRÁZEK 6 PROCES FFF TISKU. PŘEVZATO Z [5]	15
OBRÁZEK 7 ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA SL1 TISKÁRNY. PŘEVZATO Z [4].....	16
OBRÁZEK 8 PRINCIP MSLA. PŘEVZATO Z [4].....	17
OBRÁZEK 9 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ VYROBENÁ ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ. PŘEVZATO Z [14]	19
OBRÁZEK 10 VYTIŠTĚNÉ SOUČÁSTKY. PŘEVZATO Z [12]	19
OBRÁZEK 11 ZABUDOVANÉ ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY. PŘEVZATO Z [15].....	20
OBRÁZEK 12 PROCES VÝROBY A PŘÍKLADY ELASTICKÉ ELEKTRONIKY. PŘEVZATO Z [15].....	20
OBRÁZEK 13 KŘIVKA DEFORMACE. PŘEVZATO Z [21].....	24
OBRÁZEK 14 ASTM D5638 TYP V. PŘEVZATO Z [23]	25
OBRÁZEK 15 VZORKY V RŮZNÝCH ORIENTACÍCH VE SLICERU.. ZLEVA: XY, YZ, XZ.....	26
OBRÁZEK 16 SCHÉMA TRHAČKY. PŘEVZATO Z [24]	27
OBRÁZEK 17 PŘÍSTROJE K MĚŘENÍ TMA. PŘEVZATO Z [26]	28
OBRÁZEK 18 EXPANZNÍ SONDA DOSEDÁJÍCÍ NA VZOREK V ZAŘÍZENÍ TMA Q400.....	29
OBRÁZEK 19 KRABÍČKA, DNO, TLAČÍTKO.....	50

Seznam tabulek

TABULKA 1 VLASTNOSTI FILAMENTŮ.[2, 4–6]	13
TABULKA 2 DRUHY PRYSKYŘICE. PŘEVZATO Z [4].....	18
TABULKA 3 ROZMĚRY TESTOVACÍHO VZORKU	27
TABULKA 5 PROGRAM PRO ZKOUŠKU TMA	30
TABULKA 6 VÝSLEDKY MECHANICKÉ ZKOUŠKY V TAHU.....	31
TABULKA 7 HODNOTY E A R_m ZÍSKANÉ Z PUBLIKACÍ ZABÝVAJÍCÍ SE PODOBNOU TEMATIKOU. PŘEVZATO Z [29, 30]	32
TABULKA 8 VÝSLEDNÉ P HODNOTY STATISTICKÉHO T-TESTU – POROVNÁNÍ ROZDÍLNÉ ORIENTACE TISKU	35
TABULKA 9 VÝSLEDKY TMA PRO PLA PŘI TEPLOTĚ EXTRUDERU 210 °C	37
TABULKA 10 VÝSLEDKY TMA PRO PLA PŘI TEPLOTĚ EXTRUDERU 240 °C	37
TABULKA 11 VÝSLEDKY Z TMA PRO PRYSKYŘICI VYTVRZOVANOU PO 8 S	37
TABULKA 12 VÝSLEDKY Z TMA PRO PRYSKYŘICI VYTVRZOVANOU PO 16 S	37
TABULKA 13 HODNOTY T_g ZÍSKANÉ Z PUBLIKACÍ ZABÝVAJÍCÍ SE PODOBNOU TEMATIKOU. PŘEVZATO Z [32–34].	39
TABULKA 14 UKAZATELE ANIZOTROPIE	41
TABULKA 15 INVESTIČNÍ NÁKLADY NA TISKÁRNY	44
TABULKA 16 SESTAVENÍ TISKÁRNY.....	44
TABULKA 17 INVESTIČNÍ NÁKLADY.....	44
TABULKA 19 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – DISKONT	44
TABULKA 20 CENA MATERIÁLU FFF	45
TABULKA 21 CENA MATERIÁLU SLA	46
TABULKA 22 NÁKLADY NA MATERIÁL NA TISK DESETI VZORKŮ	46
TABULKA 23 ŽIVOTNOST KOMPONENTŮ.....	47
TABULKA 24 PENĚŽNÍ OHODNOCENÍ.....	47
TABULKA 25 CENA ENERGIE.....	48
TABULKA 26 SPOTŘEBA PRO SL1 A CW1	48
TABULKA 27 SPOTŘEBA PRO I3 MK3S	48
TABULKA 28 PODROBNOSTI O TISKU FFF	51
TABULKA 29 PODROBNOSTI O TISKU SLA.....	51

TABULKA 30 RCF TISKÁREN	51
TABULKA 31 RCF ÚDRŽBA	52
TABULKA 32 SPOTŘEBA PŘI TISKU KRABÍČKY	52
TABULKA 33 NÁKLADY NA OBSLUHU	52
TABULKA 34 NÁKLADY NA MATERIÁL	52
TABULKA 35 FINÁLNÍ RCF	52
TABULKA 36 NÁKLADY NA TISK 500 KS (20 TISKÁREN)	53
TABULKA 37 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA - ZMĚNA CENY MATERIÁLU SLA	54
TABULKA 38 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA - ZMĚNA CENY ELEKTRINY	54
TABULKA 39 ZMETKOVITOST	54
TABULKA 40 NÁKLADY NA ZMETKY	55
TABULKA 41 NÁKLADY NA TISK 500 KS SE ZAPOČÍTANOU ZMETKOVITOSTÍ	55