



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Ekonomické zhodnocení FDM technologie 3D tisku v elektrotechnickém
průmyslu**

**Economic evaluation of FDM 3D printing technology in elektrotechnical
industry**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Tichý

Daniel Běhal

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Běhal** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **465850**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající 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:

Ekonomické zhodnocení FDM technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu

Název bakalářské práce anglicky:

Economic evaluation of FDM 3D printing technology in elektrotechnical industry

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií 3D tisku metodou FDM
2. Proveďte zhodnocení důležitých vlastností vybraných materiálů, používaných pro tisk
3. Změřte fyzikální vlastnosti tiskových strun s měděnými příměsemi
4. Pro vhodný výrobek ekonomicky porovnejte tradiční a FDM způsob výroby

Seznam doporučené literatury:

- [1] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENARO. LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 1. Science Dissemination Unit: ICTP, 2013. ISBN 92-95003-48-9
- [2] Jason T. Cantrell, Sean Rohde, David Damiani, Rishi Gurnani, Luke DiSandro, Josh Anton, Andie Young, Alex Jerez, Douglas Steinbach, Calvin Kroese, Peter G. Ifju, (2017) 'Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts', Rapid Prototyping Journal, Vol. 23 Issue: 4, pp.811-824, <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042>
- [3] Redwood Ben, Schoffer Filenom, Garret Brian. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 1st ed. 3D Hubs, Amsterdam 2017. ISBN 978-90-827485-0-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Tichý, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Tomáš Tichý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze 24.5.2019

Podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Tomáši Tichému za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

V Praze 24.5.2019

Podpis autora

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá 3D tiskem FDM metodou, porovnáním vlastností jednotlivých materiálů a komplexním ekonomickým zhodnocením provozu 3D tiskárny. Nejprve jsou probrány principy FDM metody, spolu s rešerší její historie. Dále se práce zaměřuje na porovnání důležitých vlastností vybraných materiálů používaných pro 3D tisk. Autor provedl měření a vyhodnocení důležitých fyzikálních vlastností vybraných materiálů s příměsí mědi. Jedná se konkrétně o tepelné, elektrické a mechanické vlastnosti. Práce popisuje způsob a metody použité při měření a výpočtu těchto veličin s pomocí podpůrných programů měřicích zařízení. V posledních kapitolách autor analyzuje výdaje spojené s investičními a provozními náklady 3D tiskárny Prusa i3 MK3S a provádí kalkulaci nákladů pro tisk konkrétního výrobku používaného v elektronice. Výsledky kalkulace jsou porovnány s tradiční výrobou vstřikolisovou metodou.

Abstract

This bachelor thesis deals with 3D printing by FDM method, properties comparison of individual materials and complex economic evaluation of 3D printer operation. Firstly, the principles of the FDM method are discussed, alongside with a review of its history. Furthermore, the work focuses on the comparison of important properties of selected materials used for printing. The author made measurements and evaluates important physical properties of selected materials with admixture of copper. Specifically, these are thermal, electrical and mechanical properties. The work describes methods used in the measurement and calculation of these variables with the aid of measuring devices support programs. In the last chapters, the author analyses the costs associated with the investment and operating costs of the Prusa i3 MK3S 3D printer and performs cost calculations for printing a product used in electronics, along with the comparison sold by the press of the manufactured product.

Klíčová slova

3D tisk, FDM metoda, tepelné vlastnosti, elektrické vlastnosti, mechanické vlastnosti, investiční náklady, provozní náklady, materiály s měděnou příměsí, kalkulace celkových nákladů na výrobu výrobků, ekonomické zhodnocení výroby

Keywords

3D printing, FDM method, thermal properties, electrical properties, mechanical properties, investment costs, operating costs, materials with copper admixture, calculation of product costs, economic evaluation of production

Obsah

ÚVOD	14
1. SEZNÁMENÍ SE S FDM METODOU 3D TISKU	15
2. VLASTNOSTI TISKOVÝCH STRUN PRO 3D TISK	18
2.1. Podpůrné materiály	19
2.1.1. PVA	19
2.1.2. HIPS	20
2.2. Běžné tiskové materiály	20
2.2.1. PLA	20
2.2.2. ABS	21
2.2.3. ASA	21
2.2.4. PETG (PET, PETT)	22
2.2.5. Nylon	22
2.2.6. TPE, TPU, TPC	23
2.2.7. PC	23
2.3. Speciální materiály	24
3. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI TISKOVÝCH STRUN S PŘÍMĚSÍ MĚDI	26
3.1. Tepelné vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi	29
3.1.1. Fyzikální význam veličin tepelných vlastností	29
3.1.2. Metodologie měření koeficientu tepelné vodivosti	31
3.1.2.1. Navržení experimentu	32
3.1.3. Měření tepelných vlastností a naměřené hodnoty	34
3.1.4. Zpracované hodnoty	35
3.1.5. Zhodnocení tepelné části	38
3.2. Elektrické vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi	40
3.2.1. Fyzikální význam veličin elektrických vlastností	40
3.2.2. Metodologie měření rezistivity	41
3.2.3. Naměřené a spočítané elektrické veličiny	42
3.2.4. Zhodnocení elektrické části	43
3.3. Mechanické vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi	44
3.3.1. Fyzikální význam veličin mechanických vlastností	45
3.3.1.1. Pevnost a napětí v tahu	45
3.3.1.2. Modul pružnosti v tahu	45
3.3.1.3. Relativní prodloužení	46
3.3.2. Metodologie měření mechanických vlastností	46
3.3.3. Měření mechanických vlastností a naměřené hodnoty	47
3.3.4. Zhodnocení mechanických vlastností strun s měděnou příměsí	49

4. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ FDM METODY	50
4.1. Investiční náklady	51
4.1.1. Rozpočítání investičních nákladů	52
4.1.1.1. NPV	52
4.1.1.2. Anuita.....	52
4.1.1.3. RCF	53
4.1.2. Přehled investičních nákladů.....	53
4.2. Provozní náklady	54
4.2.1. Provozní náklady na údržbu tiskárny.....	54
4.2.2. Tiskové náklady	55
4.2.2.1. Náklady na obsluhu.....	55
4.2.2.2. Náklady na materiál	55
4.2.2.3. Náklady na elektrickou energii.....	56
4.3. Kalkulace pro reálný výrobek.....	60
4.3.1. Tiskové parametry.....	61
4.4. Kompletní kalkulační	63
4.5. Porovnání tradičních způsobu výroby s FDM technologií 3D tisku	68
4.5.1. Výhody 3D tisku FDM metodou	68
4.5.2. Nevýhody 3D tisku FDM metodou	68
4.5.3. Výhody vstřikolísivé výroby.....	68
4.5.4. Nevýhody vstřikolísivé výroby.....	69
4.5.5. Porovnání metod.....	69
4.6. Zhodnocení ekonomické části.....	70
5. ZÁVĚR.....	71
6. SEZNAM GRAFŮ, TABULEK, OBRÁZKŮ A ROVNIC.....	72
7. SEZNAM PŘÍLOH.....	74
8. ZDROJE	75

Úvod

Na začátku byl vynález. V osmdesátých letech dvacátého století vyvinula skupina amerických vědců přístroj k výrobě produktů na základě 3D modelů vytvořených v návrhářském prostředí. Jednalo se o vůbec první generaci 3D tiskáren. Ty však sloužily pouze k vědeckým účelům. Zpočátku byl rozvoj této technologie velmi pomalý, především díky silné patentové ochraně. Teprve po vypršení ochranného patentu Fused Deposition Methodology (FDM) technologie v roce 2009, zažilo odvětví 3D tisku prudký rozvoj. Řada nadšenců z odborné veřejnosti začala vyvíjet vlastní typy 3D tiskáren a zakládat první společnosti se specializací na 3D tisk. Již před rokem 2020 jen na území České republiky se můžeme setkat s desítkami firem, které přímo či okrajově se podílí na rozvoji a využívání této technologie. [1], [2]

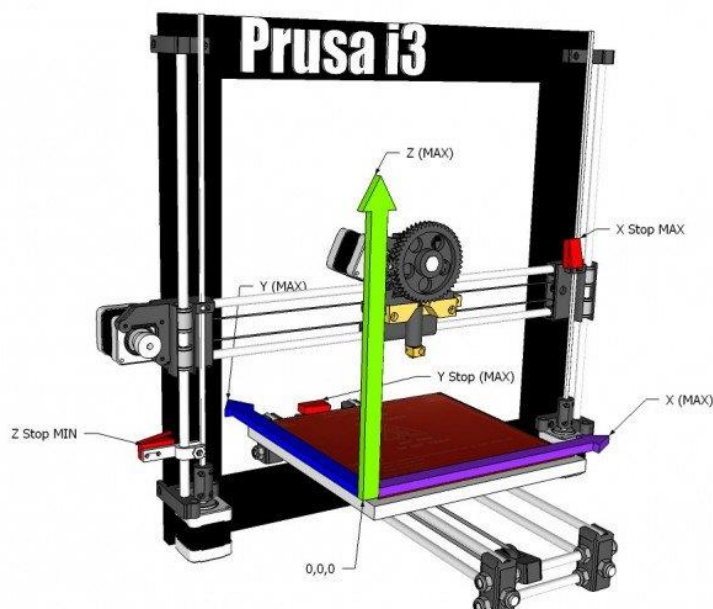
3D tisk samotný patří mezi technologie vycházející primárně z technologického směru Rapid prototyping. Tento technologický směr si klade za svůj cíl s vysokou rychlostí a přesností vyrobit fyzické modely podle počítačového návrhu vytvořeného v modelovacím prostředí. 3D tisk patří mezi aditivní technologické procesy, přičemž aditivní výrobní proces dosahuje svého cíle kontrolovaným přidáváním materiálu.[1], [2]

V této práci se autor zabývá nízkonákladovým 3D tiskem s použitím FDM technologie. Nízkonákladové 3D tisknutí je jedním z nejrychleji se rozvíjejících technologických směrů současnosti, a každoročně jsou představovány nové objevy a optimalizace. Velmi dynamický rozvoj je způsoben stále vyšší kvalitou použitých dílů a rozsáhlou open-source komunitou, která výrazně posouvá další technologický vývoj.[3]

V této práci chce autor seznámit čtenáře s principy fungování FDM technologií 3D tisku. Dále porovnává materiály a tiskové vlastnosti různých tiskových strun a vhodnost jejich použití. Součástí práce je také měření vybraných fyzikálních vlastností tiskových strun s příměsí mědi. Následuje zhodnocení aplikace zkoumaných materiálů v elektrotechnickém odvětví. Pro získání vstupních dat byly použity vytištěné vzorky, které byly podrobeny elektrickým, tepelným a mechanickým zkouškám. Na závěr byla provedena kalkulace všech nákladů na vytištění reálného výrobku FDM metodou, kdy 3D tisk byl uvažován, jako doplňková činnost podniku. Celkové náklady vytištěného výrobku jsou následně porovnány s cenou identického výrobku dostupného ve specializovaném obchodě s elektrotechnikou.

1. Seznámení se s FDM metodou 3D tisku

Metoda FDM (Fused deposit modeling) je jednou z metod dnešního 3D tisknutí. Metoda FDM patří mezi aditivní metody, tedy metody na principu přidávání materiálu. Pro tento případ je tisková struna zahřívána na vysokou teplotu, při které dochází k jejímu tavení a roztavená hmota je kontrolovaně vstříkována tryskou rovnou na podložku nebo na předchozí vrstvu. Kontrolovaným vstříkáváním a následným tuhnutím hmoty dochází k jejímu postupnému vrstvení na půdorys naprogramovaného výrobku. Pohyb je vykonáván sadou velmi přesných krokových motorků. Pro představu: Tryska se pohybuje převážně v osách x a z , a v ose y se pohybuje podložka (viz *Obrázek 1*). Celý proces je řízen řídicí deskou osazenou procesorem, která reguluje jednotlivé komponenty podle instrukcí zadaných programem. Náročnost a přesnost tiskových procesů se vždy odvíjí od kvality použitých senzorů a komponentů.[1], [2]



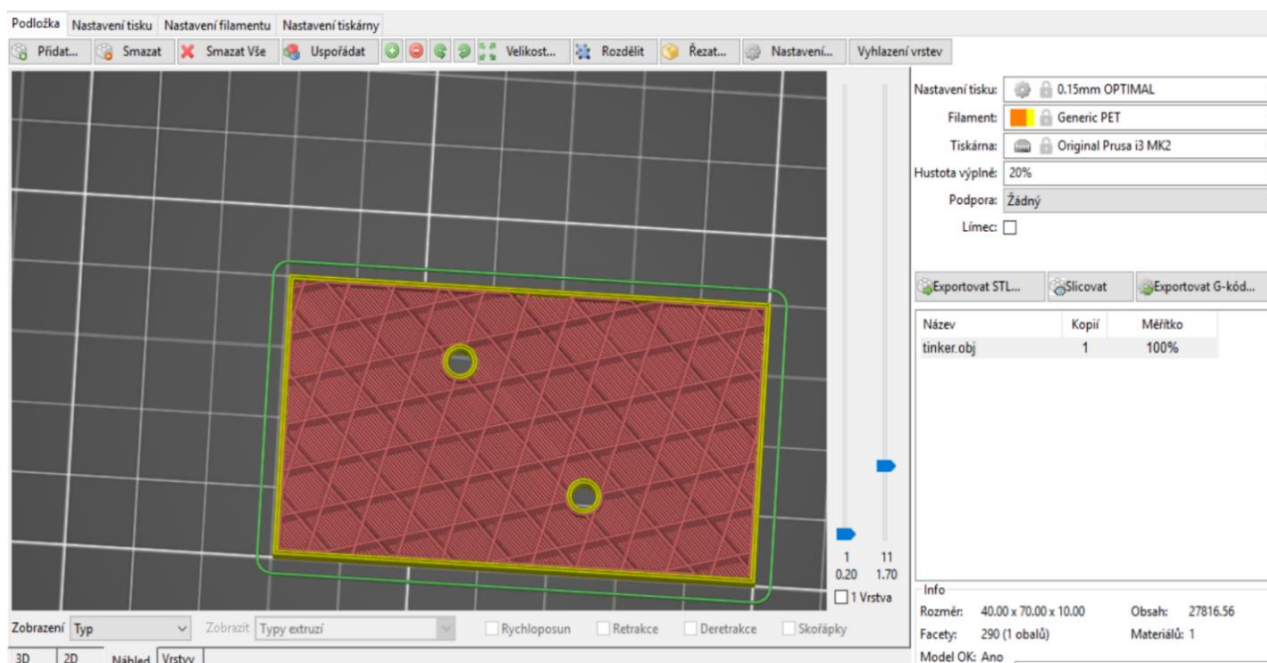
*Obrázek 1 Schéma 3D tiskárny s vyznačenými osami pohybu krokových motorků (převzato z *)*

Před spuštěním tisku konkrétního produktu, je potřeba vytvořit jeho 3D model pomocí jakéhokoliv programu určeného k modelování 3D objektů. 3D model lze získat také z rozsáhlých internetových databází 3D objektů. Například v databázi *thingiverse* tvůrci sdílí 3D modely vytvořené nejčastěji softwarem typu CAD. Po vytvoření 3D modelu tištěného objektu je nutné tento model zpracovat do vhodné podoby pro 3D tiskárnu. K transformaci 3D modelu se používá specializovaný slicer program k nastavení parametrů a instrukcí pro 3D tiskárnu. [1], [2]

* <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-all-you-need-to-know/>

Při konfiguraci je nejprve v programu vybrán typ tiskárny a průměr trysky. Následně jsou vybrány vhodné tiskové struny a nastavují se tiskové teploty trysky a podložky. Teploty zahřátí trysky přesahují 200 °C, ale zpravidla nepřekračují hranici 300°C. V případě zahřívání podložky její teplota nepřesahuje běžně 120 °C. V dalším kroku se nastavují parametry tištěného objektu a výběr typu výplně. Tištěný výrobek, na rozdíl od výrobků vyráběných tradičními způsoby, může být dutý, z části vyplněný, nebo plně vyplněný. Výplň hraje důležitou roli ve vlastnostech výrobku, zvláště u výrobků s nízkým procentem plnění. U výplně se nastavuje tvar a styl vyplnění, které má významný vliv na mechanické vlastnosti výrobku. Příklad trojúhelníkového stylu plnění na *Obrázek 2*. [1], [2]

Experimentální měření fyzikálních vlastností bylo provedeno na výrobcích s úplným plněním. Slicer program umožňuje úpravu řady dalších tiskových nastavení. K těm podstatným patří nastavení rychlosti tiskové hlavy a použití podpěr. Podpěry bývají obvykle používány v těch případech, kdy 3D modely mají velký sklon, a mohl by nastat problém při vrstvení materiálu. Slicer program při slicování rozdělí 3D model do vrstev a podle nastavení parametrů v jednotlivých vrstvách vyznačí cestu, kterým se bude tisková hlava pohybovat. Tyto instrukce poslouží k vygenerování souboru typu G-code, který je 3D tiskárnou zpracovatelný. [1], [2]



Obrázek 2 Ukázka slicování 3D objektu ve slicer programu Slicer Prusa3D

G-code je speciální typ souboru již s přesnými krokovými instrukcemi a nastaveními pro 3D tiskárnu tento G-code je unikátní pro každý typ 3D tiskárny a nelze ho použít pro jiné typy 3D tiskáren. Toto je hlavní důvod, proč se sdílejí na internetu 3D modely a nikoliv přímo G-code. G-code bývá předáván 3D tiskárně nejčastěji pomocí paměťové karty, nebo bezdrátovým přenosem wi-fi technologií. U většiny 3D tiskáren je možnost použití i přímého připojení k počítači přes USB rozhraní.[1]

Tiskárna je připravena k zahájení tisku po načtení instrukcí z G-code. 3D tiskárna nejprve předejde deskou a trysku na nastavené teploty, dále provede kalibraci pozice tiskové hlavy za pomoci vestavěných senzorů pro snímání vzdálenosti. U starších typů 3D tiskáren musel uživatel provádět problematické manuální kalibrování tiskové hlavy. Většina dnešních 3D tiskáren nabízí uživateli možnost i při probíhajícím tisku měnit na ovládacím panelu rychlost tisku a nastavení tiskových teplot. [2]

S provozem 3D tiskárny používající FDM technologii je spojena jednoduchá údržba a občasná výměna dílů, která je pak spolu s náklady blíže popsána v poslední kapitole. Průběh 3D tisku je blíže ilustrován na *Obrázek 3* (převzato a přepracováno z [4]).

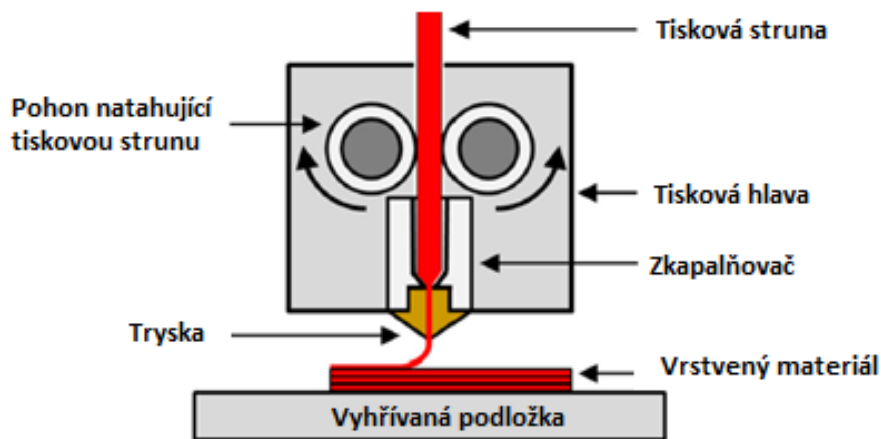


Schéma FDM metody s popisky pro vybrané části uvnitř tiskové hlavy

Obrázek 3 Schéma FDM metody s popisky pro vybrané části uvnitř tiskové hlavy

2. Vlastnosti tiskových strun pro 3D tisk

3D tisk FDM metodou umožňuje tisk z různých typů materiálů spojujících několik základních podmínek nutných pro tisk. Jednou z podmínek je tiskařská teplota materiálů. Ta bývá omezoována provozními limity 3D tiskárny a nachází se v rozmezí 200°C - 270°C u většiny používaných materiálů. Další z podmínek kladených na tištěný materiál, je ohebnost tiskové struny, kdy případná nízká ohebnost struny se projeví při 3D tisku zlomením tiskové struny, a tedy i následným přerušením tisku. S problémem ohebnosti tiskových strun se setkává autor u jednoho z měřených vzorků. [1], [2]

Ačkoliv celá řada materiálů splňuje nutné podmínky pro 3D tisk, tak je většina používaných materiálů na bázi polymerů. Konkrétně se pak jedná o termoplasty ve variantě s příměsí a bez příměsí. Hlavním důvodem použití termoplastů je jejich relativně snadná přeměna do tiskových strun a dobré tiskové a materiálové vlastnosti. [1]–[3]

Tiskové struny jsou pak běžně dostupné ve dvou standardních průměrech 1,75 a 3 mm. Tisková struna je z pravidla navinuta na cívku pro snazší podávání materiálů 3D tiskárně. Na trhu jsou běžně dostupné tiskové struny v množství od 125 g do 2 kg, kdy tiskové struny pod 500 g již zpravidla nebývají navinuty na cívku. Naopak 2 kg zase tvoří pomyslný limit, do kterého je schopna tiskárna snadno odvíjet tiskovou strunu z cívky. U výroben s velkým množstvím 3D tiskáren se proto téměř výhradně používají pro tisk 2kg cívky. [1], [2]



*Obrázek 4 Ilustrativní obrázek cívky s tiskovou strunou (převzato z *)*

* <https://shop.prusa3d.com/cs/>

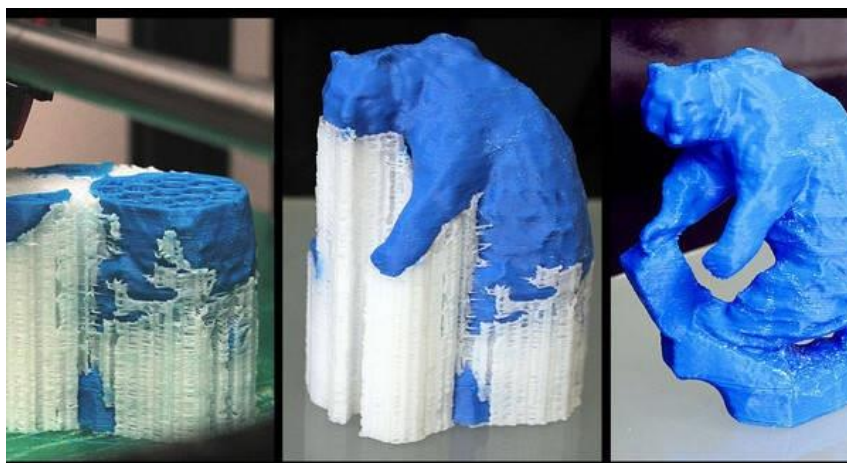
2.1. Podpůrné materiály

U tiskových strun existuje kategorie tiskových strun sloužící převážně, jako podpůrné složky při tisku. Podpůrné struny jsou z materiálů, které po dokončení tisku je možné snadno z výroku odstranit. Jejich použití je nezbytné v některých aplikacích, kde je zapotřebí dosáhnout náročných tvarů, kterých by nebylo možné dosáhnout pouhým vrstvením jednoho materiálu. Podpůrné materiály se konkrétně používají pro podpěry a výplně náročných zákrutů výrobku. Nejčastějším typem podpůrných materiálů jsou materiály rozpustitelné ve vodě.

Samotná finalizace tisku takového objektu je potom realizována tak, že objekt je po vytištění ponořen do kapaliny, která rozpustí podpůrný materiál a ve výsledku zůstává pouze zamýšlený objekt.

2.1.1. PVA

Polyvinyl alcohol (PVA) je vodou rozpustitelný průmyslový materiál. Používaným běžně v průmyslu k výrobě např. obalů kapslí do myčky anebo, ve speciálních návnadách pro rybáře a podobně. Stejný princip využívá 3D tisk, kde PVA funguje jako podpůrný materiál při 3D tisku tiskárnou s tiskovou hlavou umožňující tisk několika tiskových strun současně. Nevýhodou PVA je jeho náročnost při skladování a nutnost izolovat strunu i od přirozené vlhkosti v atmosféře. Tisková struna z PVA je vhodná pro tisk podpůrných konstrukcí (viz *Obrázek 5*) jelikož je možné ji kombinovat s většinou tiskových strun. [5]–[7]



*Obrázek 5 Ukázka použití PVA při tisku modelu (převzato z *)*

* <https://www.quora.com/Does-an-unbalanced-object-fall-down-while-3D-printing>

2.1.2. HIPS

High impact polystyrene (HIPS) je kopolymer, který kombinuje tvrdost polystyrenu a pružnost gumy. Běžně je možné se s ním setkat u ochranných pouzder. V případě 3D tisku je HIPS používán, jako podpůrný materiál pro podpory na výtisky z ABS (viz dále), kdy HIPS se po dokončení výrobku odstraňuje ponořením do limonenu. V případě výrobků z ABS limonen rozpouští HIPS a zanechává finální nepoškozený produkt. Při použití HIPS, jako podpůrného materiálu s odlišnými materiály od ABS, dochází při odstraňování HIPS limonenem k poškození i dalších materiálů.[5]–[7]

Použití HIPS není limitované jen na podpůrný materiál. HIPS je možné použít i jako dobrý tiskový materiál s mechanickými vlastnostmi lepšími než PLA (viz dále). HIPS sdílí spolu s ABS řadu charakteristických vlastností, a proto se jedná o všestranný materiál pro díly odolné na opotřebení, nebo jako materiál vhodný pro konečnou úpravu.[5]–[7]

2.2. Běžné tiskové materiály

Jako běžné tiskové materiály se v prostředí 3D tisku označuje následující sedm materiálů. Tyto materiály mají společně to, že jsou použitelné k tisku na většině 3D tiskáren. Jejich nízká cena a dobré fyzikální vlastnosti z nich dělají jasnou volbu pro většinu tisků.

2.2.1. PLA

Polylactic acid (PLA) je vůbec nejoblíbenějším a nejpoužívanějším materiálem pro domácí 3D tisk. PLA bývá srovnáváno s druhým v pořadí oblíbenosti materiálem ABS, oproti kterému má ovšem výhodu výrazně nižší tiskové teplotě. Další z výhod PLA oproti i dalším materiálům je absence zápachu a toxických plynů. Řada jiných tiskových materiál při tisku uvolňuje plyny, které musejí být bezpečně odvětrávány. Jako nejvýznamnější výhoda PLA oproti ostatním strunám je vnímána šetrnost vůči životnímu prostředí. K výrobě strun z PLA se používají obnovitelné zdroje ve formě kukuřičného škrobu, nebo cukrové třtiny. PLA je tak snadno rozložitelný v přírodě.[5]–[7]

PLA jako materiál je vhodný pro většinu aplikací. Existují však výjimky, kde je jeho použití přímo nevhodné. Výtisky z PLA jsou specifické svojí křehkostí, a proto tisk předmětů, u kterých je očekáváno, že se často budou ohýbat a padat je doporučené použít jiný materiál. Další nevýhodou PLA je snadná deformace výtisků při teplotách vyšších 60°C. Jinak se jedná o kvalitní a cenově dostupný materiál vhodný pro univerzální tisknutí v různých barvách.[5]–[7]

2.2.2. ABS

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) je druhým nejčastěji používaným materiálem pro 3D tisk, ABS je odolný materiál v průmyslu používaný kupříkladu pro výrobu ochranných sportovních přileb, nebo kostiček Lega. ABS má lepší materiálové vlastnosti než PLA, avšak tyto lepší materiálové vlastnosti jsou kompenzovány vyšší tiskovou náročností. Při tisku z ABS je nutné zajistit dobré odvětrávání tiskového prostoru z důvodu uvolňovaných plynů při tisku. Kvalitního tisku je potom dosahováno především stálým udržováním vysoké teploty tiskové podložky. Dlouhá životnost vytištěných výrobků a vysoká odolnost vůči teplotě činí ABS vyhledávaným materiálem v řadě průmyslových odvětví. Jedná se o velmi oblíbený materiál pro výrobu pouzder a krytů různých zařízení v elektrotechnice. U ABS je nutné věnovat větší pozornost velikosti výrobku, protože ABS jako materiál má vysokou tiskovou roztažnost, která omezuje tištění velkých dílů. V dnešní době je ABS spíše na ústupu a je nahrazováno materiálem ASA (viz dále). Výrobci 3D tiskáren tisknou z ASA i díly pro nové typy vyvíjených 3D tiskáren.[5]–[7]

2.2.3. ASA

Acrylonitrile styrene acrylate (ASA), materiál původně vyvinutý do extrémního počasí je častou volbou automobilek pro řadu komponent. ASA v 3D tisku je alternativou k zatím ještě oblíbenějšímu ABS. Výhodou ASA oproti ABS je snazší tisknutelnost a vysoká odolnost vůči chemickým a tepelným vlivům. Další z důvodů, pro který dávají výrobci přednost ASA oproti ABS je nižší tisková roztažnost, která umožňuje tisknout i větší komponenty. Mechanické vlastnosti ASA jsou jen o něco málo horší, než ABS, hlavním důvodem, proč je zatím používanější ABS, než ASA je tak především vyšší cena materiálu.[5]–[7]

Při tisku z ASA je nutné vhodně umístit chladicí ventilátor, jelikož v případě chybného umístění hrozí nebezpečí prasknutí struny silnějším vzdušným proudem. ASA je vhodná pro většinu výtisků, které budou vystavovány negativním vlivům počasí.[5]–[7]

2.2.4. PETG (PET, PETT)

Polyethylene terephthalate (PET) je světově nejpoužívanějším typem plastu, známý je především použitím k výrobě lahví s balenou vodou. Ve 3D tisku se většinou nepoužívá surové PET, ale varianta PETG, kdy G je v názvu zkratkou pro glycol modifikaci, která dělá výsledný materiál PETG méně křehký a snadněji tisknutelný. PETG svými fyzikálními vlastnostmi tvoří zlatou střední cestu mezi PLA a ABS, jako materiál s lepšími vlastnostmi než PLA a snazším tiskem než ABS. PETG je také jedním z materiálů, které snadno absorbují vodu a vlhkost, a proto je nutné jej skladovat v suchých prostorech a při tisku dbát na nízkou vlhkost v atmosféře.[5]–[7]

Polyethylene coTrimethylene Terephthalate (PETT) je další z variant PET. PETT je mírně odolnější a tužší, než PETG a je používán také z důvodu jeho transparentnosti.[5]–[7]

PETG je všestranný materiál vynikající svými mechanickými vlastnostmi a jako takový je vhodný pro tisk komponent vystavovaných trvalému, nebo náhlému stresu. I tento materiál je používán pro řadu dílů 3D tiskáren a ochranné komponenty.[5]–[7]

2.2.5. Nylon

I tento syntetický polymer je hojně průmyslově využíván. Ve srovnání s ostatními materiály používaných pro 3D tisk patří mezi špičku při porovnání síly, pružnosti a odolnosti. Jeho jedinečnou vlastností je možnost snadného obarvení, a to jak při výrobě struny, tak po vytištění výrobku. Naneštěstí, jako řada dalších tiskových materiálů i Nylon snadno absorbuje vodu, a proto je nutné zvýšené opatrnosti při skladování a tisku. Nylon se pro vyšší cenu a důvodu náročného postupu při tisku, používá jen pro aplikace plně využívající jeho mechanických vlastností. Příkladem by byla různá ozubená kola a namáhané úchyty.[5]–[7]

2.2.6. TPE, TPU, TPC

Thermoplastic elastomers (TPE) je skupina termoplastů s vlastnostmi podobnými gumě. TPE je používaným materiálem v automobilovém průmyslu a při výrobě domácích spotřebičů, především pro svojí extrémní pružnost a trvanlivost. TPE zahrnuje širokou škálu kopolymerů a různých dalších příměsí. TPE patří avšak mezi jedny z nejobtížněji tisknutelné materiály, protože se velmi obtížně vytlačuje tryskou.[5]–[7]

Pro varianty Thermoplastic polyurethane (TPU) a Thermoplastic copolyester (TPC) platí, že v obou případech je materiál o něco pevnější a snadněji tisknutelný. Výhodou TPC je navíc vyšší chemická odolnost a odolnost vůči UV záření. [5]–[7]

TPE a TPU jsou vhodné materiály pro tisknutí výrobků vystavovaným silnému opotřebení, například se z nich dají tisknout běžecké boty. TPC je zase materiálem vhodným pro aplikace určeným do náročného, nebo venkovního prostředí.[5]–[7]

2.2.7. PC

Polycarbonate (PC) je patrně nejobtížněji tisknutelným materiálem z běžně používaných materiálů. Jedná se o pevný a částečně flexibilní materiál, vysoce odolný vůči nárazům. PC je materiálem průhledným, a proto je běžně používán na výrobu ochranných pomůcek a neprůstřelného skla. PC, jako řada dalších materiálů snadno absorbuje vodu a spolu s vysokými tiskovými teplotami nepatří mezi snadno tisknutelné materiály. PC je vhodným materiálem na tisk krytů pro obrazovky a komponenty do nehostinného prostředí.[5]–[7]

2.3. Speciální materiály

Další skupinou zahrnující zbytek materiálů tiskových strun je skupina označovaná jako speciální materiály. Tyto materiály nespádají do žádné jiné větší skupiny z důvodu jejich speciálních vlastností a použití. Příkladem takového materiálu by byl materiál označovaný jako Wood. Wood není podle překladu skutečné dřevo, ale materiál podobající se dřevu. Z hlediska složení se jedná o PLA s příměsí dřevního vlákna. Dalším příkladem jsou tiskové struny s příměsí kovu označované skupinovým názvem Metal. Do této skupiny patří směsi PLA a kovu rozdrčeného na prášek. Mezi unikátnější patří tiskové struny z fluorescentní směsi a barvou měnící směsi. Závěrem je vhodné zmínit i tiskovou strunu na bázi uhlíku, označovanou názvem Conductive. Výtisky z tohoto materiálu jsou schopny vést elektrický proud. V *Tabulka 1* Přehled základních vlastností tiskových strun je základní srovnání tiskových strun z popisovaných materiálů. [5], [6]

Tabulka 1 Přehled základních vlastností tiskových strun

Materiál	Tisková teplota trysky [°C]	Požadovaná teplota podložky [°C]	Náročnost tisku	Pevnost	Ohebnost	Odolnost	Odolnost vůči vlhkosti
PVA	180-230	-	Nízká	Nízká	Střední	Vysoká	Ne
HIPS	210-250	50-100	Střední	Nízká	Střední	Vysoká	Ano
PLA	180-230	-	Nízká	Střední	Nízká	Střední	Ano
ABS	210-250	80-110	Střední	Vysoká	Střední	Vysoká	Ano
ASA	240-260	100-120	Střední	Střední	Nízká	Vysoká	Ano
PETG	220-250	50-75	Nízká	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Ne
Nylon	220-260	70-100	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Ne
TPE	225-235	60	Vysoká	Střední	Vysoká	Vysoká	Ano
TPU	225-235	60	Vysoká	Střední	Vysoká	Vysoká	Ano
TPC	210	40	Vysoká	Střední	Vysoká	Vysoká	Ano
PC	270-310	90-105	Střední	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Ne
Wood	195-220	-	Střední	Střední	Střední	Střední	Ano
Metal	195-220	-	Vysoká	Střední	Střední	Střední	Ano
Conductive	215-230	-	Střední	Střední	Střední	Nízká	Ano

Data byla získána porovnáním mnoha zdrojů zveřejněných výrobcí 3D tiskáren a prodejci a tiskových strun. Použitý stupeň vlastností odpovídá vzájemnému porovnání tiskových strun. *Tabulka 1* Přehled základních vlastností tiskových strun slouží pouze, jako orientační přehled vlastností. Konkrétní vlastnosti a doporučené teploty jsou často specifické pro daný typ tiskárny z důvodu technického řešení 3D tiskárny. Zásadní vliv na použité teploty má průměr použité trysky a tiskové struny. Informace pro tisk bývají dostupné na webových stránkách výrobce 3D tiskárny, nebo popřípadě na stránkách prodejce tiskový strun.[5]–[7]



Obrázek 6 Ukázka široké variace dostupných tiskových strun (převzato z [8])

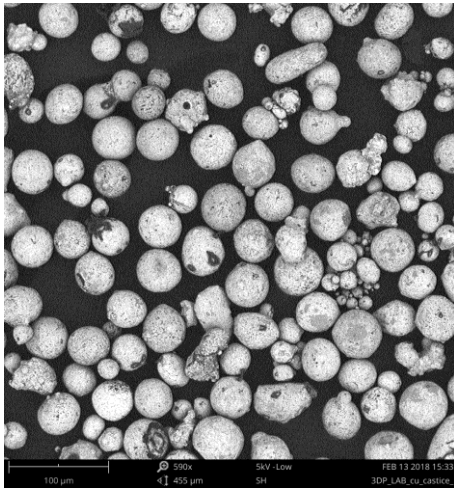
3. Fyzikální vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi

V této části práce se autor zaměřil na zkoumání a měření fyzikálních vlastností tiskových strun s příměsí mědi. Hlavním cílem těchto měření bylo zjistit možné použití tiskových strun v elektrotechnice a prozkoumat změny chování tiskové struny podle množství obsažené mědi. Autor se snažil potvrdit, případně vyvrátit domněnku, že se se zvyšující se koncentrací mědi bude vytištěný výrobek chovat podobně, jako by se choval tvarově odpovídající měděný výrobek. Motivací tisknutí objektů s podobnými vlastnostmi, jako měď je několik. Měď, popřípadě výrobky z ní jsou vysoce tepelně vodivé tedy jsou použitelné na odvádění tepla. Proto případná možnost vytisknout speciální díly chladicího ústrojí levně a v malých objemech na 3D tiskárně by měla zásadní vliv na řadu výrobních odvětví. Další z vyhledávaných vlastností v 3D tisku je elektrická vodivost. Dnes již existují uhlíkové tiskové struny označené, jako Conductive, které jsou schopny vést elektrický proud. Jejich aplikace je však limitovaná pouze na nízko napěťové obvody. Tisková struna Conductive má měrný odpor v řádech k Ω /m. Dobře zvládnutý materiál s příměsí mědi by pak mohl mít daleko lepší vodivostní vlastnosti a stát se hlavním materiálem určeným k 3D tisku FDM technologií v elektrotechnice.

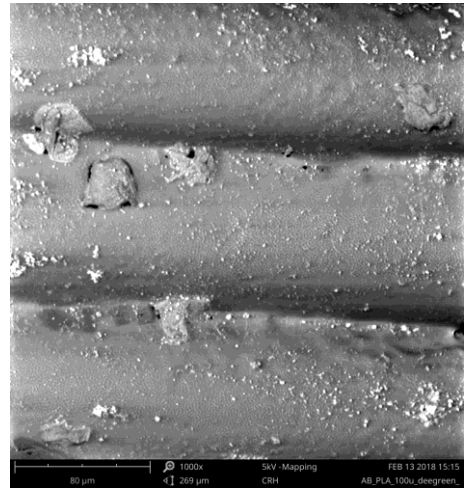
Všechna měření byla provedena na čtyřech různých tiskových strunách s odlišným množstvím přidané mědi, nebo s různými velikostmi namletých měděných kousků (viz *Tabulka 2*). Snímky měřených strun byly pořízeny školním elektronovým mikroskopem.

Tabulka 2 Přehled měděných tiskových strun

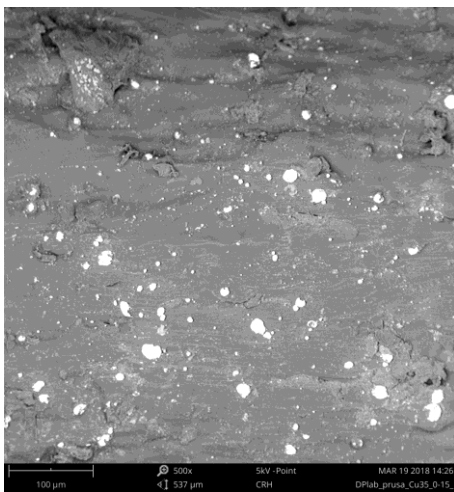
Označení tiskové struny	Obsah mědi	Použité označení	Mikroskopový snímek
PLA-Cu-15-38	45 %	Tisková struna A	Obrázek 12
PLA-Cu-0-15	35 %	Tisková struna B	Obrázek 10
PLA-Cu-38-75	35 %	Tisková struna C	Obrázek 9
colorFabb copperFill	80 %	Tisková struna D	Obrázek 11



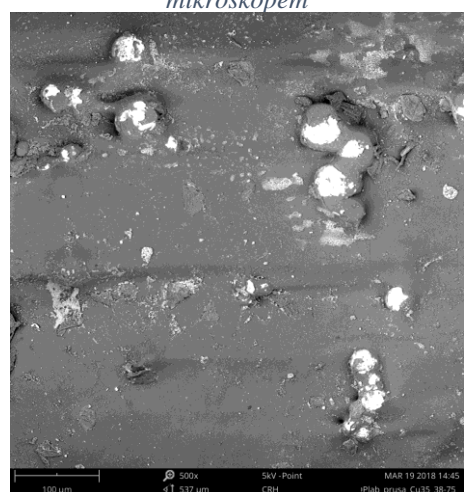
Obrázek 8 Měďná příměs pod mikroskopem



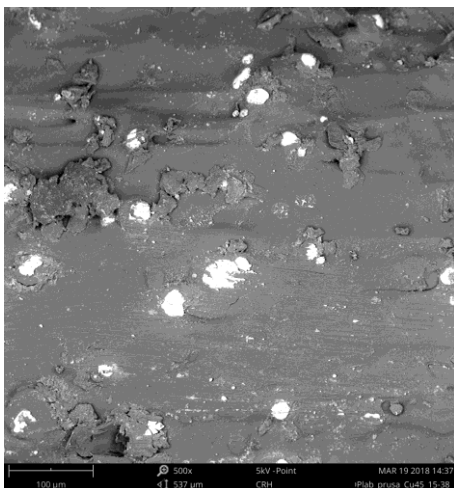
Obrázek 7 Vytlačovaný vzorek z PLA pod mikroskopem



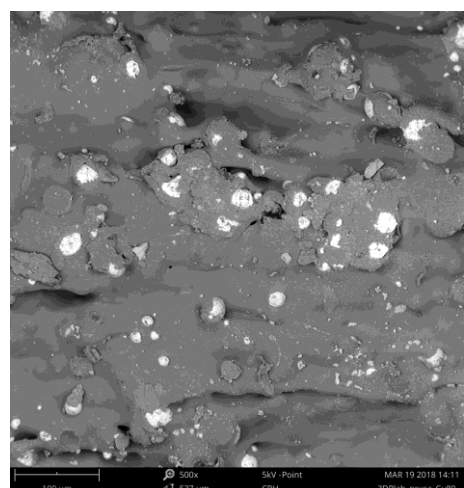
Obrázek 10 Struna B pod mikroskopem



Obrázek 9 Struna C pod mikroskopem

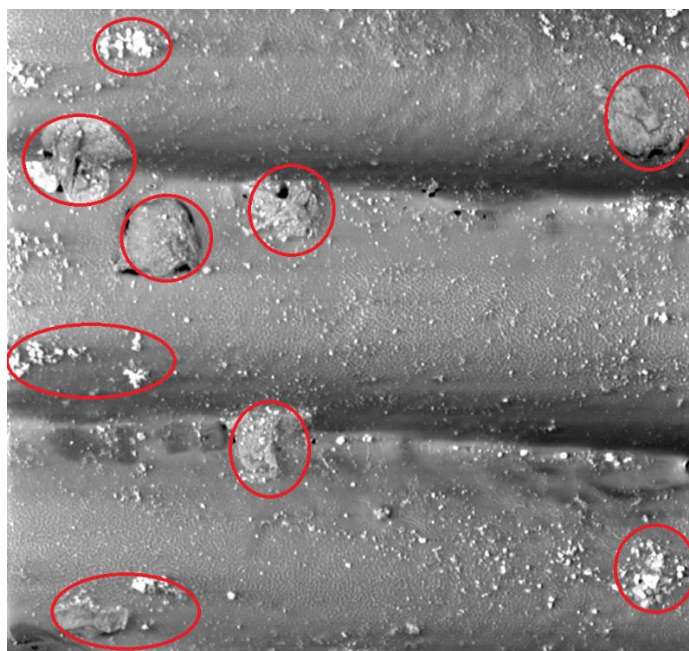


Obrázek 12 Struna A pod mikroskopem



Obrázek 11 Struna D pod mikroskopem

Na snímcích z mikroskopu na předchozí straně je možné vypořadovat několik skutečností ohledně zkoumaných materiálů. *Obrázek 8* je snímek z mikroskopu měděné příměsi používané k výrobě zkoumaných tiskových strun. Ze snímku je patrné, že měděná příměs nemá jednotnou velikost a její zrna mají kulovitý tvar. *Obrázek 7* je mikroskopový snímek vytištěného vzorku z PLA. Na tomto snímku je možné pozorovat nepravidelné tvary v tištěných vrstvách (blíže viz *Obrázek 13*). Defekty vznikají pravděpodobně nedostatečným prohřátým PLA v průběhu tisku. Defekty podobné, jako na *Obrázek 13* se eliminují zvýšením tiskové teploty trysky odhadem o 10-15 °C.



Obrázek 13 Snímek s označenými defekty tisku PLA

Na dalších 4 snímcích z předchozí strany (viz *Obrázek 9*, *Obrázek 10*, *Obrázek 11*, *Obrázek 12*) jsou snímky z mikroskopu čtyř testovaných strun. Snímky zobrazují povrch tiskových strun, kdy na snímcích tiskových strun reprezentují světlé body kousky přidané mědi. V případě struny C (viz *Obrázek 9*) je možné vypořadovat, že měděné kousky jsou podstatně větší než u ostatních vzorků. Jedná se o speciální vzorek, kdy výrobce použil v příměsi větší měděné kousky.

Mikroskop při pořízení všech snímků byl nastaven pětisetnásobné zvětšení a snímky zobrazují čtverec o rozměrech strany přibližně 500 μm . Konkrétní hodnoty a parametry jsou uvedeny v dolních částech snímků.

3.1. Tepelné vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi

Při práci s elektrotechnickými součástkami se v konstrukčním řešení, dbá na kvalitní odvod přebytečného tepla vznikajícího například elektrickými ztrátami součástek. V případě neodvedení tohoto tepla může například u polovodičových součástek docházet ke snížení životnosti, nebo dokonce i k jejich zničení. Proto je nutné i u tiskových strun a vytištěných výrobků zjistit jejich tepelné vlastnosti. Konkrétně se autor v této práci zaměřil na tiskové struny s příměsí mědi a provedl měření tepelné vodivosti na z nich vytištěných vzorcích. Měření má ukázat velikost vlivu pojivého materiálu v tiskových strunách na vedení tepla. V případě, že měření prokáže vysokou tepelnou vodivost u vzorků některé struny, mohlo by to ovlivnit výrobu chladičů, jak ji dnes známe.

3.1.1. Fyzikální význam veličin tepelných vlastností

Tepelnou vodivost lze zjednodušeně fyzikálně definovat, jako schopnost látky vést teplo. K přenosu tepla dochází ve směru z teplejšího do chladnějšího prostředí, tak aby bylo dosaženo termodynamické rovnováhy (viz *Obrázek 14*). U přenosu tepla sledujeme především rychlost přenosu, a materiály jsou děleny na základě této rychlosti na materiály s vysokou tepelnou vodivostí a materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Například kovy mají obvykle vysokou tepelnou vodivost, a proto jsou velmi účinné při vedení, nebo odvodu tepla, zatímco polystyren a plasty s jejich nízkou tepelnou vodivostí slouží jako tepelné izolanty například při zateplování budov. [9], [10]

Pro zjednodušení termodynamických výpočtů se vytvořila měrná veličina, kdy součinitel tepelné vodivosti je tepelná vodivost vztažená na jeden kubický metr. Součinitel tepelné vodivosti značíme řeckým písmenem lambda λ a jeho jednotkou je $[W m^{-1}K^{-1}]$. Součinitel tepelné vodivosti může být vyjádřen vztahem: *Rovnice 1*. [9], [10]

Rovnice 1) Součinitel tepelné vodivosti

$$\lambda = \frac{P d}{S \Delta T}$$

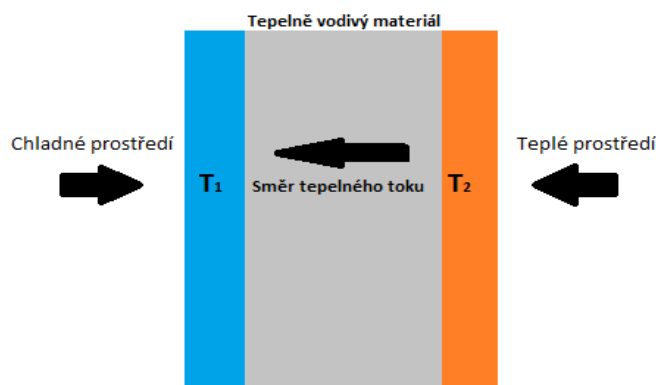
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
P	[W]	Přenesený tepelný výkon
d	[m]	Vzdálenost, kterou je přenášen výkon
ΔT	[K]	Tepelný rozdíl teplejší a chladnější části
S	[m ²]	Plocha, kterou je přenášen výkon

Koeficient tepelné vodivosti je používán při počítání vektoru hustoty tepelného toku, který je závislý jak na koeficientu tepelné vodivosti, tak na záporné hodnotě gradientu teploty. Tento vztah je také znám jako Fourierův zákon vedení tepla (viz *Rovnice 2*).[9], [10]

Rovnice 2) Vektoru hustoty tepelného toku

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T$$

\vec{q}	[W m ⁻¹]	Vektoru hustoty tepelného toku
T	[K]	Termodynamická teplota



Obrázek 14 Ilustrace tepelného toku mezi teplejším a chladnějším prostředím

Přenesené teplo Q je veličina udávající množství tepla, které projde plochou materiálu za určitý čas. Přenesené teplo je veličina, ze které se v řadě aplikací může dopočítat teplotní rozdíl prostředí pro danou aplikaci. Tento údaj je velmi podstatný v návrhu a dimenzování jak systému, tak i izolace. Pro ustálený homogenní stav je pro přenesené teplo tento fyzikální vztah *Rovnice 3*, avšak v případě neustáleného stavu, se musí počítat pomocí Fourier-Kirchoffové diferenciální rovnice.[9], [10]

Rovnice 3) Přenesené teplo pro ustálený stav

$$Q = \lambda S \frac{\Delta T}{d} \tau$$

Q	[J]	Přenesené teplo
d	[m]	Vzdálenost, kterou je přenášen výkon
ΔT	[K]	Tepelný rozdíl teplejší a chladnější části
S	[m ²]	Plocha, kterou je přenášen výkon
τ	[s]	Čas tepelného průchodu

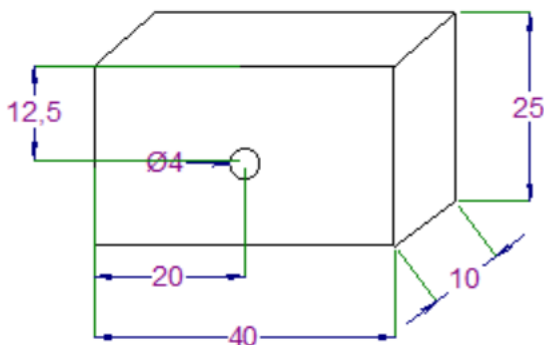
3.1.2. Metodologie měření koeficientu tepelné vodivosti

Určování koeficientu tepelné vodivosti u materiálů je technicky velice náročný proces, který je realizován na drahých a úzce specializovaných přístrojích. Jednou z metod pro určení koeficientu tepelné vodivosti je metoda DSC (differential scanning calorimetry). Tato metoda měří kromě koeficientu tepelné vodivosti i skupenský přechod materiálů. V DSC metodě je měřen rozdíl potřebného tepla k zvýšení teploty o jeden kelvin měřeného vzorku oproti referenčnímu vzorku. Tento rozdíl je udáván jako funkce teploty. V průběhu experimentu je snaha u obou vzorků udržovat stále stejnou teplotu. Aparatura měřicího ústrojí je navržena s cílem, aby teplota držáku vzorku stoupala lineárně a dala se vyjádřit funkcí času. Referenční vzorek musí mít dobře definovanou tepelnou kapacitu v rozsahu měřených teplot. Měřicí aparatura používá jeden ze dvou přístupů k experimentu. U prvního přístupu je vzorkům dodáván stále stejný tepelný výkon. V druhém případě je udržovaná pro oba vzorky stále stejná teplota.[11], [12]

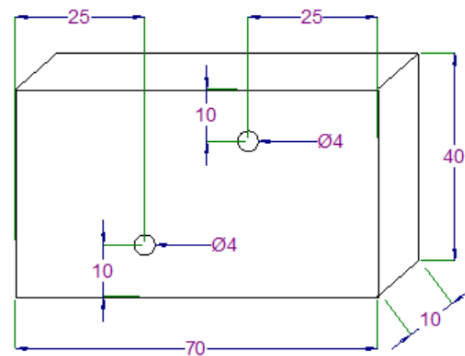
Z důvodu nedostupnosti potřebného vybavení autor použil zjednodušenou metodu založenou na DSC metodě. Tato metoda ovšem dosahuje nižší přesnosti měření, ale pro tento typ výzkumu zcela dostačující. Při této metodě je na vzorek připevněn rezistor, kterým protéká konstantní proud za udržovaného konstantního napětí, a proto je dosaženo konstantního ztrátového výkonu. Snímání teploty probíhá ve stejných časových intervalech pomocí termokamery. Z pořízených snímků termokamerou je odečítána teplota ve vybraných bodech (viz *Obrázek 17*). Odečtené hodnoty ze snímků jsou pak vynášeny do grafů, nebo do takzvaných DTA křivek, jako závislost na čase (viz *Tabulka 3* a *Graf 3*).

3.1.2.1. Navržení experimentu

Cílem autorova experimentu bylo změřit oteplení a šíření tepla ve vytištěných vzorcích v čase. Následně porovnat tyto naměřené hodnoty s hodnotami referenčního hliníkového vzorku (viz *Obrázek 25*) a matematickým modelem. Měření všech vzorků proběhlo do ustálených hodnot. Autor provedl experiment na 2 typech vytištěných vzorků. U prvního typu byly zjištěny technické nedostatky experimentu, které mohly mít zásadní vliv na měřené vlastnosti, a proto autor zopakoval experiment na druhém typu vytištěných vzorků. Orientační schéma prvního a druhého typu vzorku, viz *Obrázek 15* a *Obrázek 16*.



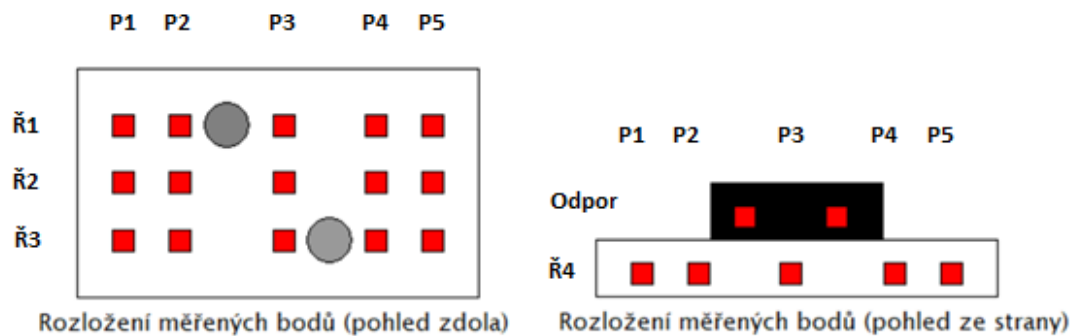
Obrázek 16 Schéma vzorku pro první experimentální měření koeficientu tepelné vodivosti



Obrázek 15 Schéma vzorku pro druhé vylepšené experimentální měření koeficientu tepelné vodivosti

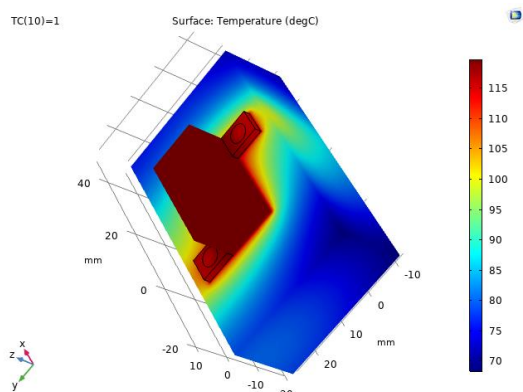
Na vzorky v obou experimentech byl připevněn pomocí šroubů rezistor s přívodními vodiči. Jedním z hlavních problémů prvního experimentu byly posuny rezistoru v průběhu měření. Problém byl vyřešen přidáním dalšího šroubu. Snímání teploty bylo zajištěno termokamerou značky Flir série IX typ i5. Pro odečítání teploty termokamerou bylo ovšem nutné vytvořit podmínky, kdy vzorek dosahoval vždy stejné emisivity. Stejná emisivita bylo dosaženo přebarvením vzorků sprejem s černou matnou barvou. Po naspřevování vzorků, rezistoru a přívodních kabelů bylo dosaženo přibližně stejné emisivity všech měřených částí. Emisivita byla stanovena na hodnotu emisivity černé barvy, $\varepsilon = 0,95$.

Dalším optimalizací měření bylo vytvoření dvojice pevných bodů, ze kterých byly pořizovány snímky. Pozorovací body byly ve vhodné vzdálenosti od měřeného vzorku, aby byl zachycen celý měřený vzorek. Snímky byly pořizovány pro pohled zdola a pro pohled ze strany (viz *Obrázek 17*). Na snímcích byla vytvořena síť měřených bodů pro odečítání teploty. Odečítání teploty probíhalo na specializovaném programu dodaného výrobcem k termokameře. Výstupem měření byla série hodnot teploty pro určité body a čas. Tyto hodnoty byly zpracovány do tabulky a následně do grafu (viz *Tabulka 3* a *Graf 3*).

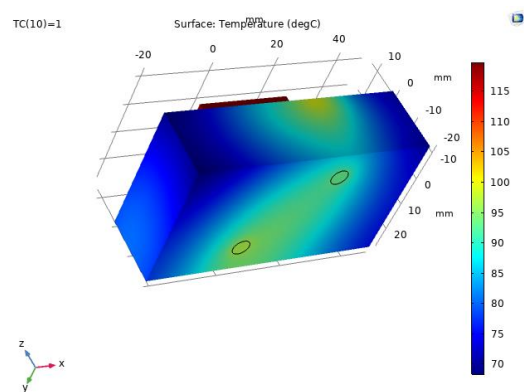


Obrázek 17 Znáznornění soustavy měrných bodů v měření koeficientu tepelné vodivosti

Pro zjištění koeficientu tepelné vodivosti z naměřených dat byl použit software Comsol Multiphysics 5.3.. V softwaru byl vedoucím práce vytvořen model měřeného objektu spolu s rezistorem a přípeňovacími šrouby. Pro vytvoření modelu bylo zadáno kromě teploty v bodech dalších parametrů, jako je materiál použitých šroubů a hodnota teploty rezistoru v ustáleném stavu. Software po zadání všech vstupních dat vytvořil simulaci stavu teploty napříč celým modelem. Měněným parametrem modelu byl koeficient tepelné vodivosti.



Obrázek 18 Horní pohled na FEM



Obrázek 19 Dolní pohled na FEM

Z tepelného modelu bylo možné získat hodnoty teplot všech bodů na povrchu a uvnitř modelu. Autor vybral řady bodů odpovídající přímce procházející měřenými body na reálném objektu (vycházející z Obrázek 17 a ilustrované na Obrázek 20) pro různé hodnoty tepelné vodivosti. Z naměřených hodnot byl pro rozdílné hodnoty koeficientu tepelné vodivosti sestaven graf, který odpovídal stavu teploty v tělese s konstantní hodnotou koeficientu tepelné vodivosti. Vzniklé grafy pro různé hodnoty koeficientu tepelné vodivosti byly následně porovnány se skutečnými naměřenými hodnotami.

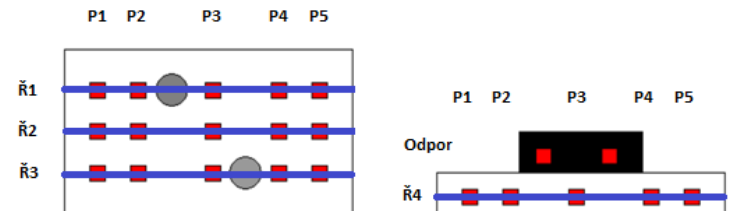
3.1.3. Měření tepelných vlastností a naměřené hodnoty

Měření koeficientu tepelné vodivosti na navržených vzorcích probíhalo podle postupu z předchozí kapitoly. Pro každý vzorek byly nastavené stejné parametry zdroje:

$$U = 24 \text{ V}$$

$$I = 0,24 \text{ A}$$

$$P = 5,76 \text{ W.}$$



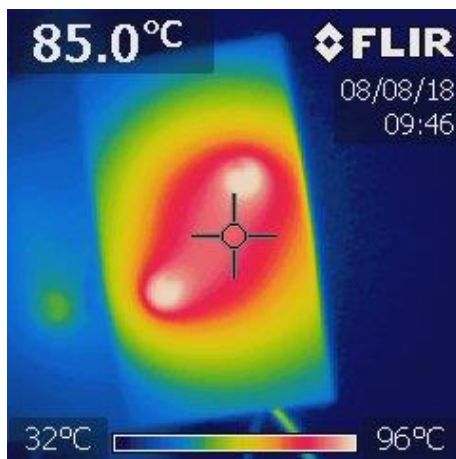
Porovnávané řady data z matematického modelu

Obrázek 20 Vyznačení porovnávaných řad matematického modelu

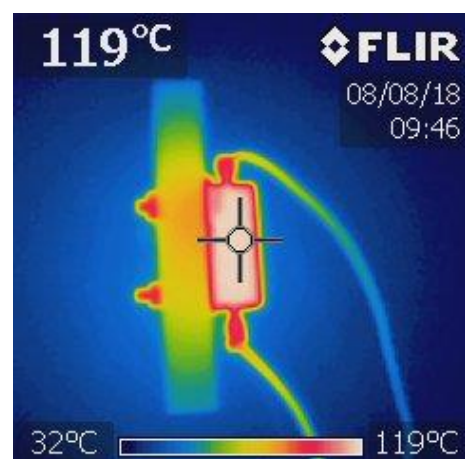
Obrázek 21 Snímek použitého vzorku pro tepelné měření

Pro dosažení optimálního možného odvodu tepla vzorkem byla navíc použita termovodivá pasta. Termovodivá pasta se umístila mezi rezistor a vzorek k vyplnění vzduchových mezer vznikajících nerovnostmi povrchu tištěných vzorků.

Na začátku měření byla vytvořena dvojice snímků původního stavu termokamerou. Poté byly pořizovány dvojice snímků v intervalu pěti minut do ustáleného stavu. Za ustálený stav se považoval stav, kdy změna teploty v časovém intervalu pěti minut v krajních bodech měřeného vzorku nepřekročila 2 °C. Ukázka práce s naměřenými hodnotami, viz *Tabulka 3* a *Graf 1*. Dvojicí měřených snímků jsou myšleny dva snímky. První snímek zaznamenává stav zadní strany vzorku, tedy opačné strany, ke které je přitisknut rezistor (viz *Obrázek 23*). Druhý snímek zaznamenává delší stranu vzorku, mezi stranou rezistoru a stranou na prvním snímku (viz *Obrázek 22*).

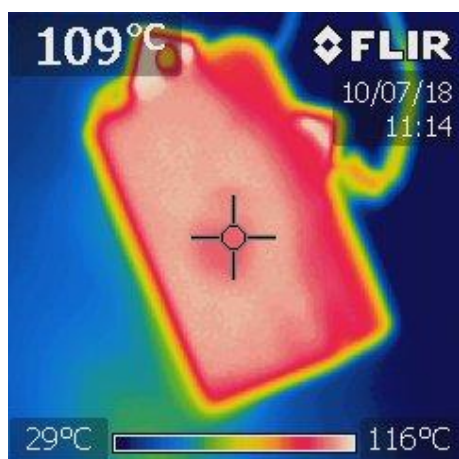


Obrázek 23 Snímek termokamery zadní strany měřeného vzorku

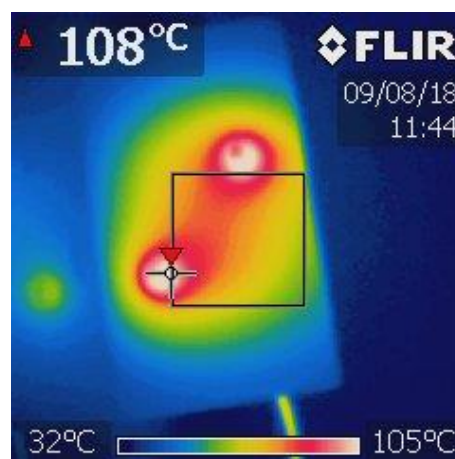


Obrázek 22 Snímek termokamery boční strany měřeného vzorku

Experimentální měření bylo provedeno také na referenčních vzorcích. Jako referenční vzorky si autor vybral vzorek z hliníku (viz *Obrázek 25*), který ilustroval chování chladiče a vzorek z PLA (viz *Obrázek 24*) ke zjištění změny koeficientu tepelné vodivosti přidáním mědi do tiskové struny.



Obrázek 25 Snímek termokamery hliníkové vzorku



Obrázek 24 Snímek termokamery vzorku z PLA

3.1.4. Zpracované hodnoty

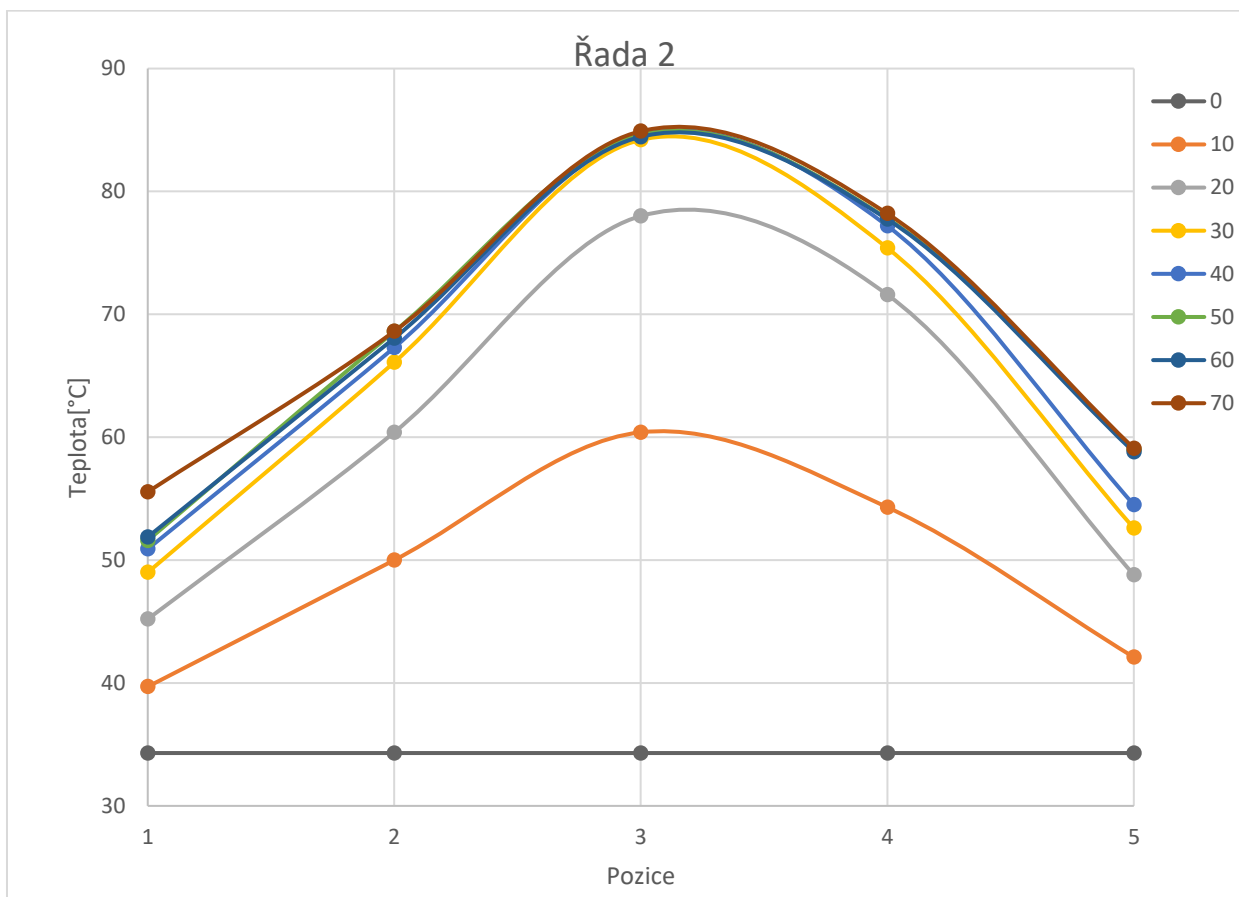
Po změření všech vzorků odečetl autor hodnoty měřených bodů ze snímků termokamery a vytvořil tabulku hodnot teplot v jednotlivých bodech v čase. *Tabulka 3* je částí komplexní tabulky hodnot pro jeden ze vzorků, na níž je jedna z řad bodů. Celé rozsáhlé zpracování teplotní části je v přílohách.

Tabulka 3 Změřené hodnoty teploty pro tiskovou strunu D

Souřadnice	Řada 2				
	Pozice1	Pozice2	Pozice3	Pozice4	Pozice5
X	7	20	33	45	58
Y	20	20	20	20	20
Čas[min]					
0	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3
5	32,3	42,55	49,54	41,7	33,8
10	40,4	58,8	66,3	57,9	42,75
20	40,6	58,9	66,7	60,3	43,4
30	50,75	72,46	84,1	76,8	55,3
40	52,4	74,6	85,4	78,7	56,6
50	54	75,5	85,6	79	57,8
60	54,2	75,6	85,6	80,1	58,15
70	54,5	75,5	86	79,3	58,7

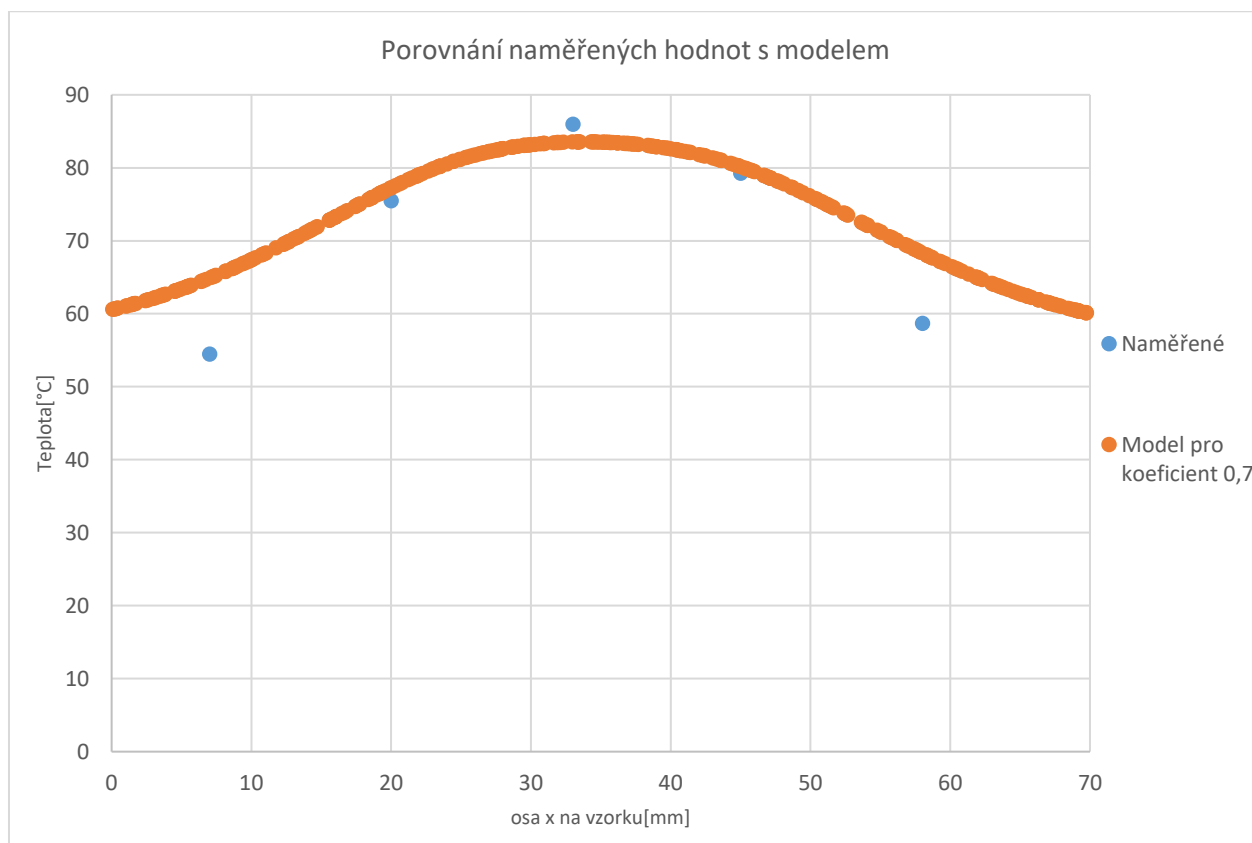
Po vytvoření tabulky byly naměřené hodnoty zpracovány do grafu ilustrujícího vývoj teploty na jednotlivých pozicích. Křivky grafu jsou označeny podle uplynulého času od začátku měření. Osa x označuje pozici bodů v měřené řadě a osa y uvádí teplotu ve stupních Celsia. Pozice bodů je blíže definována v kompletní tabulce měření. Změřené teploty značně ovlivňovaly přípevňovací šrouby. Chování přípevňovacích šroubů se podobalo chování rezistor. Přípevňovací šrouby tak působily, jako další zdroje tepla (viz *Obrázek 23*). To mělo za následek zkomplikování tepelného modelu a ztížení odečítání teploty. V blízkosti šroubů byl velký tepelný rozdíl mezi sousedními body, a právě proto v některých bodech mohlo dojít k chybám v odečítání.

Graf 1: Vzorový graf vývoje teploty v bodech řady 2



Změřená data byla dále použita v softwaru Comsole Multiphysics 5.3. na vytvoření tepelného modelu ustáleného stavu. Parametrem v tepelném modelu byl koeficient tepelné vodivosti. Z výpočetního softwaru autor získal potřebné podklady k porovnání skutečných naměřených a modelových hodnot. V případě dosažení nejlepší schody, byl stanoven koeficient tepelné vodivosti (viz *Graf 2*). Nakonec autor sestavil tabulku všech určených koeficientů tepelné vodivosti (viz *Tabulka 4*).

Graf 2: Ukázka porovnání reálných hodnot a modelových pro tiskovou strunu D a $\lambda = 0,7$



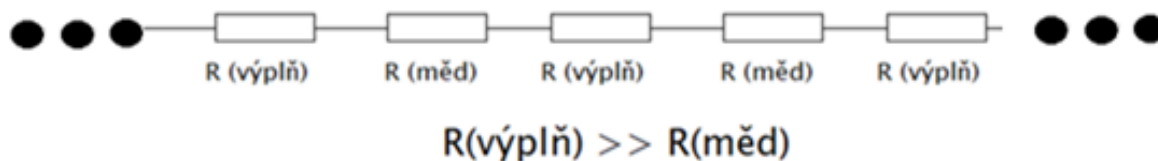
Tabulka 4 určené hodnoty koeficientu tepelné vodivosti

Tisková struna D- CU 80%					
Pozice	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Stanovená hodnota
Koeficient tepelné vodivosti [W/m K]	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7
Tisková struna A- CU 45%					
Pozice	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Stanovená hodnota
Koeficient tepelné vodivosti [W/m K]	0,2	0,3	0,3	0,3	0,275
Tisková struna B- CU 35%					
Pozice	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Stanovená hodnota
Koeficient tepelné vodivosti [W/m K]	0,2	0,3	0,2	0,2	0,225
Tisková struna C- CU 35%					
Pozice	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Stanovená hodnota
Koeficient tepelné vodivosti [W/m K]	0,3	0,2	0,2	0,3	0,25
PLA					
Pozice	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Stanovená hodnota
Koeficient tepelné vodivosti [W/m K]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Al			237 [W/m K]		

3.1.5. Zhodnocení tepelné části

Z naměřených a zpracovaných dat je možné vyvodit, že přidání mědi do tiskových strun nemá žádný podstatný vliv na tepelné vlastnosti tiskové struny. V případě tiskové struny s 80% příměsí mědi byl autor schopen zaznamenat několikanásobné zvýšení koeficientu tepelné vodivosti oproti PLA. Pro reálné využití by však musela hodnota koeficientu tepelné vodivosti vzrůst ještě alespoň stokrát. Pro ilustraci používaný hliník má v běžných laboratorních podmínkách koeficient tepelné vodivosti okolo 237 [W/m K]. [9], [10]

Důvod relativně nízkého koeficientu tepelné vodivosti je možné ilustrovat na *Obrázek 26*. Při použití paralely mezi elektrickými a tepelnými fyzikálními veličinami je možné transformovat tepelný model do ekvivalentního elektrického modelu. Dále lze přetvořit cestu vedeného tepla do modelu tepelných odporů. Při použití této transformace je patrné, že PLA s vysokým tepelným odporem několika řádově vyšším, než je tepelný odpor mědi, zabraňuje dobrému vedení tepla. Problém se tedy nachází v těchto malých neměděných úsecích, přes které musí teplo procházet. Tyto úseky natolik zvyšují celkový tepelný odpor vzorku, že existuje z tepelného hlediska jen malý rozdíl mezi výtiskem z PLA a nízkoprocentní měděnou strunou. Pouze v případě 80 % příměsí je viditelný rozdíl. Je nutné ovšem konstatovat, že už při této koncentraci byla struna málo ohebná a muselo se kontrolovat, jestli nedošlo k jejímu zlomení v průběhu tisku [9], [10]



Obrázek 26 Ilustrativní model tepelného odporu výtisku

V průběhu měření autor narážel na značné potíže při snaze odečítat hodnoty ze správných bodů na získaných snímcích termokamery, zvláště pak z chladnějších okrajů vzorku, kde nebyl patrný na snímku obrys vzorku. Odečítání navíc zkomplikovaly přítomné upevňovací šrouby, které ve své těsné blízkosti vytvořily oblast, ve které se s velmi malým posunem znatelně měnila měřená teplota. Nepřesnosti způsobené manuálním odečítáním teploty se promítly i do porovnání s matematickým modelem. Problematickými byly krajní body, které vybočovaly od matematického modelu. Z důvodu nepřesnosti odečítání těchto krajních bodů se zaměřil autor v porovnávání na prostřední body měřených řad. Samotné porovnání bylo provedeno autorem a podle jeho úsudku byl zvolen koeficient tepelné vodivosti.

Výsledky měření nejsou zcela přesné, ale k základnímu posouzení tiskových strun s příměsí mědi zcela dostatečné. Pro přesné měření by bylo zapotřebí použít specializovaných přístrojů. Podle naměřených dat, lze však určit, že všechny výtisky z tiskové strun s příměsí mědi mají charakter spíše tepelných izolantů.

3.2. Elektrické vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi

Ke správnému zhodnocení fyzikálních vlastností tiskových strun s měděnou příměsí pro využití v elektrotechnice je nutné provést i měření elektrických vlastností. Při navrhování komponent v elektrotechnice je podstatné znát, jestli jsou jednotlivé části vodivé, nebo jestli se jedná o izolanty. Tento údaj je nutný, jak pro správné fungování celkového výrobku, tak i pro jeho bezpečnost. Autor se z tohoto důvodu rozhodl provést měření rezistivity vzorků. Předpokládaným výsledkem je trend, při kterém se zvyšujícím se obsahem mědi bude klesat rezistivita. Tento předpoklad je založený na skutečnosti, že měď má řádově menší rezistivitu než PLA.

3.2.1. Fyzikální význam veličin elektrických vlastností

Rezistivita, také označována jako měrný elektrický odpor je fyzikální veličinou charakterizující vodivostní a odporové vlastnosti látek, které vedou elektrický proud. Rezistivita se také bere, jako materiálová konstanta a je závislá na teplotě materiálu. Jedním z možných způsobů definice rezistivity je definování rezistivity, jako převrácené hodnoty konduktivity. Konduktivita je fyzikální veličina udávající měrnou elektrickou vodivost látky.[13], [14]

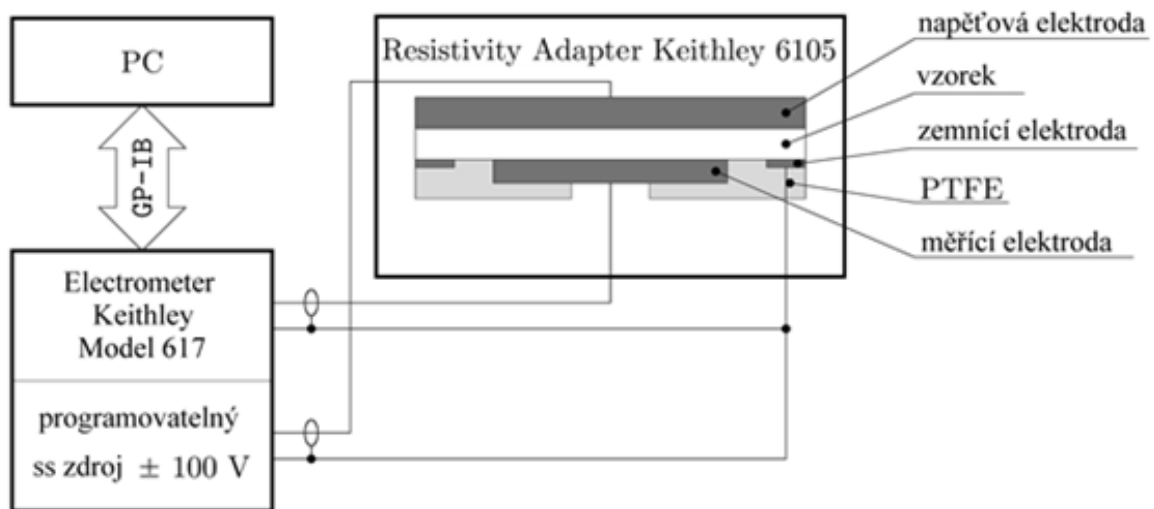
Rovnice 4) Rezistivita

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

ρ	[$\Omega \cdot m$]	Rezistivita (měrný elektrický odpor)
σ	[$S \cdot m^{-1}$]	Konduktivita (měrná elektrická vodivost)

3.2.2. Metodologie měření rezistivity

Pro měření rezistivity autor použil měřicí přípravek Rezistivity Adapter Keithley, Model 6105. Tento přípravek umožňuje měření objemového a povrchového odporu vzorku ve spojení s programovatelným elektrometrem značky Keithley Model 617. Sestava má v sobě vestavený zdroj stejnosměrného napětí +/- 102 V a umožňuje měření odporu do řádu $10^{15} \Omega$. Řízení elektroměru je realizováno prostřednictvím osobního počítače se speciálním uživatelským prostředím pro měření. Měření je blíže popsáno v knize [14].



Obrázek 27 Blokové schéma měřicího přípravku pro měření objemové rezistivity

Rezistivita měřených vzorků je dopočtena z naměřených hodnot jejich objemového odporu podle následujícího fyzikálního vztahu, odvozeného v manuálu měřicího přístroje a odpovídá normě IEC 62631-3-1 . [14]–[16]

Rovnice 5) Rezistivita vyjádřená pomocí objemového odporu

$$\rho = \frac{\pi D_{ef}^2}{4h} R$$

ρ	[$\Omega \cdot m$]	Rezistivita (měrný elektrický odpor)
D_{ef}	[m]	Efektivní průměr měřicí elektrody
h	[m]	Tloušťka měřeného vzorku
R	[Ω]	Objemový odpor vzorku

Použité elektrody v měření měly efektivní průměr $D_{ef} = 3,75 \cdot 10^{-2}$ m.

Měření každého vzorku trvalo jednu hodinu s periodou záznamu patnáct sekund, aby bylo dosaženo ustálených hodnot. Na závěr autor provedl aritmetický průměr posledních deseti hodnot, protože naměřené hodnoty se pohybovaly v určitém intervalu.

3.2.3. Naměřené a spočítané elektrické veličiny

Tabulka 5 Znamé hodnoty pro počítání elektrických veličin

D_{ef}	$3,75 \cdot 10^{-2}$	m
h	$6 \cdot 10^{-4}$	m
U	25	V

Tabulka 6 Hodnoty objemového odporu a rezistivity pro testované vzorky

	Naměřené hodnoty	Vypočítané hodnoty
	Objemový odpor [Ω]	Rezistivita [Ω m]
Tisková struna D- CU 80%	3,86E+14	7,11E+14
Tisková struna A- CU 45%	1,12E+15	2,06E+15
Tisková struna B- CU 35%A	6,97E+14	1,28E+15
Tisková struna C- CU 35%B	9,10E+14	1,67E+15

Měření všech vzorků proběhlo podle postupu popsaného v předešlé podkapitole. Výška vzorků byla změřena na mikrometru a hodnota je uvedena v Tabulka 5. Znamé hodnoty pro počítání elektrických veličin *Tabulka 5*. K vypočítání byl pak použita *Rovnice 5*.

3.2.4. Zhodnocení elektrické části

Z naměřených hodnot měl nejnižší měrný odpor vzorek s nejvyšším obsahem mědi, což se shoduje s předpoklady měření. Avšak v dalších případech původní předpoklad nebyl splněn z důvodu, že tisková struna A s vyšším obsahem mědi měla vyšší rezistivitu, než tiskové struny B a C. Pravděpodobně se jednalo o nepřesnost způsobenou nedokonalostí měřící metody. Vytiskované vzorky mívají povrchové nerovnosti a tohoto důvodu mohlo dojít k nedokonalému přitisknutí měřících elektrod. Dalším zdrojem nepřesnosti může být skutečnost, že měření probíhalo v krajních měřitelných hodnotách přístroje. Z naměřených hodnot se můžeme vyvodit, že změřené vzorky s jejich vysokou rezistivitou vykazovaly chování elektrického izolantu. Pro odhad chování těchto materiálů toto měření postačovalo, ale v případě řešení konkrétní aplikace by se muselo provést nové a přesnější měření.

3.3. Mechanické vlastnosti tiskových strun s příměsí mědi

Není pochyb o tom, že mechanické vlastnosti látek mají jeden z hlavních vlivů na rozhodování o výběru materiálu pro elektrotechnické součástky. Se zvyšujícím se nahrazováním kovů, často levnějšími a lehčími plastovými alternativami, vzniká potřeba důkladně zkoumat mechanické vlastnosti těchto alternativ. V případě použití plastových součástek je nutné pečlivě zmapovat limity těchto materiálů. Mechanické vlastnosti mají spolu s chemickými vlastnostmi velmi úzkou spojitost i s životností výrobků. U řady výrobků je princip fungování výrobku je zcela závislý na mechanických vlastnostech.

Proto pro dosažení maximálního využití materiálu je nutné znát jeho mechanické vlastnosti. Autor se v této práci zaměřil pouze na část mechanických vlastností zkušebních výtisků z důvodu rozsahu práce. Třemi vybranými vlastnostmi jsou, pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu a relativní prodloužení. Důvodem proč autor zvolil zrovna tyto vlastnosti je, že výtisky z 3D tiskárny často slouží, jako úchyty a držáky, a proto je právě zajímavé prozkoumat zmíněné vlastnosti. Všechny tyto vlastnosti prozkoumal autor při měření na speciálním měřicím přístroji pro měření mechanických vlastností, trhačce. Pro vytištěné vzorky bylo zvoleno 100 % plnění, v případě jiného plnění by vznikl nezanedbatelný vliv způsobený nastavením tvarováním plnění.



Obrázek 28 Testovací vzorky pro mechanickou zkoušku

3.3.1. Fyzikální význam veličin mechanických vlastností

3.3.1.1. Pevnost a napětí v tahu

Pevnost v tahu je určena pro dané podmínky, jako největší možné napětí v materiálu při natahování, které materiál vydrží, aniž by se porušil. Definuje se, jako poměr maximální naměřené síly a výchozího průměru vzorku. Napětí v tahu je definováno, jako napětí materiálu při natahování a je podobně definováno, jako pevnost v tahu.[4], [13], [14], [17]

Rovnice 6) Pevnost v tahu

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

R_m	[N/m ²]	Pevnost v tahu
F_m	[N]	Maximální naměřená síla
S_0	[m ²]	Výchozí průměr vzorku

Rovnice 7) Napětí v tahu

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

σ	[N/m ²]	Napětí v tahu
F	[N]	Naměřená síla
S_0	[m ²]	Výchozí průměr vzorku

3.3.1.2. Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu je také nazývaný Youngův modul. Youngův modul je určený z počáteční lineární části deformační křivky σ - ϵ . V tomto rozmezí se chová materiál pružně, to znamená, že po uvolnění síly se vrátí materiál do původního stavu.[4], [13], [14], [17]

Rovnice 8) Modul pružnost v tahu

$$tg\alpha = E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$$

σ_x	[N/m ²]	Napětí v tahu pro daný bod v lineární oblasti
ϵ_x	[-]	Relativní prodloužení
E	[N/m ²]	Modul pružnosti v tahu

3.3.1.3. Relativní prodloužení

Relativní prodloužení je koeficient definovaný, jako poměr změny délky zkušebního vzorku k původní délce zkušebního vzorku. V okamžiku přetržení je relativní prodloužení zkušebního vzorku maximální a nazývá se jako tažnost materiálu.[4], [13], [14], [17]

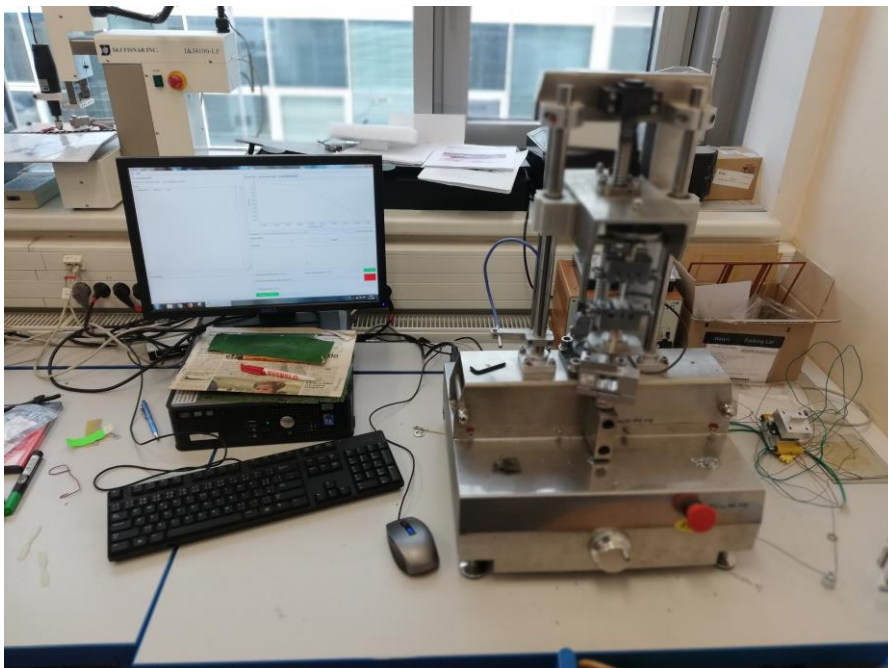
Rovnice 9) Relativní prodloužení

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

ε	[-]	Relativní prodloužení
Δl	[m]	Absolutní prodloužení
l_0	[m]	Původní délka

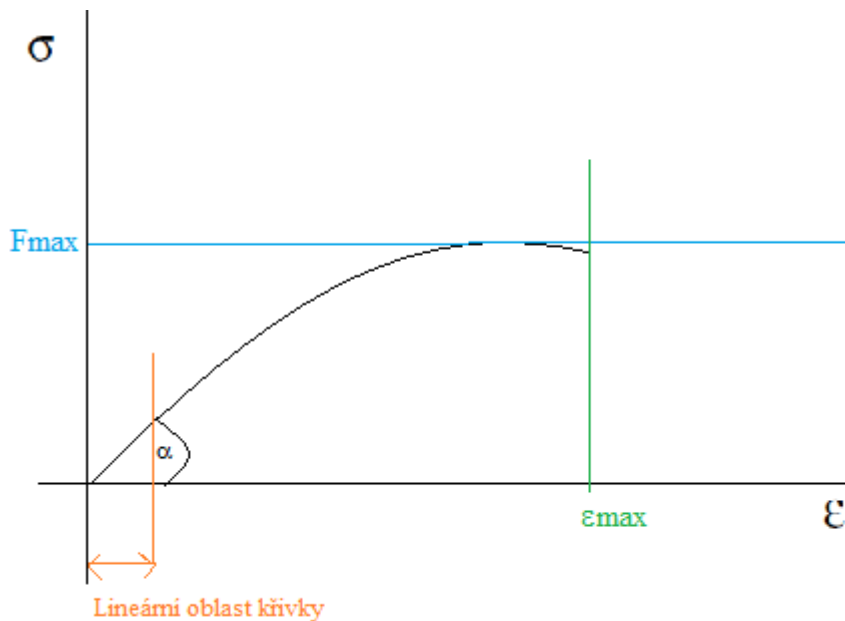
3.3.2. Metodologie měření mechanických vlastností

Pro zjištění mechanických vlastností vzorků byla použita automatizovaná soustava s trhačkou (viz *Obrázek 29*). Trhačku ovládá dostupný program v laboratoři, kde nastavovaným parametrem je rychlost pohybu uchopovacích kleští. Program zaznamenává v průběhu měření polohu v kleštích, vyvíjenou sílu a čas.



Obrázek 29 Soustava pro měření mechanických vlastností

Pro měření jsou použity vzorky definovány podle normy (viz [17]). Výchozí průměr vzorku je 9mm^2 . Vzorky jsou uchopeny v kleštích a namáhány silou měřenou tenzometrem. Kleště se od sebe vzdalují definovanou rychlostí a tím se zvyšuje síla v tahu vyvíjená na vzorek. Experiment probíhá do přetržení vzorku, kde je určeno maximální prodloužení. Z naměřených hodnot je sestrojena křivka σ - ϵ udávající mechanické chování vzorku (viz *Obrázek 30*). Z lineární části chování vzorku je určen Youngův modul. Z maximální vyvíjené síly se vypočítá podle *Rovnice 6*) Pevnost v tahu z hodnoty těsně před přetržením se určí tažnost vzorku.[14], [17]

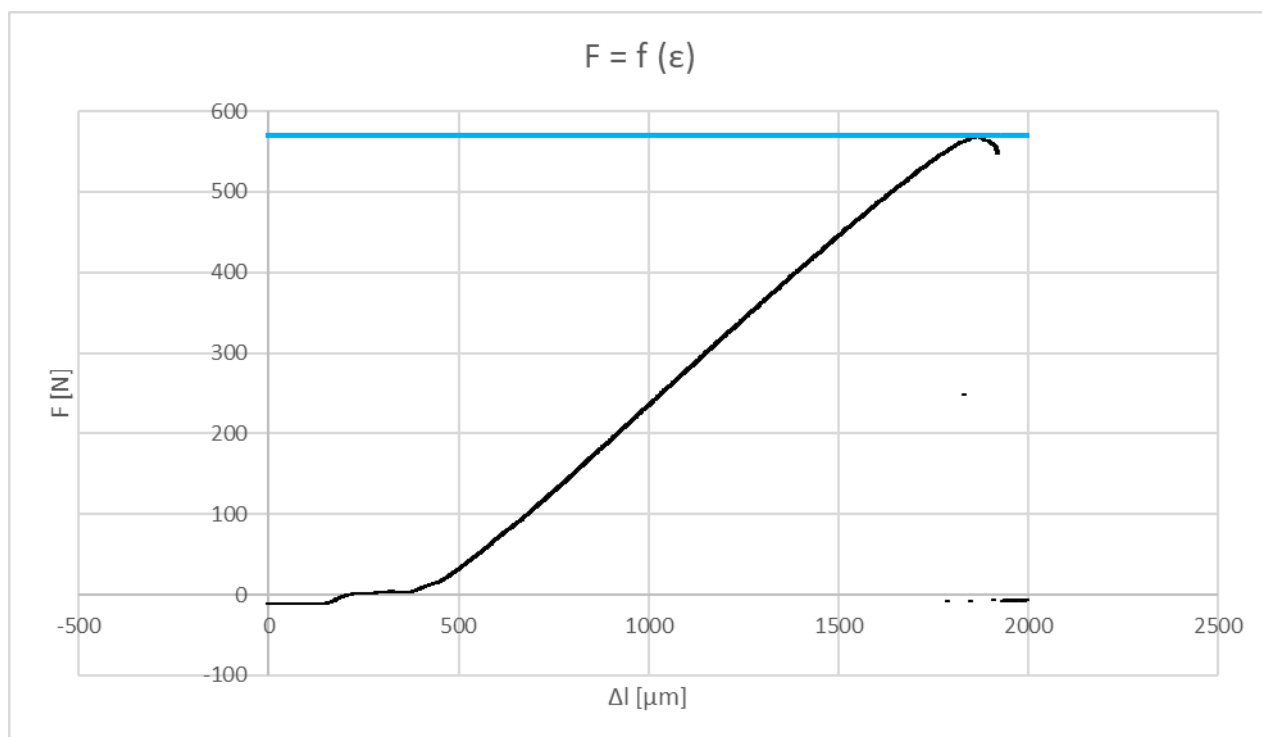


Obrázek 30 Modelová závislost $\sigma = f(\epsilon)$

3.3.3. Měření mechanických vlastností a naměřené hodnoty

Měření vzorků proběhlo podle popsaného postupu. Rychlost vzdalování kleští uchopující vzorek byla nastavena na 1mm/minuta . Pro každý typ materiálu byla provedena tři měření. Měření ovlivňoval problém s podkluzováním úchopných kleští. Úchopné kleště byly v době měření ve stavu značného opotřebení a vzorky v nich měly navzdory silnému utažení tendenci prokluzovat. Prokluzování mělo za následek zkreslení naměřených hodnot. Na začátku každého měření probíhalo takzvané dosedání kleští, kdy docházelo k zapadnutí vzorku do kleští. Dosedání kleští je vidět na *Graf 3*, kdy na začátku měření byla vyvíjená síla záporná. Tento jev se pak velmi negativně projevoval na stanovení Youngova modulu a tažnosti materiálu, protože se jednoznačně nedalo pracovat s lineární částí grafu.

Graf 3 $F=f(\epsilon)$ pro tiskovou strunu B



Tabulka 7 Naměřené a dopočítané mechanické vlastnosti

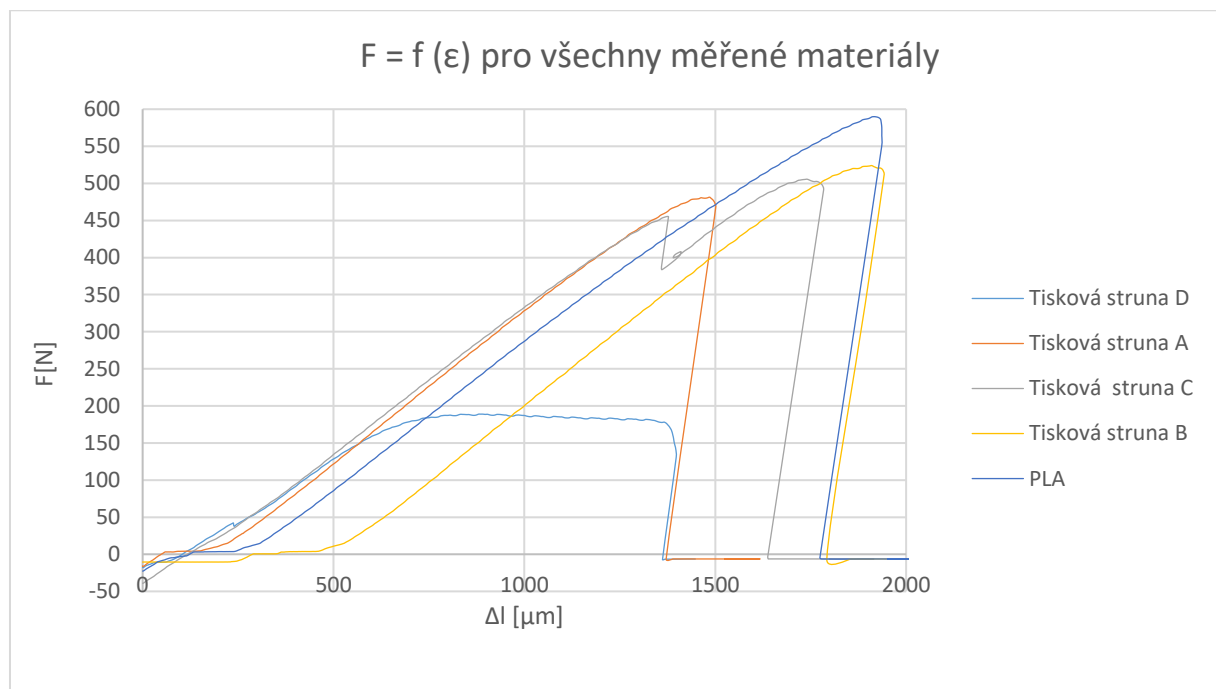
Materiál	Vzorek	F_{\max} [N]	Δl [μm]	E [N/m^2]	ϵ_{\max} [%]	R_m [N/mm^2]
PLA	č. 1	589,95	1936	2279,7	2,18%	65,5
	č. 2	621,18	2095	1883,5	2,35%	69
	č. 3	597,97	2270	3704,2	2,55%	66,4
Tisková struna A	č. 1	481,33	1484	4754,9	1,67%	53,4
	č. 2	477,48	1617	2314,7	1,82%	53
	č. 3	476,06	1516	5775,8	1,70%	52,9
Tisková struna B	č. 1	569,40	1834	904,4	2,06%	63,2
	č. 2	524,02	1893	180,5	2,13%	58,2
	č. 3	542,95	2248	119,9	2,53%	60,3
Tisková struna C	č. 1	505,68	1784	7117,5	2,00%	56,1
	č. 2	514,67	1626	5137,3	1,83%	57,1
	č. 3	525,57	1705	2740,2	1,92%	58,3
Tisková struna D	č. 1	189,55	1534	1542,2	1,72%	21,1
	č. 2	188,98	1398	4645,5	1,57%	21
	č. 3	192,00	1384	3522,9	1,56%	21,3

3.3.4. Zhodnocení mechanických vlastností strun s měděnou příměsí

Z naměřených a vypočítaných dat je patné, že mechanické vlastnosti PLA se s vyšším procentem přidané mědi zhoršují. Dokonce v případě tiskové struny D klesla pevnost v tahu přibližně na třetinu pevnosti v tahu čistého PLA. Dále bylo zjištěno, že průběhy všech měření měly tvar přímky s rozdílem ve sklonu (viz *Obrázek 31*).

V průběhu měření se velmi negativně projevilo opotřebování úchopných kleští. V úchopných kleštích vzorek při vyšší tažné síle prokluzoval a na začátku měření dlouze dosedal. To mělo za následek velmi obtížné určování relativního prodloužení a všech veličin s ním spojených. To je hlavně patrné na měření tiskové struny B (viz *Obrázek 31*). Pro určování Youngova modulu byly použity hodnoty, kde síla byla větší než 0.

Navzdory všem obtížím s měřicí soustavou se podařilo změřit mechanické chování vzorků s příměsí mědi. Cílem této práce není podrobná analýza mechanických vlastností, ale pouze jejich odhad a na ten změřené údaje postačují. Příměs mědi na PLA má negativní vliv na všechny měřené mechanické vlastnosti. Výrobek ze strun s příměsí mědi má horší mechanické vlastnosti než výrobek z PLA. Závěrem tohoto měření je doporučena obezřetnost při používání tiskových strun se zvláště vysokým obsahem mědi u aplikací, kde je vyžadována mechanická odolnost výrobku.



Obrázek 31 $F = f(\epsilon)$ pro všechny měřené materiály

4. Ekonomické zhodnocení FDM metody

Po předchozím seznámení s možnostmi a omezeními spojenými s metodou FDM 3D tisku a používanými materiály vzniká důvodná pochybnost ohledně reálného využití v malovýrobě. K adresování této pochybnosti je nutné vypracovat kalkulaci pořizovacích nákladů a nákladů spojených s tiskem FDM metodou.

Autor zvolil při kalkulaci nákladů spojených s 3D tiskem možnost, kdy 3D tisk probíhá, jako doplňková činnost v podnikání, nebo pro domácí použití. Tato varianta byla zvolena po důkladném zvážení, hlavně z důvodu lepšího porovnání s tradiční výrobou. Navíc ve variantě kalkulace s použitím 3D, jako primární ekonomické aktivity se objevuje řada nákladů zanedbaných ve variantě s doplňkovou výrobou. Tyto náklady jsou blíže popsány v dalších podkapitolách.

U porovnání nákladů 3D tisku metodou FDM a tradiční výroby byla zvolena varianta, kdy 3D tisk, jako sekundární činnost nabízí variantu tisku vybrané součástky, místo jejího nákupu ve velkoobchodě s elektrotechnikou. Tento přístup má řadu omezení. Nejvíce patrná je pak nemožnost vyčíslení konkrétních nákladů u tradiční výroby. Autor se záměrně nepouštěl do tohoto vyčíslení, protože u tradiční výroby náklady velice úzce souvisejí s náročností výroby výrobku a stanovení počtu vyrobených kusů. Proto se spíše autor zaměřil na porovnání vlastností 3D tisku a tradiční vstříkolisové metody. Práce je primárně zaměřena na ekonomické popsání výroby pomocí 3D tisku, jelikož tato oblast zatím nebyla zcela zmapována, protože se jedná o novou technologii.

Výsledná kalkulace je rozdělena do několika částí. Podkapitoly pak tvoří popisy těchto částí a autor se v nich snaží ukázat a vysvětlit, jeho postup při tvoření této kalkulace. Na závěr je pak v této kapitole celá kalkulace s dopočtem celkových nákladů na určitý výrobek.

Modelovým příkladem by mohla být malá firma s několika zaměstnanci navrhující a vyrábějící kusové elektrotechnické výrobky. Vyrobené integrované obvody jsou ukládány do ochranných pouzder dostupných na trhu. Tyto pouzdra ovšem nenabízejí široký výběr typů a v řadě případů limitují návrh integrovaného obvodu. Řešením by pak mohlo být pořízení několika 3D tiskáren umožňující vyrábět ochranná pouzdra podle potřeby firmy, které nevyžadují nákup drahých vstříkolisových strojů a forem.

4.1. Investiční náklady

Při posuzování ekonomické efektivnosti projektu je nutné identifikovat všechny přímé i nepřímé náklady spojené s realizací projektu. Náklady je vhodné dělit do souvisejících podskupin. Tyto podskupiny pak mohou posloužit k vytvoření citlivostní analýzy, která je jedním z nástrojů odhalení možných rizik a nákladů v projektu. Jednou z podskupin jsou i investiční náklady. Investičními náklady je možné označit náklady na pořízení dlouhodobého majetku. K vytvoření správné kalkulace je nutné pak jejich vliv správně vyjádřit v časovém horizontu investice. [18]–[20]

V této kalkulaci je výroba 3D tiskem doplňkovou činností. Autor zanedbává část investičních nákladů běžných pro primární podnikatelskou činnost. Zanedbávanými náklady jsou náklady nutné k vytvoření a zařízení výrobní, nutné investice k distribuci výrobků, vývoji, propagaci výrobku a další. Autor se dopouští tohoto zanedbání, protože jedním z předpokladů kalkulace je, že se jedná o doplňkovou činnost, která svojí velikostí a náročností neklade velké požadavky na zanedbané položky.

Kalkulace je vztažena na jednu 3D tiskárnu, ale v případě realizace projektu je pravděpodobné, že celkový počet tiskáren by byl vyšší. V kalkulaci je počítáno s dvěma rozpočítávanými náklady. Prvním je nákup 3D tiskárny, jakožto největší investiční náklad v celé kalkulaci. Vybranou 3D tiskárnou je tiskárna od společnosti Průša s.r.o. a jedná se o typ i3 mk3. Autor vybral tuto tiskárnu, protože veškeré předchozí materiálové zkoušky byly provedeny na výtiscích ze stejného typu tiskárny, kde se tiskárna osvědčila svojí spolehlivostí. Dále se jedná o jednu z nejkvalitnějších tiskáren dostupných na trhu podle řady nezávislých hodnocení a vyhrála řadu soutěží, například ve vědeckém časopisu Make. Různé levné napodobeniny spolu s velkou částí konkurenčních tiskáren by pak neobstály v náročném výrobním režimu použitém v kalkulaci. Druhým pořizovacím výdajem je montáž a kalibrace tiskárny. Nejedná se o klasický investiční náklad, ale z důvodu neoddělitelnosti od pořízení 3D tiskárny se autor rozhodl tento náklad uvést v této části. Část výrobců nabízí možnost objednat si smontovanou a kalibrovanou tiskárnu, ale z důvodu i pak složitějšího doručení je cena takové smontované tiskárny o desítky procent vyšší, a proto v tomhle případě by se jednalo o nevýhodnou variantu. Nákladem je zde čas pracovníka, který montuje tiskárnu. Montáž tiskárny v průměru trvá 6 až 8 hodin v závislosti na zručnosti osoby montující tiskárnu. Hodnota času stráveného montáží byla stanovena na 2000 Kč. Smontování tiskárny navíc slouží, jako zkušenost k případné výměně a čištění dílů tiskárny.

4.1.1. Rozpočítání investičních nákladů

U projektů s dlouhodobým trváním je nutné použít některou z metod zohledňující časovou cenou peněz. Časová cena peněz zahrnuje skutečnost, že místo realizace daného ekonomického projektu mohl investor vložit své prostředky do jiného projektu, nebo příležitosti. V těchto případech je nutné si zvolit diskont, koeficient udávající předpokládaný roční procentuální výnos jiných variant, nebo se jedná o chtěný roční procentuální výnos investice. Existuje řada kritérií ekonomické efektivity se svými pozitivy a nedostatky. Autor ve svých kalkulacích použil kritérium NPV- čisté současné hodnoty a pro snazší orientaci i metodu RCF-ročních ekvivalentních toků.[18]–[20]

4.1.1.1. NPV

Jedná se o jednu z metod určující ekonomickou efektivity. NPV je součet všech diskontovaných hotovostních toků. Pro správné použití této metody je nutné znát, nebo správně určit již zmiňovaný diskont neboli alternativní cenu kapitálu. Diskont u této metody charakterizuje časovou cenu peněz a riziko. Důležité je zmínit, že se diskont může v průběhu investice měnit, což zvyšuje náročnost a možnou nepřesnost u velmi dlouhých investic v řádech desítek let. NPV je definována matematickým vztahem viz *Rovnice 10*. [18]–[20]

Rovnice 10) NPV

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \times (1 + r)^{-t}$$

NPV	Čistá současná hodnota (N et P resent V alue)
CF_t	Hotovostní tok v čase t
r	diskont-diskontní sazba
T	Životnost investice

4.1.1.2. Anuita

K vypočítání RCF je používána anuita. Anuita je koeficientem používaným ve finanční matematice závislým na výši diskontu a životnosti operace. Anuita se převážně používá při výpočtech konstantních plateb ve stejných časových intervalech. Anuita je definována matematickým vztahem viz *Rovnice 11*. [18]–[20]

Rovnice 11) Anuita

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

a	anuita
r	diskont, u jiných případů se může používat i úrok
T	Životnost investice

4.1.1.3. RCF

Roční ekvivalentní peněžní tok je metodou, při které dochází k rovnoměrnému rozdělení peněžních diskontovaných toků do jednotlivých let životnosti projektu. Tato metoda je vhodná pro porovnání variant se shodným rokem počáteční investice, ale různou životností. Roční ekvivalentní tok je definován jako NPV vynásobená anuitním faktorem.[18]–[20]

Rovnice 12) RCF

$$RCF = a \times NPV$$

4.1.2. Přehled investičních nákladů

Tabulka 8 Ilustrační tabulka investičních nákladů kalkulace 3D tisku

Investiční náklady				
Položka	Cena	Životnost	Anuita	Ekvivalentní roční částka
3D tiskárna (Prusa i3 mk3)	16 520 Kč	6	0,185	3 050 Kč
Montáž 3D tiskárny	2 000 Kč	6	0,185	369 Kč

Autor v této části zvolil použití RCF z důvodu flexibility výroby 3D tiskárny. 3D tiskárna je schopna velmi jednoduše měnit tištěný výrobek a tím i projekt na rozdíl od tradičních výrobních procesů. Autor proto zvolil ekvivalentní roční peněžní tok pro snadné rozpočítání počátečních výdajů do výrobních nákladů výrobku i pro případ změny vyráběného výrobku. V ilustrační tabulce jsou rozpočítány investiční náklady s diskontem 3 % a životnost tiskárny podle doporučení výrobce byla určena na 6 let.

4.2. Provozní náklady

Jako provozní náklady jsou označovány náklady přímo spojené s výrobou. V této ekonomické kalkulaci autor rozdělil provozní náklady do několika podskupin. Důvodem tohoto rozdělení je zvýšení přehlednosti kalkulace a následná možnost lehkého identifikování částí vhodných pro optimalizaci. Výpočet provozních nákladů vychází z informací od výrobce tiskárny, Průša s.r.o.. Jednalo se o informace o životnosti dílů tiskárny a tiskových vlastnostech určitých materiálů.

4.2.1. Provozní náklady na údržbu tiskárny

Do provozních nákladů na údržbu tiskárny autor zahrnul náklady vznikající opotřebením tiskárny a náklady na její údržbu. Náklady na samotný tisk jsou uvedeny v další kapitole. Informace k životnosti dílů získal autor při exkurzi u výrobce tiskárny Průša s.r.o..

Tabulka 9 Náklady na údržbu tiskárny

Výdaje na údržbu		
Položka	Nutnost provedení	Cena
E3D V6 tryska	po 1000 tiskových hodinách	200 Kč
Trubička-hot end	po 1000 tiskových hodinách	20 Kč
Podložka	po 1500 tiskových hodinách	250 Kč
Sada krokových motorků	po 20000 tiskových hodinách	4 000 Kč
Cena práce za údržbu	každé 3 měsíce	250 Kč
Vytištěný díl tiskárny	Každý rok	50 Kč

Potřebná data průměrných dob nutnosti výroby byla získána od výrobce, který provozuje velkou tiskovou farmu, ze které byly z dlouhodobých statistik získána tato data. Položky E3D V6 tryska a trubička jsou komponenty tiskové hlavy, které je nutné z důvodu opotřebením vyměňovat průměrně každých 1000 hodin. Jejich životnost je úzce závislá na použitém typu tištěného materiálu. Podložka patří také mezi komponenty 3D tiskárny, které je nutno vyměňovat. Při používání a neopatrným zacházením dochází k poškození podložky, a tedy ke zhoršení tiskových vlastností celé tiskárny. Sada krokových motorků nepatří mezi běžně obměňované díly. Jejich výměna je nutná pouze po dlouhodobém intenzivním využívání tiskárny. U krokových motorků nedochází ve většině případů k jejich zničení, ale k snížení jejich krokové přesnosti, popřípadě k opotřebením řemení.

Autor v kalkulaci započítává odměnu obsluhy za vynaloženou práci při výměně komponent, jedná se pouze o odhad vycházející z vlastní zkušenosti. Podrobněji se věnuje autor odměně obsluhy ve výsledné kalkulaci. Poslední položkou je vytištění dílu. Řada 3D tiskáren obsahuje nemalý počet dílů vyrobených na jiných 3D tiskárnách v takzvaných tiskových farmách. Tyto díly je nutné za určitý čas obměňovat.

4.2.2. Tiskové náklady

Jako tiskové náklady autor označuje trojici nákladů přímo souvisejících s tiskem. Jedná se o náklady za elektrickou energii, materiál a práci obsluhy. Dohromady tyto náklady tvoří většinu variabilních nákladů 3D tisku. Do kompletních variabilních nákladů by byly ještě přičteny provozní náklady na údržbu tiskárny.

4.2.2.1. Náklady na obsluhu

K určení nákladů na obsluhu je potřeba vzít v úvahu řadu faktorů. Jedním z hlavních faktorů je, jestli 3D tisk je jedinou náplní práce obsluhy, nebo pouze okrajovou činností. Dalším z faktorů by například byla hodinová odměna obsluhy a podobně. Z důvodu existence velkého počtu faktorů ovlivňující výši toho nákladu, provedl autor citlivostní analýzu, kde jedním z parametrů je náklad na obsluhu.

4.2.2.2. Náklady na materiál

Náklad materiálu na výrobu je nejnázve určitelným nákladem celé kalkulace. K jeho určení nám stačí jen několik snadno zjistitelných údajů. Prvním z údajů je cena použitého materiálu, která je ve většině případů vztažena na určitou hmotnost. Dalším z údajů pro určení ceny materiálu výrobku je délka spotřebované tiskové struny. Tento údaj uvádí všechny současné slicer programy při exportování g-codu. Posledními dvěma údaji jsou, měrná hmotnost struny na určitou délku a koeficient zmetkovosti. Koeficient zmetkovosti udává procentuální hodnotu vytištěných vzorků neprocházející určitým stupněm kvality. Koeficient zmetkovosti je uměle vytvořeným ukazatelem k porovnání náročnosti a správnosti tisku.

Tabulka 10 Údaje k výpočtu materiálových nákladů výrobku

	Cena materiálu	Hmotnost struny	Koeficient zmetkovosti
PET-G	370 Kč/kg	3,10g/m	1,15
PLA	395 Kč/kg	3,07g/m	1,15
ASA	505 Kč/kg	2,57g/m	1,05

4.2.2.3. Náklady na elektrickou energii

Náklady na elektrickou energii se výrazně liší podle použitého materiálu a nastavení tiskárny. Při 3D tisku se nejvíce energie spotřebuje na výrobu tepla a se zvyšující se potřebnou teplotou rapidně roste i spotřeba elektrické energie. Nejvíce tepla je konkrétně spotřebováno na ohřev podložky. Množství spotřebovaného tepla se může ovlivnit konstrukčními vlastnostmi tiskárny a pracoviště. V případě tiskárny je možné použít různé typy krytů k částečné tepelné izolaci, tyto kryty mohou být také používány k blokování úniku škodlivých plynů vznikajících při tisku některých materiálů.

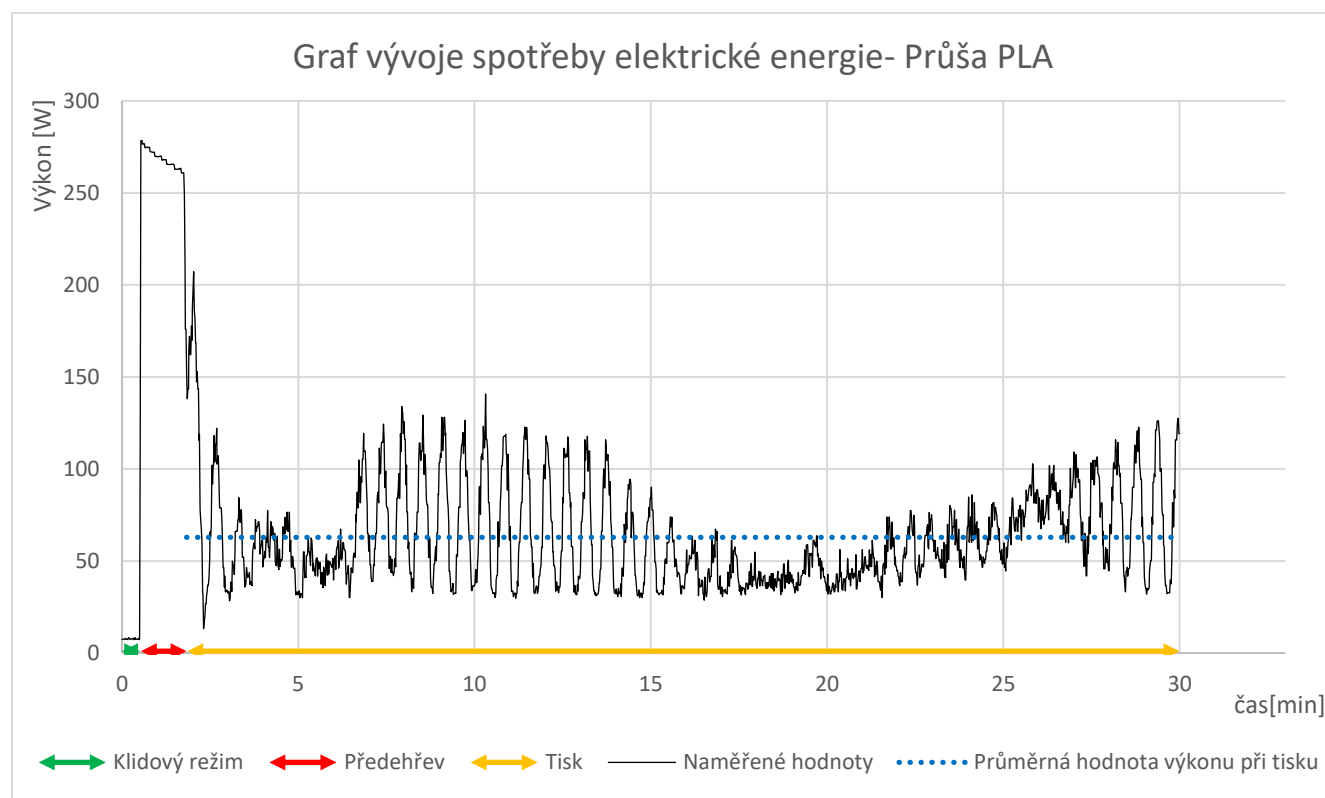
Při napájení 3D tiskáren je nutné mít na paměti zvláště u pracovišť s vyšším počtem 3D tiskáren, že 3D tiskárny používají spínané zdroje. Tato skutečnost je zanedbatelná u malého počtu tiskáren, ale u větších počtů je nutné použít speciální připojení na síť, popřípadě různé filtry.

Autor ve svém modelu nepočítal s nutností navýšení spotřeby a fixními poplatky za odebrání energie, protože 3D tisk je brán v tomto případě, jako doplňková činnost a nebyla předpokládána změna velikosti odebírané elektřiny, nebo tarifu. Autor proto provedl pouze měření spotřeby elektrické energie u tří druhů tiskových strun pro hlavní tiskové stavy. Cena elektrické energie byla použita z jednoho z běžně dostupných tarifů. Kvůli vysoké nestálosti ceny elektrické energie, vyplývající z dostupných grafů vývoje cen elektrické energie v posledních letech. Neprováděl autor rozsáhlejší výzkum predikcí a stanovil cenu pro kalkulaci na 5,6 Kč/kWh.

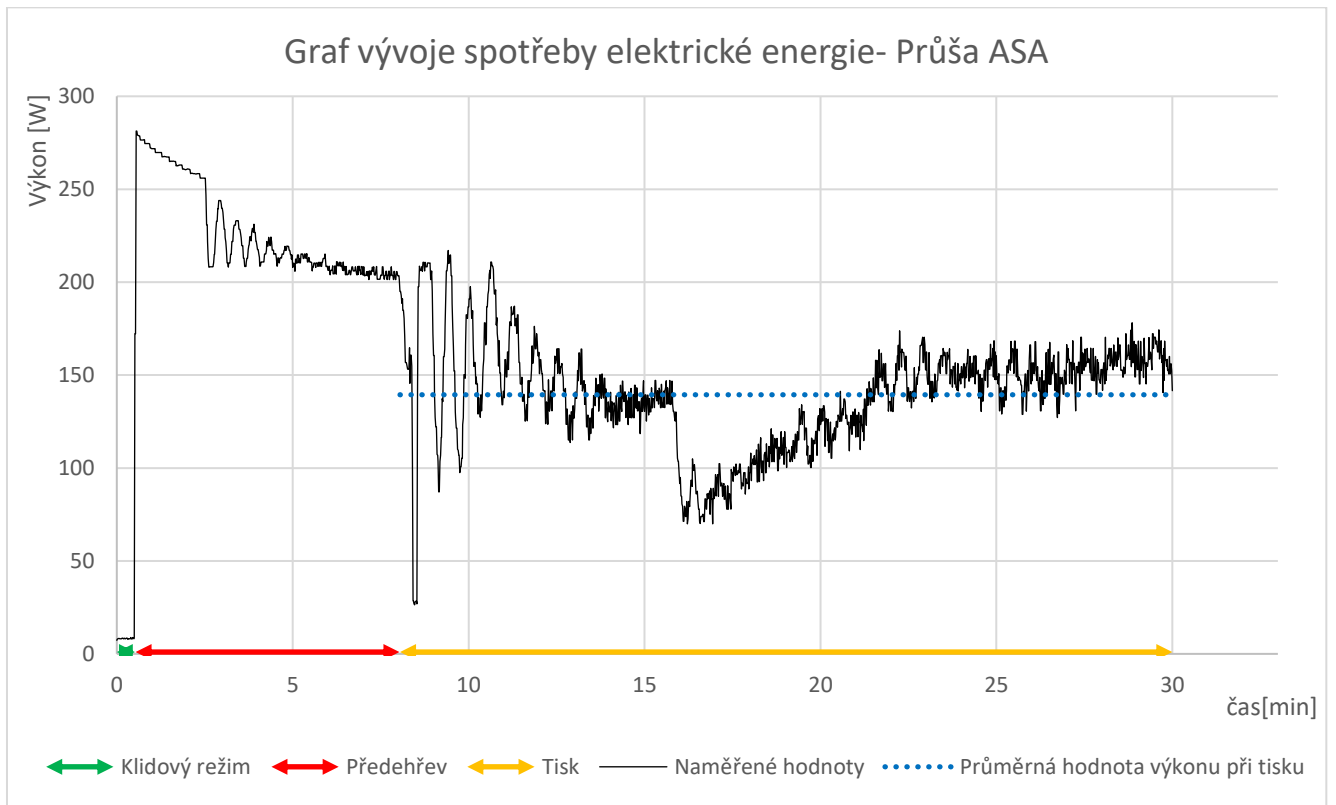
Tabulka 11 Údaje k výpočtu energetických nákladů výroby

	Průměrná spotřeba v klidovém režimu	Průměrná spotřeba při tisku	Spotřebovaná energie na rozeheřvání
PLA	8,00 W	62,86 W	5,78Wh
PET-G	8,00 W	98,56 W	15,45Wh
ASA	8,00 W	139,41 W	28,49Wh
Cena elektrické energie	5,6 Kč/kWh		

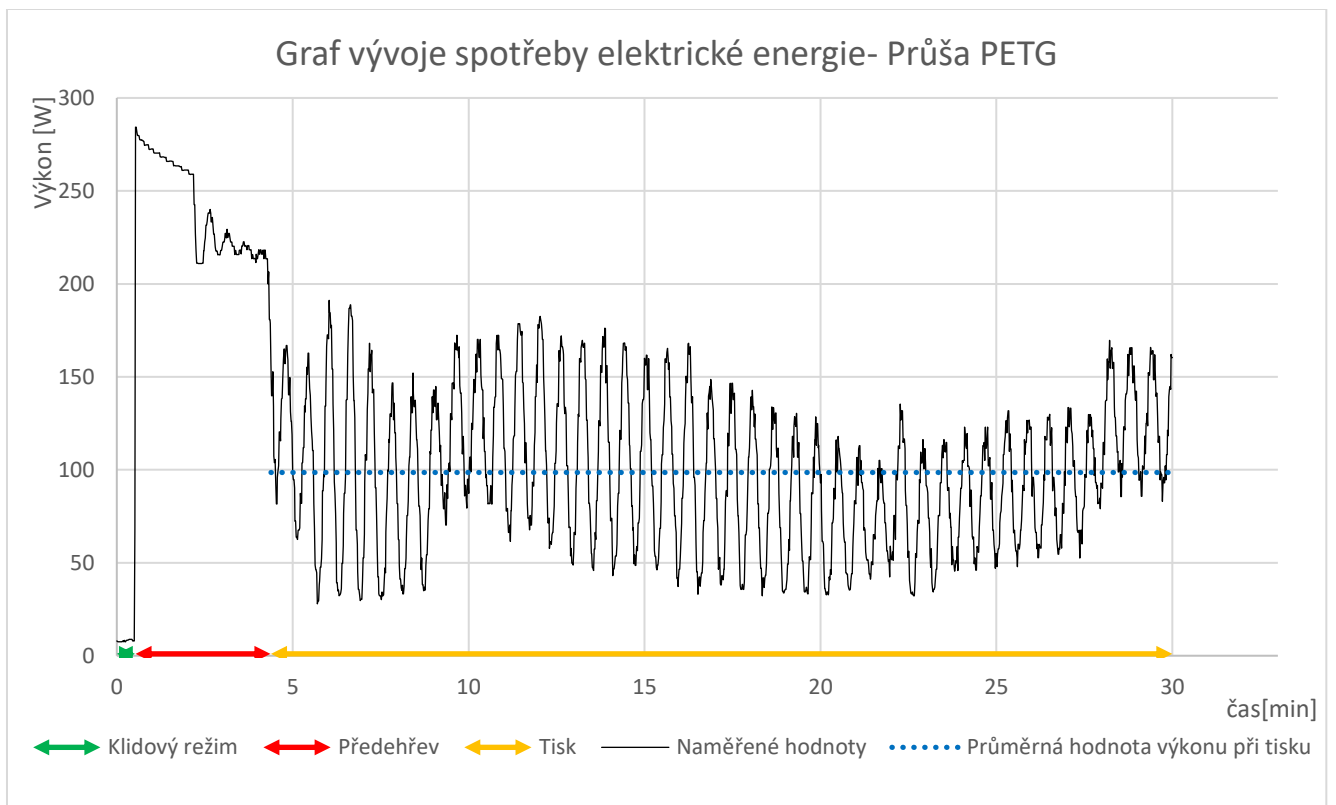
Graf 4 Vývoj spotřeby elektrické energie- Průša PLA



Graf 5 Vývoj spotřeby elektrické energie- Průša ASA



Graf 6 Vývoj spotřeby elektrické energie- Průša PETG



Tabulka 12 Nastavené hodnoty teploty materiálu v grafech vývoje spotřeby

Tisková struna	Teplota trysky	Teplota podložky
PETG	240 °C	90 °C
PLA	220 °C	60 °C
ASA	265 °C	110 °C

Z naměřených grafů spotřeby je patrný rozdíl v odbírané energii. V klidovém režimu se spotřeba energie různých tiskových materiálů neliší. Ke změně ovšem dochází ve fázi předehřevu, kdy se zahřívá podložka a tryska. Fázi předehřevu určil autor v grafu spotřeby materiálu, jako rozmezí mezi dosažením maximálního výkonu a prvním dosažením poloviční hodnoty maximální spotřeby. V grafech Graf 4 a Graf 5 je možné vyzorovat, že při zahřívání na vyšší teploty zdatně roste potřebný čas k předehřevu. V případě PLA se jednalo o 2-3 minuty a u ASA dosahoval potřebný čas na předehřev 7-8 minut. Po fázi předehřevu probíhal tisk výrobků z příslušného materiálu. Zde autor určoval průměrnou hodnotu výkonu pro výpočty nákladů na elektrickou energii v ekonomickém modelu. Na grafech je rovněž vidět průběh spínání zdroje 3D tiskárny.

K měření příkonu byl použitý speciální měřák měřící procházený výkon měřícím mezičlánkem mezi přívodem elektrické energie 3D tiskárny a zásuvkou. Omezení měřáku, které mohlo vést k chybě, byla perioda zaznamenávání vzorků. Periodou byla 1s, protože měřicí přístroj nenabízela nižší periodu. Naměřená data pro orientační měření, ale pro získání dat na návrh větší výroby by byla nedostatečná.

4.3. Kalkulace pro reálný výrobek

Autor pro vytvoření kalkulace na porovnání 3D tisku FDM metodou s tradiční vstřikolisovou metodou vybral krabičku z velkoobchodu s elektrotechnikou. Tato krabička byla vybrána z důvodu, že se jedná o často dokupovaný díl u řady menších podniků. Navíc vybraná krabička patří mezi typicky vyráběné produkty vstřikolisovou metodou. Kalkulace ukáže, jak si vede výroba 3D tiskem s použitím FDM metody, vůči vstřikolisové výrobě, která je ve výhodě vyplývající z charakteru výrobku. Je možné najít extrémní případy malých vyráběných sérií s obtížnými tvary, ale pak by si nejednalo o férové a vypovídající srovnání.

Porovnávaná krabička má označení MASZCZYK KM-26N BK [viz*]. Rozměry krabičky jsou X: 57mm; Y: 90mm; Z: 24mm z ABS v černé barvě. Krabička je určena pro řídicí, spojovací a transformační součástky. Krabička má hmotnost brutto 37,68g a při nákupu ve větším množství stojí 32,19 Kč bez DPH.



Obrázek 32 Foto krabičky pro ekonomický model (převzato z [*])

* https://www.tme.eu/cz/details/km-26n_bk/univerzalni-krabicky/maszczyk/km-26n-bk/

4.3.1. Tiskové parametry

K vytvoření kalkulace je nejprve potřeba zjistit tiskové možnosti tiskárny a parametry výrobku. Z těchto parametrů jsou dopočítány, případně rozpočítány všechny náklady v kalkulaci. Autor provedl výpočty pro dvě různá výrobní rozložení. Pro obě varianty platí, že tiskárna může tisknout i po konci směny a výrobky jsou vyzvednuty další den.

V prvním případě byl tištěn vždy jen jeden díl. Tisk krabičky trval 3 hodiny a tisk víčka trval 1 hodinu a 45 minut. Režim tisku byl následující, první den se tisknula sekvence: *krabička, krabička, víčko, krabička*. Druhý den se tisknula sekvence: *víčko, víčko, víčko, krabička*. V průměru byly vyrobeny 2 komplety za den. Tento režim má tu výhodu, že v případě chyby v průběhu tisku je znehodnocen pouze jeden díl. Dále probíhá tisk nejrychleji ze všech ostatních variant, a tedy má nejnižší průměrnou spotřebu elektrické energie na jeden výrobek. Největší nevýhodou tohoto výrobního režimu je častější obsluha tiskárny. Časté obsluhování 3D tiskárny v určitých časech, podle ukončení tisku, má negativní vliv na rozvržení zbývajících pracovního času obsluhy tiskárny. V případě této kalkulace je tiskárna obsluhována čtyřikrát v průběhu jedné směny. Při obsluze tiskárny musí pracovník dojít k tiskárně sundat z podložky hotové výrobky a spustit další tisk, celý úkon netrvá déle, jak 10 minut, a proto i je náklad na práci obsluhy stanoven na 250Kč.

V druhé variantě byla tištěna vždy čtveřice víček, nebo krabiček. Tisk čtveřice krabiček trval 15hodin a 24minut, tisk čtveřice víček trval 7hodiny a 45minut. Z těchto časů je patrné, že se značně navýšil průměrný tiskový čas krabičky a víčka. Nicméně byl zefektivněn režim tisku, kdy je možné na začátku směny spustit tisk čtveřice víček a na konci směny spustit tisk čtveřice krabiček. V průměru jsou vytištěny 4 komplety a obsluha musí řídit tisk pouze na začátku a konci směny. Nevýhodou tohoto režimu je horší odhalení chyby při tisku, větší průměrné opotřebení tiskárny na díl a více spotřebované elektrické energie. Na druhé straně tento režim tisku je znatelně méně náročnější na obsluhu tiskárny. Pracovník spustí tisk při příchodu a odchodu do práce. Z tohoto důvodu byl stanoven náklad na práci obsluhy stanoven na 100Kč.

Na dalších stranách budou prezentovány tabulky popisující kalkulaci vybraných variant. Kompletní kalkulace s volitelnými parametry je přiložena v příloze na CD.

Tabulka 13 Tiskové parametry tisku

Tisk po jednom dílu		Tisk čtveřice dílů	
Tiskový čas- 1 krabička	3,00 h	Tiskový čas-4 krabičky	15,40 h
Tiskový čas- 1 víčko	1,75 h	Tiskový čas- 4 víčka	7,75 h
Průměrný počet vytištěných kompletů za den (1 směna)	2 ks	Průměrný počet vytištěných kompletů za den (1 směna)	4 ks
Celkový počet vytištěných kompletů za rok	480 ks	Celkový počet vytištěných kompletů za rok	960 ks
Celkový počet vytištěných kompletů za životnost	2880 ks	Celkový počet vytištěných kompletů za životnost	5760 ks
Celková doba tisku tiskárny za životnost	13680 h	Celková doba tisku tiskárny za životnost	33336 h

Tabulka 14 Spotřebovaný materiál na vytisknutí zvoleného výrobku

Tisková struna	Délka spotřebované struny	Hmotnost 1m struny	Spotřebovaný materiál na 1 komplet	Koeficient zmetkovosti
PETG	26,70 m	3,10g/m	82,77 g	1,15
PLA	26,70 m	3,07g/m	81,88 g	1,15
ASA	26,70 m	2,57g/m	68,53 g	1,05

Tabulka 15 Přehled spotřeby elektrické energie pro vybrané tiskové struny

Tisková struna	Průměrný příkon tiskárny	Spotřebovaná energie na rozeřev	Spotřebovaná energie na tisk- 1 komplet	Stanovená cena el. energie
PETG	62,86 W	15,45Wh	363,80 Wh	0,0056 Kč/Wh
PLA	98,56 W	5,78Wh	570,42 Wh	
ASA	139,41 W	28,49Wh	806,84 Wh	

4.4. Kompletní kalkulace

Tabulka 16 Investiční náklady pro diskont 0 % a 10 %

Investiční náklady (diskont 0 %)					Investiční náklady (diskont 10 %)				
Položka	Cena	Životnost	Anuita	Ekvivalentní roční částka	Položka	Cena	Životnost	Anuita	Ekvivalentní roční částka
3D tiskárna (Prusa i3 mk3)	16 520 Kč	6	0,167	2 753 Kč	3D tiskárna (Prusa i3 mk3)	16 520 Kč	6	0,230	3 793 Kč
Montáž 3D tiskárny	2 000 Kč	6	0,167	333 Kč	Montáž 3D tiskárny	2 000 Kč	6	0,230	459 Kč

Tabulka 17 Náklady na údržbu obou variant

Náklady na údržbu					
Položka	Cena	Počet výměn za životnost tiskárny (tisk po díle)	Průměrné roční náklady (tisk po díle)	Počet výměn za životnost tiskárny (tisk čtveřic)	Průměrné roční náklady (tisk čtveřic)
E3D V6 tryska	200 Kč	14	467 Kč	33	1 100 Kč
Trubička-hot end	20 Kč	14	47 Kč	33	110 Kč
Podložka	250 Kč	9	375 Kč	22	917 Kč
Vytříděný díl	50 Kč	6	50 Kč	6	50 Kč
Sada krokových motorků	4 000 Kč	0	0 Kč	1	667 Kč
Cena práce za údržbu	250 Kč	36	1 500 Kč	36	1 500 Kč

Tabulka 18 Tabulka odhadovaných nákladů na obsluhu 3D tiskárny

Náklad práce za směnu (tisk jednotlivých dílů)	250 Kč	Roční náklady na obsluhu výroby (tisk jednotlivých dílů)	60 000 Kč	Náklad práce za směnu (tisk čtveřic dílů)	100 Kč	Roční náklady na obsluhu výroby (tisk čtveřic dílů)	24 000 Kč
--	--------	--	-----------	---	--------	---	-----------

Tabulka 19 Variabilní tiskové náklady

Variabilní náklady tisku				
Tisková struna	Cena materiálu	Náklady na materiál	Celková spotřebovaná energie na tisk kompletu	Náklady na el. Energii
PETG	370 Kč/kg	25,36 Kč	314,04Wh	1,76 Kč
PLA	395 Kč/kg	27,07 Kč	473,94Wh	2,65 Kč
ASA	505 Kč/kg	34,61 Kč	690,69Wh	3,87 Kč

Tabulka 20 Citlivostní analýza nákladů výrobků z ASA

Citlivostní analýza celkových nákladů pro výrobek z ASA se započtenou zmetkovostí- varianta tisku po díle												
		Výše diskontu [%]										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Odměna obsluhy tiskárny za směnu [Kč]	0	47,28 Kč	47,34 Kč	47,39 Kč	47,45 Kč	47,51 Kč	47,57 Kč	47,62 Kč	47,68 Kč	47,75 Kč	47,81 Kč	47,87 Kč
	25	60,41 Kč	60,46 Kč	60,52 Kč	60,58 Kč	60,63 Kč	60,69 Kč	60,75 Kč	60,81 Kč	60,87 Kč	60,93 Kč	60,99 Kč
	50	73,53 Kč	73,59 Kč	73,64 Kč	73,70 Kč	73,76 Kč	73,82 Kč	73,87 Kč	73,93 Kč	74,00 Kč	74,06 Kč	74,12 Kč
	75	86,66 Kč	86,71 Kč	86,77 Kč	86,83 Kč	86,88 Kč	86,94 Kč	87,00 Kč	87,06 Kč	87,12 Kč	87,18 Kč	87,24 Kč
	100	99,78 Kč	99,84 Kč	99,89 Kč	99,95 Kč	100,01 Kč	100,07 Kč	100,12 Kč	100,18 Kč	100,25 Kč	100,31 Kč	100,37 Kč
	125	112,91 Kč	112,96 Kč	113,02 Kč	113,08 Kč	113,13 Kč	113,19 Kč	113,25 Kč	113,31 Kč	113,37 Kč	113,43 Kč	113,49 Kč
	150	126,03 Kč	126,09 Kč	126,14 Kč	126,20 Kč	126,26 Kč	126,32 Kč	126,37 Kč	126,43 Kč	126,50 Kč	126,56 Kč	126,62 Kč
	175	139,16 Kč	139,21 Kč	139,27 Kč	139,33 Kč	139,38 Kč	139,44 Kč	139,50 Kč	139,56 Kč	139,62 Kč	139,68 Kč	139,74 Kč
	200	152,28 Kč	152,34 Kč	152,39 Kč	152,45 Kč	152,51 Kč	152,57 Kč	152,62 Kč	152,68 Kč	152,75 Kč	152,81 Kč	152,87 Kč
	225	165,41 Kč	165,46 Kč	165,52 Kč	165,58 Kč	165,63 Kč	165,69 Kč	165,75 Kč	165,81 Kč	165,87 Kč	165,93 Kč	165,99 Kč
250	178,53 Kč	178,59 Kč	178,64 Kč	178,70 Kč	178,76 Kč	178,82 Kč	178,87 Kč	178,93 Kč	179,00 Kč	179,06 Kč	179,12 Kč	

Citlivostní analýza celkových nákladů pro výrobek z ASA se započtenou zmetkovostí-varianta tisku čtveřic

		Výše diskontu [%]										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Odměna obsluhy tiskárny za směnu [Kč]	0	46,78 Kč	46,80 Kč	46,83 Kč	46,86 Kč	46,89 Kč	46,92 Kč	46,95 Kč	46,98 Kč	47,01 Kč	47,04 Kč	47,07 Kč
	25	53,34 Kč	53,37 Kč	53,39 Kč	53,42 Kč	53,45 Kč	53,48 Kč	53,51 Kč	53,54 Kč	53,57 Kč	53,60 Kč	53,63 Kč
	50	59,90 Kč	59,93 Kč	59,96 Kč	59,98 Kč	60,01 Kč	60,04 Kč	60,07 Kč	60,10 Kč	60,13 Kč	60,16 Kč	60,19 Kč
	75	66,46 Kč	66,49 Kč	66,52 Kč	66,55 Kč	66,57 Kč	66,60 Kč	66,63 Kč	66,66 Kč	66,69 Kč	66,72 Kč	66,76 Kč
	100	73,03 Kč	73,05 Kč	73,08 Kč	73,11 Kč	73,14 Kč	73,17 Kč	73,20 Kč	73,23 Kč	73,26 Kč	73,29 Kč	73,32 Kč
	125	79,59 Kč	79,62 Kč	79,64 Kč	79,67 Kč	79,70 Kč	79,73 Kč	79,76 Kč	79,79 Kč	79,82 Kč	79,85 Kč	79,88 Kč
	150	86,15 Kč	86,18 Kč	86,21 Kč	86,23 Kč	86,26 Kč	86,29 Kč	86,32 Kč	86,35 Kč	86,38 Kč	86,41 Kč	86,44 Kč
	175	92,71 Kč	92,74 Kč	92,77 Kč	92,80 Kč	92,82 Kč	92,85 Kč	92,88 Kč	92,91 Kč	92,94 Kč	92,97 Kč	93,01 Kč
	200	99,28 Kč	99,30 Kč	99,33 Kč	99,36 Kč	99,39 Kč	99,42 Kč	99,45 Kč	99,48 Kč	99,51 Kč	99,54 Kč	99,57 Kč
	225	105,84 Kč	105,87 Kč	105,89 Kč	105,92 Kč	105,95 Kč	105,98 Kč	106,01 Kč	106,04 Kč	106,07 Kč	106,10 Kč	106,13 Kč
	250	112,40 Kč	112,43 Kč	112,46 Kč	112,48 Kč	112,51 Kč	112,54 Kč	112,57 Kč	112,60 Kč	112,63 Kč	112,66 Kč	112,69 Kč

Tabulka 21 Celkové náklady na výrobu výrobku-porovnání variant s a bez koeficientu zmetkovosti

Tisková struna	Celkové náklady bez zmetkovosti (tisk jednotlivých dílů)	Celkové náklady se zmetkovostí (tisk jednotlivých dílů)	Celkové náklady bez zmetkovosti (tisk čtveřic dílů)	Celkové náklady se zmetkovostí (tisk čtveřic dílů)
PETG	38,63 Kč	44,42 Kč	35,22 Kč	40,50 Kč
PLA	41,23 Kč	47,42 Kč	38,04 Kč	43,74 Kč
ASA	49,99 Kč	52,49 Kč	47,03 Kč	49,38 Kč

Na předchozích stranách uvádí autor tabulky se vstupními daty pro kalkulaci spolu s tabulkami tvořící kompletní kalkulaci pro vybraný výrobek. Nejprve jsou uvedeny tiskové parametry (viz *Tabulka 13*). Při porovnání varianty pro tisk po jednom dílu a varianty souběžného tisku čtyř dílů je patrné, že při souběžném tisku roste potřebný průměrný tiskový čas na díl. To má za následek, že je 3D tiskárna více opotřebována v průměru na tisk jednoho dílu a vzrůstají náklady na údržbu (viz *Tabulka 17*).

Pro výpočet spotřebovaného materiálu na tisk (viz *Tabulka 14*) autor musel zvážit definovanou délku tiskové struny u každého materiálu k určení koeficientu měrné hmotnosti struny. Autor si zvolil za definovanou délku 1 m. Z koeficientu měrné hmotnosti struny a údajů o délce spotřebované struny na tisk jednoho kompletu autor dopočítal spotřebovaný materiál při tisku. V této tabulce je i uveden dříve zmiňovaný koeficient zmetkovosti pro testované materiály.

Tabulka 15 slouží, jako přehled spotřeby elektrické energie při tisku daného materiálu. Ve sloupečku „*Spotřebovaná energie na tisk - 1 komplet*“, je uvedena průměrná spotřeba energie na jeden komplet v případě tisku dílů po čtveřicích.

Autor v práci uvedl kalkulaci investičních nákladů a následně ekvivalentní roční částky pro diskonty 0 % a 10 % (viz *Tabulka 16*). Při srovnání je patrné navýšení celkové ekvivalentní roční částky mezi variantami je přibližně o čtvrtinu. Po rozpočítání na vyrobené výrobky se jedná o navýšení nákladu v řádu korun na jeden komplet.

U nákladů na údržbu je rozdíl mezi variantami tisku znatelný (viz *Tabulka 17*), protože se zdvojnásobil počet vyrobených krabiček a navíc se zvýšil průměrný tiskový čas na komplet o více jak 20 %. Dokonce je zde i provedena výměna krokových motorků.

Tabulka 18 slouží k shrnutí odhadu pracovních nákladů, vycházejí z dříve uvedených předpokladů.

Variabilní náklady tisku, až na ohodnocení obsluhy jsou pro obě varianty téměř totožné. Jediný velmi malý rozdíl je v nákladech na elektrickou energii, kde rozdíl ani nedosahuje ani jedné koruny na jeden komplet. Přehled variabilních nákladů viz *Tabulka 19*.

Ke zhodnocení provedl autor citlivostní analýzu pro oba typy výroby u výrobku z materiálu ASA (viz *Tabulka 20*). Parametry analýzy byl zvolen diskont a výše odměny obsluhy 3D tiskárny. Citlivostní analýza jednoznačně potvrdila, že při ohodnocení obsluhy se jasně jeví ekonomicky lepší variantou souběžný tisk několika výrobků najednou. Ke stanovení nákladů na jeden komplet vycházel autor z dříve uvedené výše ohodnocení obsluhy a zvolil diskont 5 %. Tato výše diskontu se jeví reálně pro menší a střední podniky. Kalkulace navíc prokázala, že výše zvoleného diskontu nemá zdaleka tak velký vliv, jako cena materiálu a ohodnocení obsluhy. Pro souběžnou výrobu je stanoven celkový náklad na 73,17Kč a v případě výroby jednotlivých dílů je stanoven náklad na 178,82 Kč. Kdyby se ekonomický subjekt rozhodl koupit krabičku ve velkoobchodě s elektrotechnikou zaplatil by při nákupu většího počtu kusů za jednu krabičku 32,19 Kč. Na závěr je ovšem důležité zmínit, že toto ohodnocení obsluhy tiskárny je myšleno pro případ, kdy je k výrobě použita jen jedna tiskárna. V případě vyššího počtu tiskáren je předpokládáno, že náklady na obsluhu by znatelně klesly.

Tabulka 21 ilustruje rozdíl v nákladech mezi výpočtem celkových nákladů se započtením a bez započtení koeficientu zmetkovosti.

4.5. Porovnání tradičních způsobu výroby s FDM technologií 3D tisku

4.5.1. Výhody 3D tisku FDM metodou

3D tisk FDM metodou nabízí uživateli rozsáhlé možnosti snadné výroby od volby tvaru, až po výběr materiálu. Další z výhod 3D tisku je možnost výroby dutých odlehčených výrobků. Při použití speciální tiskové hlavy je možné mísit různé materiály, během výroby a tím snadno docílit originalita výrobku. Ať už se jedná o umístění loga za použití fluorescentní tiskové struny na výrobek, nebo posílení některých částí výrobku odolnějším materiálem. Mezi nepopíratelně největší výhody patří snadná a beznákladová změna výroby na jiný výrobek.

4.5.2. Nevýhody 3D tisku FDM metodou

Největšími nevýhodami 3D tisku je rychlost výroby a cena materiálu. Navíc zatím nebylo dosaženo automatizace výroby. V případě použití vyššího počtu 3D tiskáren se musí zkoumat a kompenzovat vlivy na síť, například pomocí filtru. 3D tisk vyrábí procentuálně více vadných výrobků než tradiční výrobní metody. V pravidelných časových intervalech je nutné provádět údržbu 3D tiskárny.

4.5.3. Výhody vstřikolisové výroby

Výhodou vstřikolisové výroby je rychlost a kvalita produkce výrobků. Dále výhodou vstřikolisové výroby oproti 3D tisku FDM metodou je cena výrobních materiálů, která je mnohanásobně nižší. Moderní vstřikolisové stroje dosahují vysoké automatizace a snadně se připojují do sériové výroby.

4.5.4. Nevýhody vstříkolisové výroby

Mezi nevýhody tradiční vstříkolisové výroby patří vysoké pořizovací náklady na vstříkolis a výrobní formu. Různorodost výroba je značně omezena limitacemi výrobní formy. Vstříkolis je používán pouze pro produkce velkého množství výrobků, kvůli dlouhé návratnosti na výrobní formu a vstříkolis. Výroba dutých a jen částečně vyplněných produktů je ve většině případů velmi obtížná a často i neuskutečnitelná.

4.5.5. Porovnání metod

Ze všech uvedených skutečností je možné dospět k závěru, že obě výrobní metody mají diametrálně odlišný výrobní koncept. Vstříkolisová výroba je vhodná pro produkci velkého množství výrobků, nejlépe jednoduchých tvarů. V případě složitějších tvarů je výrobní proces složitější a je nutné použít specializovaný stroj. Výrobní náklady takové produkce jsou velmi nízké. Výše pořizovacích nákladů lisu a tiskové formy, avšak omezuje přístup na trh menším subjektům zaměřených na malovýrobu.

3D tisk FDM metodou na druhé straně vyniká v produkci výrobků s náročnými tvary na výrobu. Pořizovací náklady 3D tiskárny jsou zlomkové oproti nákladům na vstříkolis, a proto jsou dostupné 3D tiskárny drtivě většině ekonomických subjektů. 3D tisk umožňuje snadnou úpravu produkovaného výrobku, což může být konkurenční výhodou na trhu pro menší subjekty.

Je možné konstatovat, že vstříkolisová výroba je vhodná pro vysoký objem výroby. Podobné výrobky vyrobené vstříkolisem obecně dosahují lepších mechanických a výrobních vlastností než výrobky vytištěné 3D tiskárnou. 3D tisk zase vyniká v malovýrobě a při navrhování aplikací na míru. 3D tisk je spíše vhodný na výrobu menších výrobků.

U metod byly porovnány spíše výrobní vlastnosti, protože náklady na stroje u tradiční výroby jsou silně závislé na typu výrobku a na celkovém objemu produkce, a proto nelze udělat obecné ekonomické provnání.

4.6. Zhodnocení ekonomické části

V této části bakalářské práce autor provedl ekonomické zhodnocení 3D tisku FDM metodou. Nejprve byly stanoveny investiční náklady, které byly následně převedeny do ekvivalentních ročních nákladů a rozpočítány do celkového počtu výrobků. Autor dále zjistil tiskové vlastnosti dvou variant přístupu k výrobě a z těch dopočítal variabilní složku nákladů vyráběného kompletu. Kromě toho bylo provedeno detailní měření spotřeby elektrické energie 3D tiskárnou pro tři různé materiály. Měřením byl potvrzen nestálý a velmi dynamicky se měnící odběr elektrické energie. V případě provozu většího počtu 3D tiskáren je nutné se odběrem elektrické energie zabývat, protože by mohl mít negativní vliv na rozvodnou síť.

Výsledky kalkulace jsou uvedeny v citlivostní analýze, která odhalila nečekaně velký vliv nákladů na obsluhu 3D tiskárny. V případě diskontu ukázala citlivostní analýze, že velikost diskontu má jen velmi malý vliv na celkový náklad vztažený na jeden výrobek. Z citlivostí analýzy je patrné, že i pro případ zanedbání diskontu a nákladů na obsluhu je výše nákladů 46,78 Kč vyšší než cena výrobku ve velkoobchodě. Velkoobchodní ceně 32,19 Kč za krabičku se žádná výrobní cena uvedená v citlivostní analýze nepřiblížila. Kalkulace potvrdila úvodní předpoklad, že pro velkovýrobu produktu jednoduchého tvaru se výrazně vyplatí použít tradičních výrobních metod, například vstříkolisová výroba.

Na druhou stranu kalkulace jednoznačně nevyvrátila výrobu 3D tiskem, ale upozornila na nutnost zvážení konkrétního použití. Pro menší ekonomické subjekty, které se budou snažit konkurovat netradičním, designovým vzhledem produktů v nízkých výrobních sériích, je 3D tisk jednou z vhodných variant. Jednoduchost změny používaného materiálu a vyráběného výrobku nabízí dnešním firmám možnost flexibilně reagovat na potřeby a přání zákazníka.

5. Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit 3D tisk FDM metodou, vytvořit porovnání různých tiskových strun a provést ekonomické zhodnocení FDM technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu.

První část práce je věnována FDM technologii a způsobu realizace 3D tisku. Poté je provedeno srovnání běžně používaných tiskových strun z hlediska jejich tiskových a mechanických vlastností. Tiskové struny jsou zde rozděleny do několika zvolených podskupin podle jejich charakteru. Všechna získaná data pro tuto kapitolu jsou zpracována do přehledné tabulky, která může sloužit k vhodnému výběru materiálu výrobku.

V další části se práce zabývá zkoumáním vybraných fyzikálních vlastností experimentálních tiskových strun s příměsí mědi. Při měření koeficientu tepelné vodivosti vzorků došel autor k závěru, že měřené vzorky mají nízký koeficient tepelné vodivosti, který je srovnatelný se základní materiálem. Možné vysvětlení tohoto chování je uvedeno v kapitole 3.1.5. Výsledkem měření elektrických vlastností je, že vytištěné vzorky mají vysoký elektrický odpor. Z naměřených mechanických vlastností plyne, že přidáním měděné příměsi se mechanické vlastnosti vzorku zhoršily. Zlom v používání by mohlo přinést zvýšení koncentrace mědi a změna nosného materiálu. Hlavní výstupy z měření ovšem udávají změřené parametry výtisků, s měděnými příměsemi.

V poslední části práce je za účelem ekonomického zhodnocení FDM technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu provedena kalkulace nákladů. Nejprve autor seznámil čtenáře se všemi skupinami uvažovaných nákladů pro vybranou variantu. Poté autor vytvořil kompletní ekonomickou kalkulaci s citlivostní analýzou pro reálně prodávaný výrobek a výsledky této kalkulace srovnal s cenou tohoto výrobku. V případě tohoto konkrétního výrobku by se výroba 3D tiskem nevyplatila. Na druhou stranu pro menší ekonomický subjekt, který by se snažil konkurovat netradičním a designovým provedením, je nepochybně 3D tisk jednou z možných variant, která je ekonomicky přijatelná. Právě jednoduchost změny použitého materiálu a vyráběného výrobku nabízí nutnou flexibilitu pro firmy, aby byly schopny reagovat na aktuální trendy na trhu.

6. Seznam grafů, tabulek, obrázků a rovnic

Obrázek 1 Schéma 3D tiskárny s vyznačenými osami pohybů krokových motorků (převzato z).....	15
Obrázek 2 Ukázka slicování 3D objektu ve slicer programu Slicer Prusa3D.....	16
Obrázek 3 Schéma FDM metody s popisky pro vybrané části uvnitř tiskové hlavy	17
Obrázek 4 Ilustrativní obrázek cívky s tiskovou strunou (převzato z)	18
Obrázek 5 Ukázka použití PVA při tisku modelu (převzato z).....	19
Obrázek 6 Ukázka široké variace dostupných tiskových strun (převzato z [8])	25
Obrázek 7 Vytisknutý vzorek z PLA pod mikroskopem	27
Obrázek 8 Měděná příměs pod mikroskopem	27
Obrázek 9 Struna C pod mikroskopem.....	27
Obrázek 10 Struna B pod mikroskopem.....	27
Obrázek 11 Struna D pod mikroskopem	27
Obrázek 12 Struna A pod mikroskopem.....	27
Obrázek 13 Snímek s označenými defekty tisku PLA	28
Obrázek 14 Ilustrace tepelného toku mezi teplejším a chladnějším prostředím.....	30
Obrázek 15 Schéma vzorku pro druhé vylepšené experimentální měření koeficientu tepelné vodivosti	32
Obrázek 16 Schéma vzorku pro první experimentální měření koeficientu tepelné vodivosti.....	32
Obrázek 17 Znázornění soustavy měrných bodů v měření koeficientu tepelné vodivosti	33
Obrázek 18 Horní pohled na FEM	33
Obrázek 19 Dolní pohled na FEM.....	33
Obrázek 20 Vyznačení porovnávaných řad matematického modelu.....	34
Obrázek 21 Snímek použitého vzorku pro tepelné měření.....	34
Obrázek 22 Snímek termokamery boční strany měřeného vzorku.....	34
Obrázek 23 Snímek termokamery zadní strany měřeného vzorku	34
Obrázek 24 Snímek termokamery vzorku z PLA.....	35
Obrázek 25 Snímek termokamery hliníkové vzorku.....	35
Obrázek 26 Ilustrativní model tepelného odporu výtisku.....	39
Obrázek 27 Blokové schéma měřícího přípravku pro měření objemové rezistivity	41
Obrázek 28 Testovací vzorky pro mechanickou zkoušku	44
Obrázek 29 Soustava pro měření mechanických vlastností.....	46
Obrázek 30 Modelová závislost $\sigma = f(\epsilon)$	47
Obrázek 31 $F = f(\epsilon)$ pro všechny měřené materiály	49
Obrázek 32 Foto krabičky pro ekonomický model (převzato z [*]).....	60
Tabulka 1 Přehled základních vlastností tiskových strun	24
Tabulka 2 Přehled měděných tiskových strun.....	26
Tabulka 3 Změřené hodnoty teploty pro tiskovou strunu D	35
Tabulka 4 určené hodnoty koeficientu tepelné vodivosti.....	37
Tabulka 5 Znamé hodnoty pro počítání elektrických veličin.....	42
Tabulka 6 Hodnoty objemového odporu a rezistivity pro testované vzorky	42
Tabulka 7 Naměřené a dopočítané mechanické vlastnosti.....	48
Tabulka 8 Ilustrační tabulka investičních nákladů kalkulace 3D tisku	53
Tabulka 9 Náklady na údržbu tiskárny	54
Tabulka 10 Údaje k výpočtu materiálových nákladů výrobku.....	56

Tabulka 11 Údaje k výpočtu energetických nákladů výrobku	57
Tabulka 12 Nastavené hodnoty teploty materiálu v grafech vývoje spotřeby	59
Tabulka 13 Tiskové parametry tisku.....	62
Tabulka 14 Spotřebovaný materiál na vytisknutí zvoleného výrobku	62
Tabulka 15 Přehled spotřeby elektrické energie pro vybrané tiskové struny.....	62
Tabulka 16 Investiční náklady pro diskont 0 % a 10 %	63
Tabulka 17 Náklady na údržbu obou variant.....	63
Tabulka 18 Tabulka odhadovaných nákladů na obsluhu 3D tiskárny	63
Tabulka 19 Variabilní tiskové náklady	64
Tabulka 20 Citlivostní analýza nákladů výrobků z ASA.....	64
Tabulka 21 Celkové náklady na výrobu výrobku-porovnání variant s a bez koeficientu zmetkovosti..	65
Rovnice 1) Součinitel tepelné vodivosti	30
Rovnice 2) Vektoru hustoty tepelného toku	30
Rovnice 3) Přenesené teplo pro ustálený stav	31
Rovnice 4) Rezistivita.....	40
Rovnice 5) Rezistivita vyjádřená pomocí objemového odporu.....	41
Rovnice 6) Pevnost v tahu	45
Rovnice 7) Napětí v tahu	45
Rovnice 8) Modul pružnosti v tahu	45
Rovnice 9) Relativní prodloužení.....	46
Rovnice 10) NPV	52
Rovnice 11) Anuita	53
Rovnice 12) RCF.....	53

7. Seznam příloh

Soubor	Obsah	Popis
Ekonomická kalkulace 3D tisku FDM metodou	<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomická kalkulace s volitelnými parametry • Ekonomické tabulky použité v této práci • Citlivostní analýza výrobku z ASA 	V tomto excelovém sešitu je čtenáři umožněno dosazením vstupních dat pro výrobek získat kalkulaci nákladů. Dále je součástí sešitu citlivostní analýza a přehled tabulek použitých v této práci.
Mechanická část zpracování + zdrojová data	<ul style="list-style-type: none"> • Tabulka zpracovaných dat pro mechanickou část této práce • Zdrojová data mechanické části 	Součástí toho excelového sešitu jsou zdrojová data mechanické části a jejich vyhodnocení.
Měření elektrická část- zpracované hodnoty	<ul style="list-style-type: none"> • Zpracované hodnoty elektrické části 	Jedná se o soubor pouze s výsledky měření a jejich zpracováním.
Spotřeba elektrické energie při 3D tisku	<ul style="list-style-type: none"> • Měření spotřeby 3D tiskárny pro různé materiály • Zdrojová data měření 	Zpracovaná zdrojová data z měření spotřeby elektrické energie 3D tiskárny pro různé materiály.
Tepelná část tabulka zpracovaných hodnot	<ul style="list-style-type: none"> • Tabulka odečtených hodnot ze snímků termokamery • Graf vývoje teploty pro jednotlivé pozice a řady • Vyhodnocení tepelné části • List pro srovnávání naměřených dat s daty matematického modelu 	Zpracování tepelné části se všemi odečtenými a stanovenými hodnotami, navíc obsahuje grafy vývoje teploty pro všechny pozice vzorků ze všech tiskových strun. Dále obsahuje pomocný list k určování koeficientu tepelné vodivosti porovnáním.

8. Zdroje

- [1] L. W. Kloski and N. Kloski, *Make: Getting Started with 3D Printing A Hand-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution*, 1st ed. San Francisco: Marker Media Inc, 2016.
- [2] C. Fonda, *Low-Cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development*. 2013.
- [3] S. Simpson, M. Schneider, A. Glow, and M. Madeo, “2019 Ultimate Guide to Digital Fabrication,” vol. 66, no. No. 66, p. 84, 2019.
- [4] J. T. Cantrell *et al.*, “Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 811–824, 2017.
- [5] D. R. Tobergte and S. Curtis, “3D printing handbook,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [6] R. Baguley, “3D Printing Materials: The Pros and Cons of Each Type.” [Online]. Available: <https://www.tomsguide.com/us/iphone-2019-rumors,news-28045.html>. [Accessed: 15-May-2019].
- [7] S. Rohringer, “3D Printer Filament Guide – All You Need to Know in 2019 | All3DP,” 2019. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [8] J. Arist, “3D Filament Guide.” [Online]. Available: <https://www.printermaterials.com/3d-filament-guide-everything-you-need-to-know-about-3d-printer-filament-pla-abs-petg-nylon/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [9] J. a kol Rada, *Elektrotepelná technika*. 1985.
- [10] John H. Lienhard IV and J. H. L. V, *A heat transfer*, 3rd ed., vol. 108, no. 1. 1986.
- [11] I. Anderson Materials Evaluation, “Differential Scanning Calorimetry (DSC) Thermal Analysis | Anderson Materials Evaluation, Inc.” [Online]. Available: <http://www.andersonmaterials.com/dsc.html#>. [Accessed: 15-May-2019].

- [12] W. M. Groenewoud, C. Material, T. Analysis, T. Analysis, X. Diffraction, and G. Tran-
 , “try Learn more about Differential Scanning Calorime- Differential Scanning
 Calorimetry.”
- [13] S. Mahmood, “Introduction to Eng . Materials : Selection of materials :”
- [14] G. Murray, *Introduction to Engineering Materials Behaviour, properties and selections*.
 1993.
- [15] I. Manual, “Model 6105 Resistivity Instruction Manual Adapter,” *Test*, no. October,
 1972.
- [16] I. Manual, S. Electrometer, C. Operating, and S. Information, “MODEL 602
 INSTRUCTION MANUAL Instruction Manual Model 602 Solid-State Electrometer
 Contains Operating and Servicing Information for the Model 602 Solid-State
 Electrometer,” no. 29111, 1963.
- [17] ASTM (D638-02a), “American Society for Testing and Materials. Standard test
 method for tensile properties of plastics (D 638 - 02a) - SCAN VERSION,” *Astm*, vol.
 08, pp. 46–58, 2003.
- [18] M. Synek, *Manažerská ekonomika*, 4th ed. Grada, 2007.
- [19] T. Cipra, *Praktický průvodce finanční a pojistnou matematikou*. Praha: Ekopress, 2005.
- [20] H. Fialová and J. Fiala, “EKONOMICKÝ SLOVNÍK,” in *EKONOMICKÝ SLOVNÍK s
 odborným výkladem česky a anglicky*, 3rd ed., Praha: A plus, 2014, p. 318.