

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Dominik Kostka

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Katedra polygrafie a fotofyziky

Tisk funkčních objektů pomocí 3D tiskových technologií
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominik Kostka**
Osobní číslo: **C21374**
Studijní program: **B0531A130014 Polygrafie**
Téma práce: **Tisk funkčních objektů pomocí 3D tiskových technologií**
Téma práce anglicky: **Functional structures printed by 3D printing techniques**
Zadávací katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši v odborné a patentové literatuře na téma 3D tisku, ve směru tisku funkčních struktur především pomocí FFF/FDM technologie.
2. Zpracujte danou rešerši do uceleného přehledu a uveďte jaké typy modifikací tiskových filamentů v souvislosti funkčními 3D strukturami se využívají.
3. Pro dané funkční filamenty vypracujte přehled, jaké typy plniv, polymerních matric, či modifikací strun se využívají.
4. Vypracujte ucelený přehled funkčních 3D struktur, které lze pomocí funkčních filamentů připravit.
5. Proveďte kritické zhodnocení dané problematiky.

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

Seznam doporučené literatury:

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

Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2025**

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 19. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Tisk funkčních objektů pomocí 3D tiskových technologií jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Pardubicích dne 1. 7. 2025

Dominik Kostka

Velice rád bych poděkoval panu doc. Ing. Tomáši Syrovému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a za velký zájem o spolupráci na mé bakalářské práci.

Dále bych rád poděkoval spolužákům, rodině, a především mé přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Vzhledem k rostoucím možnostem 3D tisku se tato technologie stává významným nástrojem pro prototypování a výrobu funkčních objektů. Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku 3D tisku funkčních struktur s využitím FDM tiskové technologie a speciálních filamentů. Teoretická část shrnuje principy 3D tisku, charakteristiku funkčních objektů a přehled využívaných materiálů. Experimentální část se zaměřuje na vliv výplně tištěných objektů na jejich elektrický odpor.

Klíčová slova

3D tisk, FDM technologie, funkční objekty, vodivé filamenty, kompozitní materiály, elektrická vodivost

Title

Printing functional objects using 3D printing technologies

Annotation

Given the growing capabilities of 3D printing, this technology is becoming an important tool for prototyping and the production of functional objects. This bachelor thesis focuses on the topic of 3D printing functional structures using FDM printing technology and special filaments. The theoretical part summarizes the principles of 3D printing, the characteristics of functional objects, and an overview of the materials used. The experimental part focuses on the influence of infill on the electrical resistance of printed objects.

Keywords

3D printing, FDM technology, functional objects, conductive filaments, composite materials, electrical conductivity

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	15
SEZNAM TABULEK	17
SEZNAM GRAFŮ	19
ÚVOD.....	21
1 Teoretická část.....	22
1.1 Úvod do 3D tisku.....	22
1.1.1 Charakterizace 3D tisku.....	22
1.1.2 Úvod do 3D tisku funkčních objektů.....	23
1.1.3 Historie a vývoj 3D tisku.....	23
1.1.3.1 Hnutí RepPap	24
1.1.3.2 Crowdfunding	25
1.1.3.3 Maker movement	25
1.2 Technologie 3D tisku.....	26
1.2.1 Přehled hlavních technologií 3D tisku.....	26
1.2.1.1 Material Extrusion	26
1.2.1.2 Vat Photopolymerization.....	27
1.2.1.3 Material Jetting (MJ)	28
1.2.1.4 Binder Jetting (BJ)	29
1.2.1.5 Powder Bed Fusion.....	30
1.2.1.6 Direct Energy Deposition (DED).....	30
1.2.1.7 Sheet Lamination (SHL).....	31
1.3 Podrobný popis FDM technologie	33
1.3.1 Princip fungování FDM technologie	33
1.3.2 Základní komponenty FDM tiskárny	34
1.3.2.1 Typy extruderů a jejich vliv na tisk.....	35
1.3.3 Faktory ovlivňující kvalitu tisku.....	36
1.3.4 Vícemateriálový tisk pomocí FDM	38
1.4 Materiály pro FDM tisk funkčních struktur.....	39

1.4.1	Vodivé a kompozitní filamenty.....	39
1.4.1.1	Kompozity s částicovou výztuží.....	39
1.4.1.2	Kompozity s krátkými vlákny.....	40
1.4.1.3	Kompozity s kontinuálními vlákny.....	40
1.4.2	Plniva do vodivých filamentů.....	41
1.4.2.1	Uhlíková čern (CB).....	41
1.4.2.2	Uhlíková vlákna (CF)	41
1.4.2.3	Uhlíkové nanotrubičky (CNT).....	41
1.4.2.4	Grafen	42
1.4.2.5	Kovové částice (Cu, Ag, Au)	42
1.4.3	Polymery vhodné pro elektricky vodivé kompozity.....	43
1.4.3.1	PLA (Polylactic Acid).....	43
1.4.3.2	TPU (Thermoplastic Polyurethane)	43
1.4.3.3	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	43
1.4.3.4	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)	44
1.5	Vlastnosti elektricky vodivých filamentů.....	44
1.5.1	Základní elektrické veličiny:	44
1.5.2	Vliv infillu na elektrickou vodivost.....	45
1.5.3	Metody měření elektrického odporu a faktory ovlivňující jeho přesnost.....	45
1.6	Aplikace elektricky vodivého FDM tisku.....	45
1.6.1	Využití v elektronice a průmyslu	46
1.6.2	Senzory	46
1.6.2.1	Tenzometry a tlakové senzory	46
1.6.2.2	Kapacitní senzory	49
1.6.2.3	Akcelerometry a Teplotní senzory	50
1.6.3	3D tištěné struktury pro generování energie.....	52
1.6.3.1	3D tištěné struktury pro palivové články	52
1.6.3.2	3D tisk piezoelektrických struktur.....	53

1.6.3.3	3D tisk akumulátorů.....	54
1.6.4	Nositelné technologie a funkční struktury	55
	Flexibilní materiály.....	55
1.6.4.1	Vat Photopolymerization.....	55
1.6.4.2	Integrované spoje a funkční struktury.....	56
1.7	Výzvy a perspektivy	56
1.7.1	Technologické limity (adheze, homogenita vodivosti, přesnost)	56
1.7.2	•Budoucí vývoj (inovace materiálů, tiskové techniky, sériová výroba)	58
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	61
2.1	Příprava tiskových dat.....	61
2.2	Tisk testovacích těles.....	64
2.2.1	Kontrolní tisk pomocí nevodivého filamentu	64
2.2.2	Tisk pomocí vodivého filamentu Proto-pasta Conductive PLA	71
2.2.3	Srovnání hmotností výtisků z filamentu Proto-pasta a nevodivého filamentu	78
2.3	Měření elektrického odporu.....	81
2.3.1	Příprava testovacích těles na měření	81
2.3.2	Měření elektrického odporu multimetrem Hioki DT4282.....	81
3	DISKUZE.....	88
3.1	Tisk pomocí nevodivého PLA	88
3.2	Tisk pomocí vodivého filamentu Proto-pasta PLA.....	88
3.3	Srovnání hmotnosti výtisků zhotovených pomocí vodivého a nevodivého filamentu.	88
3.4	Měření elektrického odporu testovacích těles vtištěných pomocí filamentu Protoplant PLA	89
4	Závěr.....	91
5	Seznam použité literatury:	92

SEZNAM ZKRATEK

1D FSCs	Jednorozměrné flexibilní superkondenzátory
2PP	Dvou-fotonová polymerace
3D tisk	Aditivní výroba
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
Ag	Stříbro
AI	Umělá inteligence
Al₂O₃	Oxid hlinitý
ASTM	American Society for Testing and Materials
Au	Zlato
b-FDM	Blended FDM
BJ	Binder Jetting
BST/ABS	Baryum Stroncium Titanát/Akrylonitrilbutadienstyren
CB	Uhlíková čern
CF	Uhlíková vlákna
CNC	Computer Numerical Control
CNT	Uhlíkové nanotrubičky
Cu	Měď
DED	Direct Energy Deposition
DIW	Direct Ink Writing
DLP	Digital Light Processing
DM filamenty	Digitální materiálové filamenty
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop on Demand

EB-DED	Electron Beam Direct Energy Deposition
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FSC	Flexibilní superkondenzátory
HA	Hydroxyapatit
I	Elektrický proud
ISO	Mezinárodní standardizační organizace
L-DED	Laser-Direct Energy Deposition
LBMD	Laserové nanášení kovů
LENS	Laserové inženýrské tvarování do čistého tvaru
LOM	Laminated Object Manufacturing
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
ML	Strojové učení / Machine Learning
MMMT FDM	Multi-material, multi-technology Fused Deposition Modeling
MWCNT	Vícestěnné nanotrubičky
NPs	Nanočástice
NPJ	NanoParticle Jetting
NWs	Nanodrátky
PA	Polyamid
PA-DED	Plasma Arc Direct Energy Deposition
PBAT	Polybutylen-adipát-ko-tereftalát
PEDOT:PPS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate

PEI	Polyetherimid
PETG	Polyethylentereftalát Glykol
PBF	Powder Bed Fusion
PJP	Plastic Jet Printing
PLA	Kyselina polymléčná
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluoretylen
PUR	Polyuretan
PVA	Polyvinyl Alkohol
R	Elektrický odpor
RepRap	Samoreplikující rychlý prototypovač
S/m	Siemens na metr
SDL	Selektivní depoziční laminace
SHL	Sheet Lamination
Si₃N₄	Nitrid křemíku
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language
SWCNT	Jednostěnné nanotrubičky
TPU	Termoplastický Polyuretan
U	Elektrické napětí
UAM	Ultrazvuková aditivní výroba
UV	Ultrafialové

WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
ZrO₂	Oxid zirkoničitý
Ω	Ohm
Ω×m	Ohmmetr
ρ	Měrný elektrický odpor
σ	Elektrická vodivost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Formativní, subtraktivní a aditivní výroba.....	22
Obrázek 2 – Material extrusion	27
Obrázek 3 – Vat Photopolymerization.....	28
Obrázek 4 – Material Jetting	29
Obrázek 5 – Binder Jetting	29
Obrázek 6 – Powder Bed Fusion	30
Obrázek 7 – Direct Energy Deposition.....	31
Obrázek 8 – Sheet lamination.....	33
Obrázek 9 – a) Ilustrace senzoru deformace se snímací oblastí $20 \times 1,6 \times 1,2$ mm s rukojeťmi, b) ilustrace filamentu TPU75 složeného z TP a CPLA (Conductive PLA).....	47
Obrázek 10 – Elementy typu A a B tlakového senzoru	49
Obrázek 11 – a) Ilustrace strukturálních rozdílů kontaktního prvku B a všech tvarů výplně senzorů b) Vzhled výsledných senzorů	49
Obrázek 12 – Schéma principu fungování kapacitního tlakového senzoru	50
Obrázek 13 – SEM snímek struktury 3D tištěného akcelerometru	51
Obrázek 14 – Struktura palivového článku inspirovaného strukturou plic	53
Obrázek 15 – 3D tisk piezoelektrických materiálů s vysokým rozlišením pomocí DLP s možností změny elektrických vlastností v závislosti na směru	54
Obrázek 16 – Schematické znázornění procesu syntézy a nano-, mikro- a makroporozity.....	
Obrázek 17 – Rozměry zkušebního tělesa.....	61
Obrázek 18 – Návrh modelu v programu Autodesk 3ds Max	61
Obrázek 19 – Typy infillu: a) Přímočarý, b) Zarovnaný přímočarý, c) Mřížka, d)Trojúhelníky, e) Hvězdy, f) Kubický, g) Čára, h) Koncentrický, i) Plástev, j) 3D Plástev,	

k) Gyroid, l) Hilbertova Křivka, m) Archimedean chords, n) Octagram spiral, o) Kubický adaptivní, p) Lightning	62
Obrázek 20 – Zkušební tělesa s mřížkovým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %.....	63
Obrázek 21 – Zkušební tělesa s kubickým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %.....	63
Obrázek 22 – Zkušební tělesa s infillem typu Hvězda: a) 5–40 %, b) 50–90 %.....	63
Obrázek 23 – Zkušební tělesa s koncentrickým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %	63
Obrázek 24 – Testovací těleso s nastavením násobiče extruze	64
Obrázek 25 – Fotografie testovacích těles vytištěných pomocí nevodivého filamentu	71
Obrázek 26 – Testovací tělesa v sušárně	81

Pro účely této práce byly obrázky 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12 graficky upraveny – byl přeložen do českého jazyka.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s různými typy infillu při podílu výplně 50 %.....	65
Tabulka 2 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s mřížkovým infillem	66
Tabulka 3 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s kubickým infillem	67
Tabulka 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s infillem typu hvězda.....	68
Tabulka 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s koncentrickým infillem	69
Tabulka 6 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)	70
Tabulka 7 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %	72
Tabulka 8 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovou výplní.....	73
Tabulka 9 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickou výplní.....	74
Tabulka 10 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s výplní typu hvězda	75
Tabulka 11 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickou výplní.....	76
Tabulka 12 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)	77
Tabulka 13 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %.....	82
Tabulka 14 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovou výplní.....	83
Tabulka 15 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickou výplní	84

Tabulka 16 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s výplní typu hvězda.....	85
Tabulka 17 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickou výplní	86
Tabulka 18 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infil).....	87

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s různými typy infillu při podílu výplně 50 %.....	65
Graf 2 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s mřížkovým infillem.....	66
Graf 3 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s kubickým infillem	67
Graf 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s infillem typu hvězda.....	68
Graf 5 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s koncentrickým infillem	69
Graf 6 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill).....	70
Graf 7 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %.....	72
Graf 8 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovým infillem	73
Graf 9 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickým infillem	74
Graf 10 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s infillem typu hvězda	75
Graf 11 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickým infillem.....	76
Graf 12 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)	77
Graf 13 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %	78
Graf 14 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s mřížkovým infillem.....	78
Graf 15 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s kubickým infillem	79

Graf 16 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s infillem typu hvězda.....	79
Graf 17 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s koncentrickým infillem	80
Graf 18 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill).....	80
Graf 19 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %	82
Graf 20 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovým infillem.....	83
Graf 21 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickým infillem	84
Graf 22 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s infillem typu hvězda.....	85
Graf 23 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickým infillem	86
Graf 24 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill).....	87

ÚVOD

3D tisk, známý také jako aditivní výroba se v posledních letech stal jednou z nejrychleji rozvíjejících se výrobních technologií. Na rozdíl od konvenčních formativních a subtraktivních technologií umožňuje vytvářet komplexní objekty vrstvu po vrstvě přímo z digitálního modelu, díky čemuž jsme schopni výrazně snížit množství odpadu a náklady na výrobu forem. 3D tisk se uplatňuje v prototypování a stále častěji i v sériové výrobě.

Rychlý vývoj 3D tisku umožnil tisk funkčních objektů, které mohou mimo mechanických vlastností plnit i specifické elektrické, chemické, a dokonce i biologické funkce. Mezi funkční objekty řadíme například nositelnou elektroniku, implantáty, integrované senzory a další funkční součástky. Důležitou roli v 3D tisku funkčních objektů představují nové materiály. Vzhledem k FDM tisku to jsou zejména kompozitní a vodivé filameny, které rozšiřují jeho možnosti.

Cílem této bakalářské práce je popsat problematiku 3D funkčních objektů se zaměřením především na technologii FDM. Teoretická část této práce poskytuje přehled základních principů 3D tisku, charakteristiku funkčních objektů, přehled používaných materiálů, možnost aplikací a predikci budoucího vývoje.

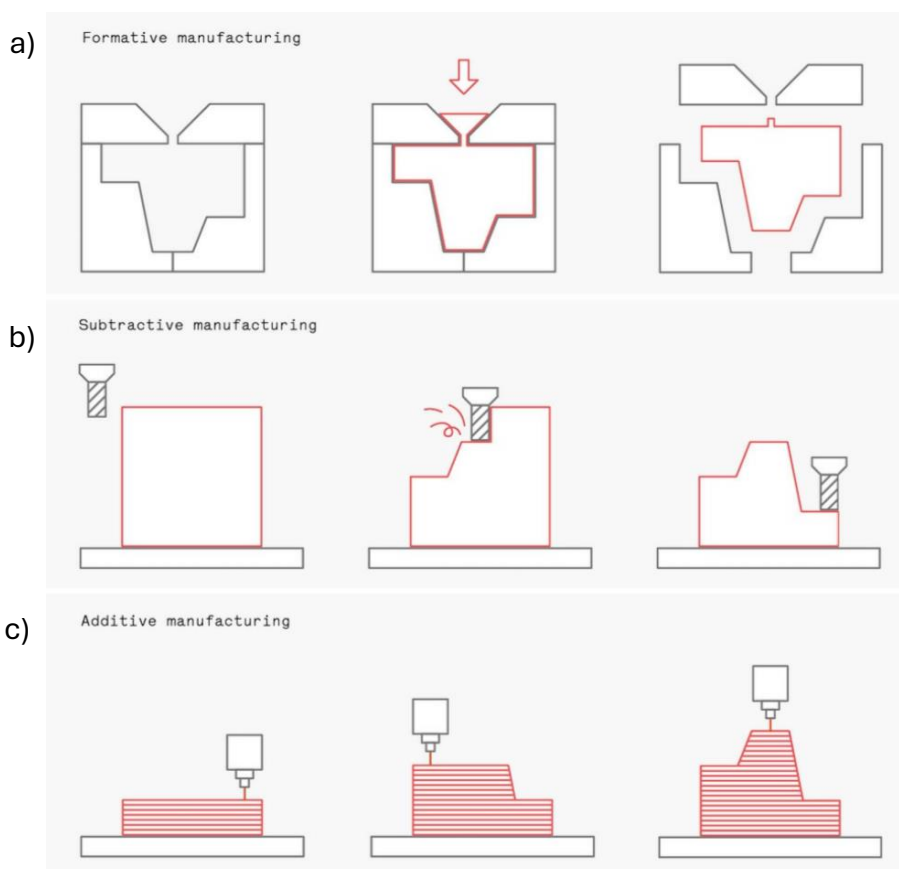
Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na zkoumání vlivu typu a množství výplně tištěných vzorků na jejich elektrický odpor.

1 Teoretická část

1.1 Úvod do 3D tisku

1.1.1 Charakterizace 3D tisku

Jedná se o aditivní způsob tvorby 3D objektů, což znamená, že se materiál přidává vrstvu po vrstvě, podle digitálního modelu a postupně vzniká trojrozměrný model. Na rozdíl od subtraktivních a formativních metod. Příkladem subtraktivní výroby je soustružení pomocí CNC strojů, kde se z většího kusu materiálu postupným odstraňováním materiálu formuje trojrozměrný objekt. Tento způsob je neefektivní vzhledem k množství produkovaného odpadu. Při formativním způsobu výroby se využívá předem vytvořená forma a samotný objekt vzniká vyplněním formy materiálem v tekuté formě a následným zatuhnutím, nebo vytvrzením tohoto materiálu. Vzhledem k nutnosti výroby formy, která je často nákladná, se tato technologie hodí až pro výrobu velkých množství těchto produktů. [1]



Obrázek 1 – a) Formativní výroba, b) Subtraktivní výroba, c) Aditivní výroba [1]

3D tisk je výjimečný v tom, že model vzniká přímo, bez tvorby většího množství odpadu, nebo vysokých nákladů na tvorbu forem. Díky tomu je možné pomocí 3D tisku tvořit objekty i v malých nákladech, anebo i jako jednotlivé objekty. Další velkou výhodou je jeho variabilita. Tím, že se tiskne přímo z digitálních dat je možná personalizace, nebo různé úpravy u každého kusu. V dnešní době už existuje několik způsobů 3D tisku, jako je například FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing), SLS (Selective Laser Sintering), Binder Jetting a několik dalších. Některé z těchto typů si rozebereme dále v této Bakalářské práci.

1.1.2 Úvod do 3D tisku funkčních objektů

Funkční objekty vzhledem k 3D tisku můžeme charakterizovat jako tištěné objekty, které neplní jenom estetický, nebo vizuální účel, ale plní specifickou funkci. Může se jednat o funkční součástky, jako jsou například ozubená kola, šrouby, ložiska a další obdobné objekty, které podléhají mechanickému namáhání. Dále se může jednat o objekty jejichž celek/části mají specifické elektrické charakteristiky. Mezi tyto objekty můžeme řadit například tištěné senzory, nositelnou elektroniku, antény a elektrody. Další důležitá skupina funkčních objektů jsou objekty s biologickou funkcí pro výrobu implantátů, protéz, bioaktivních materiálů a dalších objektů pro využití v oblasti medicíny. Jako funkční objekty se ale také rozumí objekty, které mají specifickou tepelnou, nebo chemickou odolnost pro jejich schopnost odolávat extrémním podmínkám.

1.1.3 Historie a vývoj 3D tisku

Technologie 3D tisku vznikla v 80. letech 20. století a byla využívána pro rapid prototyping neboli rychlou výrobu prototypů. V posledních letech se ale 3D tisk ubírá spíše směrem k plnohodnotné výrobní metodě, která umožní dostupnou produkci kompletních výrobků, nebo jejich součástí.

Počátky 3D tiskáren se připisují Charlesi W. (Chuckovi) Hullovi, který v roce 1984 vyvinul první funkční robotickou 3D tiskárnu, která fungovala na principu SLA. Ta byla v roce 1989 komercializována společností 3D Systems. Další ranné práce probíhaly na MIT (Massachusetts Institute of Technology) a na Texaské univerzitě.

Na začátku 90. let vznikala spousta patentů na různé systémy, na bázi práškového materiálu. V těchto systémech se velmi přesně nanáší pojivo na povrch prášku v nádobě s pohyblivou

platformou, která se po nanesení jedné vrstvy pojiva posouvá dolů, a takto vzniká po vrstvách 3D objekt. Alternativně k pojivu se k fúzi prášku používán laser. Tyto patenty na SLS se staly základem společnosti Z Corp, což byla jedna z prvních firem, které vyráběly velké průmyslové 3D tiskárny. Nyní je Z Corp součástí společnosti 3D Systems.

V roce 1989 si S. Scott a Lisa Crump nechali patentovat metodu FDM (Fused Deposition Modeling). Později spoluzaložili firmu na výrobu 3D tiskáren Stratasys. Po vypršení klíčových patentů v roce 2005 se tato technologie stala základem pro hnutí RepRap. [2]

1.1.3.1 Hnutí RepRap

Po vypršení klíčových patentů na FDM, vymyslel Adrian Bowyer (University of Bath), že je možné vytvořit 3D tiskárnu schopnou vytvářet součástky pro další tiskárny. Projekt RepRap byl spuštěn v roce 2007 v jeho prvním modelu „Darwin“ a později v roce 2009 druhý model „Mendel“. Oba modely byly open-source, takže soubory byly volně přístupné online a uživatelé mohli tiskárny různě upravovat a vylepšovat. V roce 2010 Josef Průša zjednodušil design Mendelu (Prusa Mendel) a zajistil tak rychlejší vývoj tiskáren. Ze sdílení návrhů se postupně přešlo k prodeji stavebnic, jako například MakerBot Cupcake CNC (2009) nebo MakerBot Thing-O-Matic (2010). MakerBot se stal jednou z prvních komerčních firem a v roce 2013 byl odkoupen firmou Stratasys. [2]

RepRap by se dal charakterizovat jako první univerzální samoreplikující výrobní stroj lidstva. Díky tomu, že je hodně částí RepRap 3D tiskáren vyrobeno z plastu, je možné je vytisknout na jiné 3D tiskárně a vytvořit si „stavebnici“ a složit si další RepRap tiskárnu.

Cílem RepRap je tedy výroba samoreplikujících se strojů a jejich volné zpřístupnění široké veřejnosti. RepRap byl první nízkonákladovou 3D tiskárnou a projekt odstartoval revoluci v open-source 3D tisku. RepRap se díky tomu stal nejrozšířenější 3D tiskárnou v globální „Maker Community“. V současné době je vývoj RepRapu zastoupen projekty Mulbot a ReprapMJ. [3] Okolo roku 2009 se vývoj 3D tiskáren rozdělil do dvou směrů. Open-source tiskárny pro komunitní vývoj, jako je například RepRap, a na druhé straně velké průmyslové tiskárny.

1.1.3.2 Crowdfunding

Dalším důležitým milníkem ve vývoji 3D tisku, bylo založení crowdfundingové platformy Kickstarter, která umožňovala financování nových projektů širší veřejností. 3D tisk byl pro tento typ financování ideální oblast pro crowdfunding, protože jejich cíl je jasně definovaný. V roce 2012 získala STL tiskárna Form 1 skrze Kickstarter téměř 3 miliony dolarů. V průběhu dalších let získala financování až v milionových částkách i řada dalších tiskáren. Mimo samotné tiskárny se na Kickstarteru začaly objevovat i projekty zaměřené na tisk specifických předmětů a technologií následného zpracování. Crowdfunding má bohužel i negativní stránku. Tou je, že proveditelnost projektů často není nijak ověřena, a tak se může stát, že slíbené projekty nevzniknou ve smluveném termínu, nebo nevzniknou vůbec.

Vlivem vzestupu crowdfundingu a končících patentů na 3D tisk se vytvořil prostor i pro malé inovátory, kteří takto mohli dostat 3D tiskárny a související výrobky širšímu publiku i s velmi malým kapitálem. Klíčovými faktory ve vývoji bylo i rozšíření mikrokontroléru Arduino a spuštění platformy GitHub. Mikrokontrolér Arduino byl představen v roce 2005. Přestože byl původně navržen pro studenty a hobby projekty, tak se osvědčil jako ideální řídicí jednotka pro 3D tiskárny díky nízkým nákladům a otevřenému ekosystému. V roce 2008 byla spuštěna platforma pro sdílení open-source kódu GitHub. Ten umožnil snadnější spolupráci a vývoj softwaru, což vedlo k rychlejšímu vývoji open-source 3D tiskových projektů.

Tiskárna Bukito je jeden z příkladů úspěšného vývoje za pomoci crowdfundingu. Vznikla na základě modelu RepRap Wallace. Návrhář této tiskárny Rich Cameron zveřejnil její plány zdarma na webu RepRap, a následně se po získání financování na Kickstarteru začaly tiskárny Bukito prodávat ve formě stavebnice.

Dnes existuje řada firem zabývajících se 3D tiskem. Velké firmy jako je například Stratasys a 3D systems, ale i menší startupy. Některé firmy se snaží udržet co nejvíce otevřený přístup, zatímco některé začaly s open-source modelem a později přešly na proprietární systémy. [2]

1.1.3.3 Maker movement

S příchodem mikrokontrolérů Arduino (2005), se začal zvyšovat zájem o DIY elektroniku, což vedlo k prvnímu Maker Faire. Konal se v roce 2006 v Kalifornii a jednalo se o akci, kde amatéři i profesionálové prezentovali své výtvary, sdíleli své znalosti v oblasti DIY projektů, technologií a řemesel. Kvůli úspěchu následovaly i další ročníky.

3D tisk hrál na těchto akcích významnou roli a byl hojně zastoupen. 3D tisk se do jisté míry vyvíjel spolu s tímto hnutím. Na Maker Faire bývá k vidění spousta 3D tiskáren a jejich různých aplikací. Výhodou těchto akcí je, že se nadšenci osobně setkávají, vyměňují si své zkušenosti, nápady a techniky, čímž doplňují neustálou online spolupráci a tím dále posunují vývoj 3D tisku. [2]

V dnešní době se 3D tiskem zpracovává široká škála materiálů, jako například: termoplasty, kovy, různé kovové slitiny, keramika, biomateriály, a dokonce i potraviny.

1.2 Technologie 3D tisku

3D tisk zahrnuje různé aditivní výrobní technologie, které se liší jak nanášením, tak i spojováním materiálu.

1.2.1 Přehled hlavních technologií 3D tisku

Mezinárodní standardizační organizace ISO a ASTM (American Society for Testing and Materials) stanovily v roce 2015 normu ISO/ASTM 52900, která rozděluje 3D tisk do sedmi hlavních technologických principů:

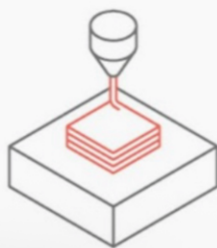
1.2.1.1 Material Extrusion

Tento technologický princip se zakládá na vytlačování polotekutého materiálu skrze trysku, a tím vytváří jednotlivé vrstvy tištěného objektu. Ideálními a také nejčastěji využívanými materiály jsou termoplasty, jako je například PLA, ABS a nylon. Materiál je do tiskové hlavy zaváděn ve formě pevného vlákna (filamentu), který se při průchodu tiskovou hlavou taví. Kromě samotných termoplastů se stále častěji využívají kompozitní materiály, které obsahují kovy, uhlíková vlákna nebo uhlíkové nanotrubičky. Zajímavé využití technologie extruze je tisk betonu, hlíny, nebo také potravin, kde už se nejedná o tisk taveniny, ale disperze pevných částic v kapalině.

Tato technologie byla vynalezena v roce 1988 Scottem Crumpem, který ji komerčně rozvíjel pod již dříve zmiňovanou firmou Stratasys. Crump ji patentoval pod názvem Fused Deposition Modelling (FDM). Aby nebyl patent porušen, ostatní firmy používají označení jako Fused Filament Fabrication (FFF), nebo Plastic Jet Printing (PJP).

V dnešní době se jedná o nejčastěji využívanou technologii 3D tisku a tiskárny se vyrábí od malých stolních tiskáren pro nadšence jako je například Prusa MINI+, až po velké průmyslové stroje jako Stratasys 900mc. [4]

Tato technologie nás bude v této bakalářské práci zajímat nejvíce a hlouběji si ji rozebereme v následujících kapitolách.

Proces	Popis	Technologie
<p data-bbox="284 607 533 633">Material Extrusion</p> 	<p data-bbox="676 607 1031 696">Aditivní výrobní proces, při kterém je materiál selektivně dávkován tryskou nebo otvorem.</p>	<p data-bbox="1069 607 1417 696">Výroba z tavených vláken (FFF), častěji označovaná jako tavné depoziční modelování (FDM).</p>

Obrázek 2 – Material extrusion [1]

1.2.1.2 Vat Photopolymerization

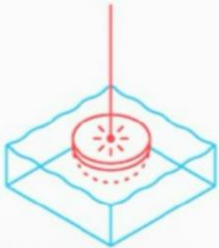
Vat Photopolymerization spočívá v tom, že se kapalný fotopolymer vytvrzuje vrstvu po vrstvě pomocí laseru, nebo jiného světelného zdroje. V roce 1984 vynalezl Charles Hull první komerční 3D tiskárnu založenou na technologii stereolithography (SLA) a následně založil firmu 3D Systems.

SLA tiskárny mají v nádrži fotopolymeru ponořenou stavební platformu, která slouží jako nosná plocha pro vrstvení vytvrzovaného fotopolymeru. Po vytvrzení jedné vrstvy UV laserem se platforma mírně posune a vytvrzuje je další vrstva. Tento proces se opakuje, až do té doby, než je celý tištěný objekt dokončen.

Obdobnou variantou této technologie je Digital Light Processing (DLP). Princip je stejný jako u SLA s tím rozdílem, že se místo laseru využívá projektor.

Oproti FDM tiskárnám dosahují SLA a DPL tiskárny velmi vysokého rozlišení a kvality povrchu. Provoz těchto tiskáren je ale nákladnější kvůli ceně fotopolymerů. Tyto tiskárny byly dříve velmi drahé, ale stávají se čím dál dostupnější. [4]

Většina tisků zhotovených pomocí SLA a DLP potřebuje nějakou formu úpravy. Nejprve se z tisku musí odstranit zbytky nevytvrzeného fotopolymery pomocí vymývání v izopropylalkoholu, nebo jiném vhodném rozpouštědle. Po odstranění podpěr většinou zůstanou na tisku výstupky, které je potřeba odbrousit. Pro zlepšení vzhledu samotného tisku se většinou používají minerální oleje, které skryjí světlé skvrny a vytvoří jednolitý hladký povrch. Další možností postprocessingu je nástřik barvou nebo akrylovým lakem. Ten zamaskuje vrstvení a zároveň chrání model před UV zářením a žloutnutím tisku. [1]

Proces	Popis	Technologie
<p data-bbox="288 689 533 719">Vat Polymerization</p> 	<p data-bbox="681 689 1007 837">Aditivní výrobní proces, při kterém se tekutý fotopolymer v kádi selektivně vytvrzuje světlem aktivovanou polymerací.</p>	<p data-bbox="1074 689 1374 748">Stereolitografie (SLA), přímé zpracování světlem (DLP)</p>

Obrázek 3 – Vat Photopolymerization [1]

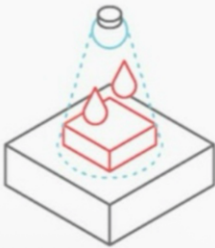
1.2.1.3 Material Jetting (MJ)

MJ funguje na podobném principu jako inkjetové tiskárny. Z tiskové hlavy jsou vypuzovány kapičky tekutého fotopolymery, který je následně vytvrzován UV zářením. Touto technologií se dá dosáhnout opravdu vysokých rozlišení a umožňuje jak vícebarevný tisk, tak tisk za použití více materiálů.

Například tiskárna Stratasys J750 je schopna tisknout až 360 000 barev a kombinovat až 6 různých materiálů. Tato tiskárna je schopna tisknout vrstvy o tloušťce až 14 mikrometrů. [4]

Další zásadní technologií spadající pod Material Jetting je NanoParticle Jetting (NPJ) od firmy Xjet, představená v roce 2016. Ta umožňuje přímý tisk detailních kovových předmětů pomocí inkoustů obsahujících nanočástice kovu. [5]


Specifickou variantou Material Jettingu je DOD (Drop on Demand). Ta využívá dvojici inkoustových trysek. První tryska nanáší stavební materiál a druhá obvykle rozpustný podpůrný materiál. Tyto tiskárny sledují dráhu určenou softwarovým modelem a bodově nanáší materiál. Tímto způsobem vytváří vrstvu po vrstvě tištěný objekt. [6]

Proces	Popis	Technologie
<p>Material Jetting</p> 	<p>Aditivní výrobní proces, při kterém jsou kapičky materiálu selektivně nanášeny a vytvrzovány na konstrukční desku.</p>	<p>Tryskání materiálu (MJ), kapka na vyzádání (DOD)</p>

Obrázek 4 – Material Jetting [1]

1.2.1.4 Binder Jetting (BJ)

BJ spočívá v nanášení pojiva pomocí tiskové hlavy na vrstvu prášku. Pojivo může mít různé barvy, a díky tomu je možné tisknout plnobarevné objekty. Samotný prášek může být na různé bázi, ale nejčastěji se používá prášek na bázi sádry. Objekty tištěné z tohoto prášku se musí po tisku ještě povrchově upravit, aby se zvýšila odolnost. Mimo prášků na bázi sádry se ale dají použít i jiné materiály. Plast, písek, nebo také kovové prášky. Například výtisky s pískovým práškem se často používají pro výrobu forem pro lití kovů. Objekty tištěné z kovového prášku se po vytištění spékají v peci, přičemž nám vznikají pevné kovové předměty, které mohou dosahovat hustoty až 99,9 % ve srovnání s čistým kovem.

Proces	Popis	Technologie
<p>Binder Jetting</p> 	<p>Aditivní výrobní proces, při kterém kapalné pojivo selektivně spojuje oblasti práškového lože.</p>	<p>Tryskání pojiva (BJ)</p>

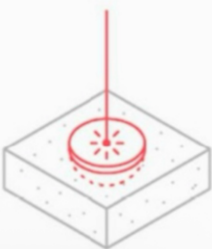
Obrázek 5 – Binder Jetting [1]

1.2.1.5 Powder Bed Fusion

(PBF) podobně jako u Binder Jettingu je základem vrstva prášku. Rozdíl spočívá v tom, že se nepoužívá tekuté pojivo pro vytvrzení vrstvy, ale prášek je selektivně spékán pomocí laseru, elektronového paprsku, nebo jiných tepelných zdrojů. Prášky pro tuto technologii mohou tvořit plasty (například nylon), různé kovy (například titan, ocel, hliník, nebo slitiny niklu). Možný je také tisk z kompozitních materiálů jako alumide, což je směs nylonu a hliníku.

Na této technologii je založeno několik metod, jako Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), nebo také Electron Beam Melting (EBM). [4]

Powder Bed Fusion umožňuje výrobu vysoce kvalitních průmyslových součástí. Přestože se jedná o drahou, a hlavně složitou technologii, své využití nalezne třeba při výrobě lopatek turbín, kostních implantátů a náhrad, trysek do motorů, nebo forem pro vstřikování plastů s integrovanými chladicími kanály. Tato technologie umožňuje vytvářet složité geometrie za použití pokročilých kovových slitin, které by byly jinými technologiemi jen těžko dosažitelné. [8]

Proces	Popis	Technologie
<p>Powder Bed Fusion</p> 	<p>Aditivní výrobní proces, při kterém se pomocí tepelné energie selektivně stéká oblasti práškového lože.</p>	<p>Selektivní laserové spékání (SLS), přímé laserové stékání kovů (DMLS), selektivní laserové tavení (SLM), tavení elektronovým paprskem (EBM)</p>

Obrázek 6 – Powder Bed Fusion [1]

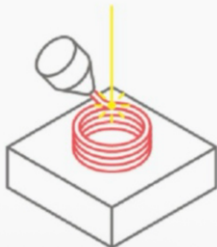
1.2.1.6 Direct Energy Deposition (DED)

DED je další technologie, která používá prášek. Na rozdíl od Binder Jettingu a Powder Bed Fusion není prášek ve vrstvě, ale je přiváděn tryskou do paprsku laseru, nebo elektronového paprsku. [4]

DED existuje je v několika typech, které se liší na typu energie využívané k nanášení a tavení materiálu. Například L-DED (kam patří i LENS a LBMD), která využívá jako zdroj tepla laser,

EB-DED využívá elektronový paprsek, což umožňuje i tisk ve vakuu. To se hodí zejména u tisku, nebo oprav kovů, které mají vysokou teplotu tání, kterou lze zavedením vakua snížit. Ještě existuje PA-DED a WAAM. PA-DED využívá plazmového oblouku a jedná se o dostupnější variantu se širším spektrem materiálů. WAAM využívá jako zdroj elektrický oblouk. Je vhodná pro velké kovové díly a často je kombinována s drátovým materiálem.

Využívá se celkem široká škála materiálu. Kovy jako titan, nerezová ocel, nebo hliník. Různé slitiny kovů jako kobalt-chromové slitiny, niklové slitiny, až po slitiny využívané v leteckém a kosmickém průmyslu. Mimo kovy je také možný tisk keramiky. Technologií DED lze vytvářet nové díly, velké kovové struktury, součásti využívané v leteckém a těžkém průmyslu, ale také je možné využít pro opravu poškozených kovových součástí. [7]

Proces	Popis	Technologie
<p data-bbox="280 909 608 936">Direct Energy Deposition</p> 	<p data-bbox="675 909 1002 1025">Aditivní výrobní proces, při němž se k tavení materiálů při jejich nanášení používá soustředěná tepelná energie.</p>	<p data-bbox="1070 909 1398 999">laserové inženýrské tvarování do čistého tvaru (LENS), Laserové nanášení kovů (LBMD)</p>

Obrázek 7 – Direct Energy Deposition [1]

1.2.1.7 Sheet Lamination (SHL)

Je poslední ze sedmi hlavních technologických principů podle normy ISO/ASTM 52900. Sheet Lamination (SHL), dříve známá jako LOM (Laminated Object Manufacturing) byla v roce 1985 vyvinuta společností Helisys, která se v roce 2000 přejmenovala na Cubic Technologies. Produkty se vyrábějí tak, že se materiál ve formě listů vrství na sebe a z jednotlivých vrstev se obrys vyřezává do požadovaného tvaru. Způsob spojování vrstev a vyřezávání závisí na variantě SHL. Jednotlivé listy se nanášejí, spojují a vyřezávají, přičemž se pracovní plošina posouvá o tloušťku vrstvy. Přebytný materiál zůstává během tisku na svém místě a tím slouží jako podpůrný materiál při tisku.

Existuje několik typů SHL:

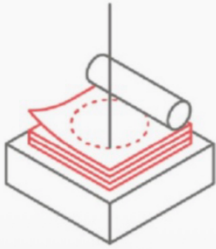
Selektivní depoziční laminace (SDL) – využívá jako materiál listy potištěného papíru, který je spojován pomocí PVA lepidla. Tyto jednotlivé listy papíru se potisknou ještě před SDL tiskem. Většinou je barevný motiv tištěný jen tam, kde bude hrana objektu, aby se snížily náklady. Stejně tak lepidlo je nanášeno pouze na části, které tvoří samotný tištěný objekt. Do každého listu se vyřezává obrys vrstvy pomocí řezací čepele. Potisku se už jen odstraní přebytečný papír.

Plastová laminace – funguje víceméně stejně jako SDL. Hlavní rozdíl oproti SDL je ten, že je místo papíru používána polymerní fólie, na kterou se aplikuje disperzní lepidlo. Tam kde se vrstvy nemají spojit, je nanášena vrstva tzv. antilepidla (může se jednat například o PTFE, nebo silikonové povlaky).

Laminace keramiky – pomocí SHL mohou být také laminovány pásy z hlíny na keramiku, které se získávají litím, nebo extruzí. Z jednotlivých vrstev se vyřezávají kontury. Po dokončení laminace a vyřezávání se z vrstveného materiálu vyjme výsledný produkt. Ten je potřeba sintrovat (spékat) v peci, čímž se dosáhne téměř plné hustoty, která dosahuje až 97 %.

Mezi používané materiály patří například: Al_2O_3 (oxid hlinitý), Si_3N_4 (nitrid křemíku), nebo také ZrO_2 (oxid zirkoničitý). Hlavním omezením v této metodě je oslabení spojů mezi vrstvami, ke kterému může docházet během vypalování a odpařování pojiv.

Ultrazvuková aditivní výroba (UAM) – v této metodě se spojují vrstvy kovových fólií pomocí ultrazvukového svařování. Toto ultrazvukové svařování se využívá, protože nevyžaduje vysoké teploty. Hlavní výhodou UAM je, že jsme schopni kombinovat různé typy kovů za nižší energetické náročnosti, protože nedochází k roztavení materiálů. Kovy se spojují plastickou deformací a je možné je vrstvit s optickými vlákny, nebo také elektronickými obvody. Mezi používané materiály patří hliník, měď, nerezová ocel, nebo také titan. Výsledné objekty se musí ještě dodatečně opracovávat, kvůli odstranění nepropojeného materiálu. Způsoby tohoto opracovávání může být vrtání, broušení a CNC obrábění. [8]

Proces	Popis	Technologie
<p data-bbox="304 300 520 322">Sheet Lamination</p> 	<p data-bbox="699 300 1043 356">Aditivní výrobní proces, při kterém se spojují pláty materiálu a vytvářejí díl.</p>	<p data-bbox="1091 300 1420 387">Ultrazvuková aditivní výroba (UAM), výroba laminovaných předmětů (LOM)</p>

Obrázek 8 – Sheet lamination [1]

1.3 Podrobný popis FDM technologie

1.3.1 Princip fungování FDM technologie

Fused Deposition Modeling (FDM) je metoda 3D tisku, která funguje tak, že postupně nanáší roztavený termoplastický materiál ve vrstvách. Nejdůležitější součástí FDM tiskárny je extruder. V extruderu je ohříván tiskový materiál, až nad T_m (teplotu tání). Materiál je nejčastěji ve formě plastového vlákna (filamentu). V moment, kdy materiál překročí teplotu tání, stává se plastickým, je pomocí trysky (označované jako „nozzle“) vytlačován na přesně určenou polohu tiskové podložky.

Tryska se během tisku každé vrstvy pohybuje ve vodorovné rovině po osách X a Y. Po vytištění vrstvy se tisková hlava (v některých případech se posunuje tisková podložka) posouvá po ose Z, o výšku tištěné vrstvy a tiskne se další vrstva. Tímto způsobem vzniká trojrozměrný objekt.

Při ochlazování okolním vzduchem nanesený materiál tuhne, čímž se spojuje s předchozí vrstvou. V tomto procesu probíhají dvě fázové změny skupenství. Nejprve přechází filament z pevné fáze tavením do plastické fáze a následně po opuštění trysky ochlazením zpět do tuhé. [9]

Technologie FDM je relativně jednoduchá, cenově dostupná a použitelná i v domácích podmínkách. V současné době se jedná o jednu z nejrozšířenějších metod 3D tisku jak v průmyslu, tak mezi hobbymakery. [8]

1.3.2 Základní komponenty FDM tiskárny

FDM tiskárny se skládají z několika hlavních částí, které zajišťují plynulé, ale především přesné vytváření trojrozměrného objektu.

Mezi tyto části patří:

Filament a cívka

Tiskový materiál ve formě filamentu je obvykle namotán na cívce. Filamenty mívají běžně průměr 1,75, nebo 2,85 mm. Materiál je z cívky odmotáván a pomocí podávacího mechanismu veden do tiskové hlavy. Výběr materiálu má zapsaný vliv na vlastnosti výsledného objektu. Může se jednat například o ABS, PLA, PETG, nebo o speciální filamenty.[8] Ty budou rozebrány podrobněji v kapitole o materiálech používaných pro FDM.

Podávací mechanismus

Podávací mechanismus je součástí extruderu a zajišťuje posun filamentu do hotendu (zahřívací části extruderu). Existují dva typy podávacího mechanismu. Přímý – direct drive a nepřímý – bowden. Direct drive má motor zajišťující posuv filamentu do tiskové hlavy přímo napojen na tiskovou hlavu. Bowden využívá jiného mechanismu. Motor je oddělen od tiskové hlavy a filament je k tiskové hlavě veden skrze PTFE, nebo kovové trubičky. [8, 9] Detailněji jsou tyto typy rozebrány v následující části.

Tisková hlava (hotend)

Do tiskové hlavy je veden filament a v ní se filament ohřívá vysoko nad T_m . Skládá se z topného tělesa, teplotního čidla a trysky. Skrze trysku je roztavený materiál vytlačován na tiskovou podložku. Mimo tyto součásti obsahuje tisková hlava ještě teplotní bariéru (heat break). Ta brání nežádoucímu přenosu tepla směrem do studené části extruderu. [9]

Tisková podložka (bed)

Jedná se o plochu, na kterou se postupně vrství tištěný materiál. Tisková podložka je často temperovaná, což zlepšuje přilnavost materiálu k podložce a zároveň snižuje riziko deformací (warping). Povrch podložky bývá také často upraven pro zvýšení přilnavosti specifických

filamentů. Tato úprava může být ve formě skla, texturovaného plechu, nebo PEI (polyetherimidové) fólie. [8]

Pohybový systém

Jedná se o pohyblivé části řízené krokovými motory. Obvykle je to tak, že se tisková hlava pohybuje ve směru os X a Y. Tisková podložka se pohybuje po ose Z. Některé FDM tiskárny mají jinou konstrukci a tisková hlava se pohybuje ve všech osách X, Y i Z, zatímco tisková podložka je v konstrukci umístěna pevně. [9]

Řídící elektronika a firmware

Každá 3D tiskárna je řízena základní deskou, která interpretuje tiskové instrukce v G-code a ovládá všechny komponenty tiskárny. Od taktů motorů, teploty tiskové podložky a tiskové hlavy, ventilátory atd.

Firmware také zajišťuje přesnost a bezpečnost provozu. Například při překročení teploty, nebo výpadku systém automaticky přerušit tisk.

Systém chlazení

Je potřeba, aby byla studená část extruderu aktivně chlazená, především aby nedocházelo k předčasnému měknutí filamentu. Jedná se o ventilátor, který je součástí hotendu. Mimo tento ventilátor bývá přítomen ještě tzv. part cooling ventilátor. Ten chladí právě vytištěný materiál a tím zajišťuje vyšší kvalitu tisku. Zároveň také umožňuje kvalitnější tisk přemostění a detailních částí. [8]

1.3.2.1 Typy extruderů a jejich vliv na tisk

Jak už bylo řečeno dříve, extruder je jednou z nejdůležitějších součástí FDM tiskárny. Jeho úkolem je doprava a přesné dávkování filamentu do hotendu, kde se filament taví a ukládá se na tiskovou podložku. Konstrukce extruderu má zásadní vliv na možnosti tisku různých materiálů, rychlost tisku, kvalitu detailů a odvíjí se od ní i míra selhání tisku.

Extrudery se dělí podle způsobu dopravování filamentu do hotendu na dvě hlavní skupiny:

Direct drive (přímý) extruder

Tento typ extruderu má motor zajišťující posuv filamentu umístěný přímo nad, nebo velmi blízko k hotendu. To znamená že je filament veden pouze krátkou vzdáleností, což má několik výhod. Je možné dosáhnout vyšší přesnosti při dávkování materiálu, hlavně při retrakci (zpětnému zasouvání) filamentu. Retrakce zajišťuje že nedochází k nechtěnému vytékání materiálu z trysky během pohybu tiskové hlavy, když právě neprobíhá tisk. Direct drive je také spolehlivější tisk flexibilních materiálů, jako je například TPU. To se při použití bowden systému často deformuje, když je vedeno dlouhou trubičkou do tiskové hlavy. Další výhodou direct drive systému je, že odezva extruderu na změny v průtoku materiálu je rychlejší než u bowdenů. To má příznivý vliv na tisk složitých a detailních částí modelů.

Nevýhodou direct drive systému je vyšší hmotnost pohyblivých částí tiskové hlavy. [8, 9]

Bowden extruder

Na rozdíl od direct drive extruderu využívá bowden oddělené umístění motoru. Ten je umístěn na rámu tiskárny. Filament je veden do hotendu tenkou PTFE trubičkou. Tím se výrazně sníží hmotnost pohyblivé části tiskové hlavy. Díky tomu má tisková hlava rychlejší a přesnější pohyby, což minimalizuje vibrace a umožňuje vyšší rychlost tisku.

Bowden extrudery se nejčastěji používají při tisku velkých modelů, kde je potřeba větší rychlost tisku. Hlavní nevýhodou je menší přesnost při retrakcích, která je způsobena pružností filamentu i samotné PTFE trubičky. Tato nepřesnost je ještě vyšší při tisku pružných materiálů. [8, 9]

1.3.3 Faktory ovlivňující kvalitu tisku

Výslednou kvalitu výtisku FDM tiskárny ovlivňuje řada parametrů, které je potřeba správně nastavit a optimalizovat.

Mezi nejdůležitější faktory patří:

Teplota hotendu – musí odpovídat tištěnému materiálu, protože každý materiál má jinou teplotu tavení. PLA vyžaduje teploty okolo 200 °C, zatímco ABS, nebo PETG mají teplotu tavení vyšší, v rozmezí 230–250 °C. Nesprávné nastavení teploty může zapříčinit problém

s přilnavostí vrstev, příliš tekutému, nebo naopak málo tekutému materiálu, čímž se snižuje přesnost tisku.

Teplota tiskové podložky – ovlivňuje přilnavost první vrstvy. Když je podložka nedostatečně vyhřátá, může to mít za důsledek odtržení modelu během tisku. Naopak příliš vysoká teplota může způsobovat deformace (warping).

Výška tištěné vrstvy – udává jak moc detailního a hladkého tisku jsme schopni dosáhnout. Běžně se hodnoty pohybují v rozmezí 0,1–0,3 mm. Čím nižší je výška tištěné vrstvy, tím detailnějšího tisku jsme schopni dosáhnout, ale tím zároveň roste doba tisku.

Výtisky s vyšší tištěnou vrstvou se sice tisknou rychleji, ale docílíme méně detailního tisku. Zároveň hrozí horší spojování vrstev, zejména u některých materiálů.

Rychlost tisku – Čím vyšší rychlost tisku využíváme, tím nižší bude výsledná doba tisku. Zároveň ale může rychlejší tisk znamenat snížení přesnosti a kvality tisku. Tyto nedostatky jsou způsobeny tím, že tiskárna nemá dostatek času na přesné nanášení materiálu.

Pomalý tisk nám ale nezajistí dokonalý tisk. Příliš pomalý tisk často vede k přehřívání materiálu a tvorbě výstupků (stringing).

Kalibrace tiskárny a tisk první vrstvy – Pro dosažení úspěšného tisku je zásadní přesné vyrovnání tiskové podložky a správná výška první vrstvy. Pokud by byla vzdálenost trysky od podložky příliš vysoká, může to zapříčinit, že se materiál k podložce nepřichytí. Když je vzdálenost příliš nízká, může docházet k ucpání trysky, nebo deformacím první vrstvy. [9]

Retrakce filamentu – Je to vtažení filamentu při přemístování trysky, když zrovna není vytlačován materiál. Správné nastavení retrakce je klíčové k zamezení nechtěných výtoku materiálu a stringingu. U direct drive systému je možné docílit vyšší přesnosti tisku díky možnosti nastavení menší délky retrakce než u Bowden systému. [8, 9]

Chlazení výtisku – Správné nastavení chlazení napomáhá docílit kvalitního tisku s ostrými hranami a detaily. Je důležité zejména u tisku z PLA. Při příliš intenzivním chlazení může docházet deformacím, nebo dokonce i praskání vrstev. [9]

Kvalita filamentu – Od kvality filamentu se odvíjí celková kvalita výsledného výtisku. Průměr, konzistence, vlhkost, homogenita a případné nečistoty filamentu mají zásadní vliv na

průběh tisku, ale i na kvalitu výsledného objektu. Nestabilní, nebo vlhký filament může způsobit výkyvy v extruzi, ucpávání trysky, tvorbu bublinek ve výtisku, nebo stringing. [9] Pro sušení filamentu a udržení správné vlhkosti se využívají sušičky filamentu. Případně se pro sušení dá využít i trouba, nebo sušička ovoce. U těchto způsobů se ale musí počítat s tím, že se nejedná o zařízení pro tento účel a zvážit správné nastavení, aby nedošlo ke znehodnocení filamentu. [10]

1.3.4 Vícemateriálový tisk pomocí FDM

Ačkoli se u tisku pomocí FDM tisku nejčastěji využívá tisku jednoho materiálu, postupným vývojem a zdokonalováním technologie FDM vznikají nové možnosti kombinování více materiálů. Díky rozvoji víceextruzních tiskových systémů, je dnes možné kombinovat různé druhy termoplastů lišících se v mechanických, estetických nebo také vodivých vlastnostech v rámci jednoho tištěného dílu.

Jedním z typů vícemateriálového FDM tisku je MMT FDM (multi-material, multi-technology fused deposition modeling). Umožňuje tisk z různých materiálů, ale také použití různých tiskových parametrů, jako je tloušťka vrstvy, nebo také šířka tiskové stopy pro specifické oblasti modelu. Espalin et al. 2014 vyvinuli experimentální tiskový systém, který sestával ze dvou FDM tiskáren vybavených celkem čtyřmi extrudery. Bylo možné kombinovat materiály i v rámci jedné vrstvy, a to díky pneumatickému pojezdu mezi tiskárnami, které mezi sebou spolupracovaly. Takto zpracované výtisky dosahovaly až o 55 % hladší povrch a tisk trval až o 53 % méně času ve srovnání s konvenčním FDM tiskem, aniž by se zhoršily mechanické vlastnosti. [11,13]

Dalším typem vícemateriálového tisku je tzv. b-FDM (blending FDM), ten umožňuje tisk součástí s integrovanými funkcemi, jako jsou například vodivé dráhy, nebo senzory. a to bez nutnosti výměny materiálu během tisku. Dosahuje toho tak, že vytváří filameny, které kombinují různé materiály s odlišnými vlastnostmi do jednoho vlákna. [12]

Metody podporující multimateriálový FDM 3D tisk jsou obzvláště důležité v oblasti funkčního 3D tisku, kde je potřeba kombinovat vodivé a nevodivé materiály pro výrobu různých senzorů, antén, vodivých cest, nebo základních elektronických struktur. Možnosti využití různých vodivých filamentů na bázi grafenu, nebo uhlíkové černi budou dále diskutovány v pozdějších částech této práce.

1.4 Materiály pro FDM tisk funkčních struktur

1.4.1 Vodivé a kompozitní filamenty

Mimo klasické termoplastické filamenty používané pro tisk pomocí FDM, jako je například PLA, PA, nebo ABS, je pro tisk funkčních objektů potřeba využívat materiály, které mají lepší mechanické vlastnosti, elektrickou anebo tepelnou vodivost. Těchto vlastností se dá docílit spojením polymerní matrice (většinou materiály pro výrobu konvenčních filamentů) s různými aditivami za vzniku kompozitních filamentů.

Vodivé filamenty jsou speciální skupinou materiálů pro FDM tisk, které umožňují vedení elektrického proudu skrze tištěný objekt. Přestože jsou konvenční polymerní filamenty nevodivé, přidáním vodivého plniva do polymeru vodivost vzniká. Aby byla vodivost dostatečná, musí plnivo vytvořit rovnoměrnou síť v materiálu, což umožní přechod elektronů mezi částicemi a překročit tzv. perkolační práh. Po překročení tohoto prahu dojde k náhlému přechodu z nevodivého do vodivého stavu. Koncentrace plniva potřebná k dosažení tohoto bodu je závislá na typu plniva, velikosti a tvaru částic, poměru jejich velikosti, délky vzhledem k průměru a v neposlední řadě rovnoměrnost dispergace v polymeru. [14]

1.4.1.1 Kompozity s částicovou výztuží

Vznikají přidáním mikročástic materiálu do polymerní matrice. Mikročástice mohou být kovové, keramické, nebo uhlíkové a každý materiál, ale i jeho procentuální zastoupení ve filamentu zásadně ovlivňuje vlastnosti výsledného filamentu. Při požadavku na elektrickou vodivost se jako nejlepší plnivo jeví uhlíkové částice, jako je například oxid grafenu, který zajišťuje elektrickou vodivost už i v nízkých koncentracích (~0,8–7,4 %). Jako další příklady plniva pro zvýšení vodivosti jsou kovy (např. železo, měď, nebo nerezová ocel), které sice zvyšují vodivost, ale na úkor snížení pevnosti, protože aby se dosáhlo vodivosti, musí být procentuální zastoupení plniva výrazně vyšší než u uhlíkových částic. Kovové částice se využívají spíše pro zvýšení tepelné vodivosti a uhlíkové pro zvýšení elektrické vodivosti. Keramické částice, jako například ZrO_2 (oxid zirkoničitý), nebo HA (hydroxyapatit), se využívají pro zvýšení mechanické odolnosti, nebo biokompatibility pro lékařské aplikace.

Nevýhodou těchto materiálů je, že vzniká riziko ucpávání trysky extruderu. a to hlavně při použití větších částic, nebo při jejich vyšších koncentracích. Další nevýhodou může být vznik

duťin a oslabení mechanické soudržnosti filamentu. To se dá částečně řešit povrchovou úpravou částic, díky které je spojení částic s matricí kvalitnější.

Jako příklad kompozitních materiálů s částicovou výztuží využitelné pro tisk vodivých komponent můžeme uvést například kombinaci ABS s mikročásticemi mědi, nebo PLA v kombinaci s mikročásticemi oxidu grafenu.

1.4.1.2 Kompozity s krátkými vlákny

Na rozdíl od předchozího typu jsou mikročástice ve formě krátkých vláken, které vznikají tak, že se do matricového materiálu rovnoměrně rozptýlí vlákna ve formě granulátu. Z této směsi se následně extruduje filament. Vlákna mohou být na bázi uhlíku, nebo se může jednat o vlákna skleněná. Uhlíkové vlákna výrazně zvyšují pevnost v tahu a ohybu, tuhost a napomáhají také k vyšší rozměrové stabilitě výtisků. Uhlíkové vlákna částečně zvyšují i vodivost, ale materiál se kvůli nim stává křehčím, zejména při vyšších koncentracích. Výsledná pevnost výtisku silně závisí na orientaci vláken, vzhledem ke směru zatížení. Další nevýhodou těchto materiálů je tendence vláken ke zkracování při extruzi, čímž se mění vlastnosti výsledného materiálu.

Typickým příkladem kompozitu s krátkými vlákny je například PLA s 5–15 % uhlíkových vláken. Ten se využívá pro výrobu funkčních objektů. Dalším příkladem je třeba PP se skelnými vlákny, který se využívá pro tvorbu vysoce pevných komponent.

1.4.1.3 Kompozity s kontinuálními vlákny

Jsou třetím typem kompozitních filamentů. K úpravě vlastností využívají nepřetržitých vláken, které jsou spojitě v celé délce filamentu. Tyto vlákna mohou být uhlíková, skleněná, nebo aramidová (aromatický polyamid). Tyto vlákna se s filamentem spojují buď při extruzi, zaváděním vlákna do extruderu, nebo se ukládají do nataveného polymeru separátní tryskou. Materiálem použité matrice může být například PLA, ABS, nebo také nylon. Tímto způsobem získáme materiál, který je několikanásobně pevnější než konvenční filamenty. Tyto výhody jsou však vyvažovány složitější přípravou, potřebou složitějšího vybavení a výrazné anizotropie. Anizotropie je závislost mechanických vlastností na směru působící síly.

I přes nevýhody těchto filamentů nacházejí díky svým mechanickým vlastnostem uplatnění při tvorbě konstrukčních dílů pro letecký a automobilový průmysl. [15]

1.4.2 Plniva do vodivých filamentů

1.4.2.1 Uhlíková čern (CB)

CB je jedno z nejdéle používaných plniv s vodivostními vlastnostmi. Jedná se o jemný prášek s částicemi kulovitého tvaru, jejichž velikost se pohybuje v řádech několika desítek nanometrů. Perkolační prahu dosahuje uhlíková čern již při koncentracích okolo 1,5–3 hm. % [16]. Co se týká mechanických vlastností, tak při nižších koncentracích (okolo 1,5 hm. %) může přídavek plniva vést k jejich zlepšení. Naopak ve vyšších koncentracích (více než 3 hm. %) už můžou plniva způsobovat problémy, jako například ucpání trysky. V PA12 dosahuje uhlíková čern při koncentraci 1,5–3 hm. % [16] vodivosti v řádu jednotek až desítek $\mu\text{S}/\text{cm}$, což je dostačující pro antistatické aplikace, nebo také elektromagnetické stínění.

Výhodou tohoto plniva je jeho dostupnost, nízká cena, kompatibilita s většinou termoplastů a jednoduchá rozdispergovatelnost i bez použití speciálních dispergačních činidel. [16]

1.4.2.2 Uhlíková vlákna (CF)

Stejně jako CB poskytují relativně nízkou vodivost a využívají se pro antistatické aplikace a elektromagnetické stínění. Perkolační práh těchto plniv není ve zdroji [19] přímo popsán, ale dá se předpokládat, že budou jeho hodnoty stejné, nebo lehce vyšší, než u CB v závislosti na specifikacích tisku a typu polymerní matrice.

Z těchto důvodů se CF využívají především jako plnivo pro zlepšení mechanických vlastností, jako je tuhost, pevnost a teplotní odolnost filamentů. Tyto plniva jsou relativně levné a jednoduché ke zpracování, na rozdíl od nanočásticových plniv. Na druhou stranu si musíme dát pozor na rychlejší opotřebení trysky a na zvýšenou křehkost při vyšších koncentracích plniva. [19]

1.4.2.3 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

Díky velmi vysokému poměru délky k průměru částic je možné vytvořit vodivou síť už při koncentracích okolo 0,5 hm. %[18]. CNT je vyznačuje vynikající elektrickou vodivostí, ale také zlepšují mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. a to v pevnosti, tuhosti i houževnatosti.

Hlavní nevýhodou je obtížná dispergace v polymeru z důvodu tvorby shluků nanotrubic. To vede ke zhoršení perkolace a je nutné použití plastifikátorů, funkční modifikace povrchu, nebo kombinace mechanického a ultrazvukového míchání. CNT se rozdělují ještě na dva typy: SWCNT, což jsou jednostěnné nanotrubice a MWCNT nanotrubice. SWCNT mají menší průměr a vykazují vyšší elektrickou vodivost. Kvůli jejich křehkosti a horší dispergaci se často volí MWCNT, které jsou levnější, mají nižší vodivost, kvůli vyššímu průměru, ale jsou pevnější a snadněji dispergovatelné.

Největší nevýhodou tohoto plniva je jeho vysoká cena v porovnání například s CF. [18]

1.4.2.4 Grafen

Grafen je jednovrstvá struktura uhlíku, kde jsou atomy uspořádány v planární hexagonální síti. Vyznačuje se vysokou tepelnou i elektrickou vodivostí, flexibilitou a pevností. Stejně jako CNT má velký rozdíl v poměru délky k průměru částic a umožňuje dosažení vodivosti už při nízkých koncentracích. Mimo vodivost zajišťuje i lepší rozměrovou stabilitu, zlepšuje bariérové vlastnosti proti plynům a zpevňuje materiál.

Hlavní nevýhodou grafenu je, že během přípravy má sklony k re-aglomeraci, což znamená, že má po rozmíchání v matrici tendenci tvořit shluky. I přesto se ale díky své vysoké vodivosti používá jako plnivo při pokročilých aplikacích, jako jsou senzory a flexibilní elektronika. Další nevýhodou grafenu jsou vysoké náklady na jeho výrobu a složitější příprava kompozitů. [17]

1.4.2.5 Kovové částice (Cu, Ag, Au)

Kovové částice jsou další možností plniva pro dosažení vodivosti filamentů. Nejčastěji se jedná o stříbro, měď, nebo zlato. Používají se ve formě nanočástic (NPs), nanodrátků (NWs), nebo nanoplátek. Forma, ve které jsou kovy využity výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledných kompozitů. U kovových částic se stává kompozit vodivým při různých koncentracích v závislosti na typu částic a polymerní matrice. Stříbro i měď (měď je náchylnější) může podléhat oxidaci, což může vést ke krátkodobější stabilitě vodivosti. Zlato má vodivost nižší a jeho cena je výrazně vyšší, než u Cu a Ag, ale na rozdíl od nich vykazuje vynikající chemickou stabilitu a biokompatibilitu, což ho činí ideálním plnivem do filamentů pro implantáty. [19]

1.4.3 Polymery vhodné pro elektricky vodivé kompozity

Kromě správného zvolení vodivého plniva je důležité zvolit také správný termoplast, který slouží jako nosná matice pro výsledný kompozitní filament. Vlastnosti matice přímo ovlivňují mechanické, tepelné a tiskové vlastnosti filamentu, a zároveň mají také vliv na perkolaci plniva v polymeru. Pro výrobu elektricky vodivých filamentů se používají nejčastěji stejné polymery jako pro klasický FDM tisk. a to například PLA, TPU, ABS nebo třeba PETG.

1.4.3.1 PLA (Polylactic Acid)

PLA je termoplastický polyester na bázi kyseliny polymléčné. Jeho hlavními výhodami jsou především jeho nenáročnost pro tisk, rozměrová stálost výtisků a dobrá dispergovatelnost plniv. Získává se z obnovitelných biologických zdrojů jako je například kukuřičný škrob, nebo cukrová třtina. Díky tomu je také biologicky odbouratelný. Jeho aplikace jsou značně omezeny, kvůli nízké teplotě skelného přechodu, která se pohybuje okolo 60 °C. Z toho důvodu se může stávat křehkým a není vhodný pro výtisky, u kterých dochází k vyššímu tepelnému namáhání. I přes nevýhody se jedná o nejčastěji využívaný termoplast pro výrobu vodivých kompozitních filamentů.

1.4.3.2 TPU (Thermoplastic Polyurethane)

TPU je termoplastický elastomer. Vyznačuje se vysokou flexibilitou a tažností. Je vysoce odolný vůči abrazi, olejům a povětrnostním vlivům. Na tisk je značně náročnější než PLA, kvůli jeho hygroskopičnosti a flexibilitě. Pro dosažení kvalitního výtisku je nutné pomalé podávání filamentu a správně kalibrovaný extruder. TPU může mít více stupňů pružnosti. Od úplně měkkých, až po polotuhé filamenty. Pro výrobu vodivých kompozitů se běžně nevyužívá, ale jeho využití stále roste v oblastech, kde jsou kladeny nároky na mechanickou flexibilitu, jako například u ohebných snímačů.

1.4.3.3 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ABS je kopolymer, který se připravuje ze tří monomerů. Konkrétně akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Často se uplatňuje v technických a funkčních aplikacích. Zejména díky jeho vysoké tepelné, chemické a rázové odolnosti. Díky těmto vlastnostem je také často využíván jako matrice pro vodivé kompozity. Dobře interaguje s uhlíkovými plnivými jako CB, CF a CNT. Proto je často využíván i v komerčně dostupných vodivých filamentech. Nevýhodou je jeho vyšší náročnost na tisk. Je potřeba mít správně nastavenou teplotu tiskové podložky a extruderu. Pro

dosažení kvalitního tisku je doporučována i uzavřená tisková komora, protože ABS je při chlazení náchylný ke smršťování.

1.4.3.4 PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)

PETG je polyethylen tereftalát (PET) rozšířený o monomer glykolu. Přidáním glykolu se zvýší houževnatost a sníží se křehkost, která je typická pro klasický PET. PETG je bez přidání barevných plniv čirý, flexibilní materiál s výbornou chemickou odolností a není tak náchylný na smršťování při tisku třeba jako ABS. Náročnost při tisku není tak vysoká jako u ABS, ale vyšší než u PLA. PETG je náchylný k vlákňení a silně absorbuje vlhkost.

Pro výrobu elektricky vodivých kompozitů se jedná o zajímavou volbu zejména díky jeho dobré přilnavosti vrstev, odolnosti vůči nárazu a elasticitě. [20]

1.5 Vlastnosti elektricky vodivých filamentů

Jak už bylo zmíněno dříve, FDM tisk vodivými polymerními kompozity umožňuje vytvářet mimo mechanické součástky, také objekty vyznačující se elektrickými charakteristikami v závislosti na použitém filamentu plněném vodivými plnivem. Pro správné popsání a využití elektricky vodivých kompozitních materiálů je potřeba znát jejich elektrické vlastnosti, a to zejména elektrický odpor a z něj odvozenou vodivost. Měření těchto veličin nám poskytuje informace o kvalitě provedení tisku a vodivostních vlastnostech materiálu.

1.5.1 Základní elektrické veličiny:

Elektrický odpor (R) – je míra bránění průchodu elektrického proudu měřeným materiálem. Čím nižší odpor je, tím lépe vede daný materiál elektrický proud. Podle Ohmova zákona ho lze vypočítat ze vztahu $R = U/I$. Jeho základní jednotkou je ohm [Ω].

Elektrické napětí (U) – popisuje rozdíl elektrických potenciálů mezi dvěma body v elektrickém obvodu. Základní jednotkou je Volt [V].

Elektrický proud (I) – je definován jako tok elektrického náboje za jednotku času a udává se v ampérech (A).

Měrný elektrický odpor (ρ) – je materiálová konstanta. Popisuje odpor vodiče o jednotkové délce a průřezu. Tento vztah mezi odporem, délkou vodiče a jeho průřezem můžeme vypočítat podle vztahu $R = \rho \times \frac{l}{S}$. Měrný elektrický odpor popisujeme jednotkou ohmmetr [$\Omega \times m$].

Elektrická vodivost (σ) – je převrácenou hodnotou měrného odporu a popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Je vyjadřována vztahem $\sigma = \frac{1}{\rho}$. Jeho jednotkou je siemens na metr [S/m].

1.5.2 Vliv infillu na elektrickou vodivost

Druh, směr i hustota výplně tištěného objektu výrazně ovlivňuje jeho výsledný elektrický odpor. [21] Vzorky, které mají 100% výplň vykazují nižší elektrický odpor než výtisky, které mají výplň nižší. Podobný vliv má i orientace tisku. V rovině vrstev vykazují výtisky až stokrát nižší elektrický odpor, než je tomu napříč vrstvami. [22]

1.5.3 Metody měření elektrického odporu a faktory ovlivňující jeho přesnost

Nejčastěji se elektrický odpor tištěných vzorků měří dvoubodově pomocí multimetru. Toto měření je jednoduché, ale nese s sebou nevýhodu, že naměřená hodnota odporu zahrnuje i odpor vodičů a přechodové odpory na kontaktech. Kvůli těmto odporům mohou být naměřené hodnoty zkreslené a výsledný odpor může vykazovat vyšších hodnot, než daný vzorek reálně má. Tyto vlivy se ale dají minimalizovat zajištěním kvalitního spojení elektrod se vzorkem. Toho můžeme docílit například nanesením vodivé stříbrné pasty na kontakty, čímž se výrazně sníží tyto přechodové odpory.

Pro omezení těchto vlivů můžeme také zvolit jinou metodu měření. Čtyřbodová metoda, která využívá čtyř vodičů, z nichž dva slouží k měření proudu a dva pro měření napětí. Tím že se oddělí proudový a měřicí obvod, jsme schopni docílit toho, že výsledný odpor není ovlivněn odporem vodičů ani kontaktů. [23]

1.6 Aplikace elektricky vodivého FDM tisku

3D tisk, zejména FDM, přinesl revoluční možnosti pro vytváření složitých, funkčních struktur. V oblasti elektricky vodivých materiálů umožňuje vodivý FDM výrobu různých komponent s přizpůsobenými vlastnostmi, které nacházejí uplatnění v široké škále aplikací od elektroniky a průmyslu až po nositelné technologie a funkční struktury.

1.6.1 Využití v elektronice a průmyslu

Polymerní kompozitní materiály obohacené o vodivé plniva umožňují vytvářet pasivní elektronické součástky, nebo senzory [24]. V této kapitole si popíšeme některé z mnoha možných aplikací.

1.6.2 Senzory

Senzory jsou základními prvky elektrických řídicích systémů, které jsou schopny detekovat změny v systému, nebo prostředí a převádí je na elektrický (analogový, nebo digitální signál). Výroba senzorů konvenčním způsobem vyžaduje drahé a složité výrobní procesy, které omezují flexibilitu designu senzoru. Aditivní výroba, včetně FDM a DIW překonává tato omezení tím, že umožňuje flexibilní výrobu objektů s požadovanými tvary a funkcemi, které není možné realizovat konvenčním způsobem [25]. Technika DIW (Direct Ink Writing) se od FDM liší tím, že namísto termoplastických polymerů využívá disperzní systémy, např. vodivé inkousty, keramické směsi, biologické materiály atd. [26]. Pro výrobu senzorů je využíváno vodivých materiálů (filamenty, nebo inkousty), skládajících se z vodivých částic rozdispergovaných v termoplastické matici [25, 27]. Tyto materiály umožňují tisk vrstvených struktur s různými elektrickými vlastnostmi, jako jsou například piezorezistivita, nebo teplotní koeficient odporu. Využívá se toho, že vnější vlivy, jako teplota, tlak a vlhkost způsobují změny těchto vlastností, díky čemuž je možné vytvářet funkční senzory. Sensorový prvek a celý obvod je možné tisknout v jednom procesu. To je výhodné především kvůli eliminaci potřeby montáže a snížení odpadu [25]. Senzorů může být mnoho typů, podle veličin, které jsou schopny měřit. Dále jsou v této kapitole popsány některé z nich.

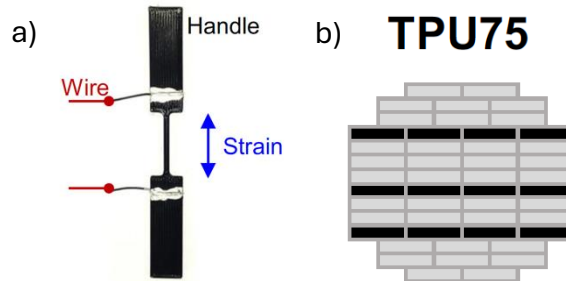
1.6.2.1 Tenzometry a tlakové senzory

Tenzometry a tlakové senzory jsou klíčové senzory které lze efektivně vyrábět pomocí technologií 3D tisku, zejména pomocí FDM a DIW.

Tenzometry

Tyto senzory pracují na piezorezistivním principu. Jsou schopné detekovat elektrické posuny při mechanické deformaci a jsou hojně využívány v monitorování infrastruktury a automobilů, nositelné elektronice, protetice, nebo také v rozhraních člověk-stroj [25]. Když jsou správně zpracovány, vykazují výrazný a lineární nárůst odporu vlivem deformace [28].

Piezorezistivní senzory obvykle zahrnují snímací prvek, jehož odpor se mění pod vlivem síly/deformace [25]. Jako příklad si můžeme uvést senzor deformace, který je popsán ve zdroji [29]. Tento senzor byl vytištěn pomocí DM filamentu TPU75, jak je znázorněno na obrázku 9.



Obrázek 9 – a) Ilustrace senzoru deformace se snímací oblastí $20 \times 1,6 \times 1,2$ mm s rukojeťmi, b) ilustrace filamentu TPU75 složeného z TPU a CPLA (Conductive PLA) [29]

Senzor byl tisknut pomocí technologie b-FDM, která je stručně popsána v následující kapitole. Byl zvolen DM filament TPU75, který se skládá z gradientu tvořeného materiálem CPLA, který je tuhý, křehký a vodivý díky uhlíkovým nanočásticím a TPU, který filamentu poskytuje měkkost a pružnost. Tento konkrétní filament se skládá z 25 % CPLA a 75 % TPU [29].

Tento senzor deformace vykazoval podle zdroje [29] opakovatelné výstupní signály v rozsahu deformace 10–40 % a stabilní odezvu i po více než 2000 cyklech.

Dalším příkladem aplikace je tisk piezorezistivních hmatových senzorů. Například zdroj [29] popisuje hmatový senzor z kompozitu TPU a PLA-grafenu. Tyto materiály se vyznačují vysokou citlivostí a vynikající schopností zotavení při tlaku a ohybu.

Piezorezistivní senzory nemusí být tištěny pouze pomocí b-FDM, ale i pomocí klasického FDM a DIW.

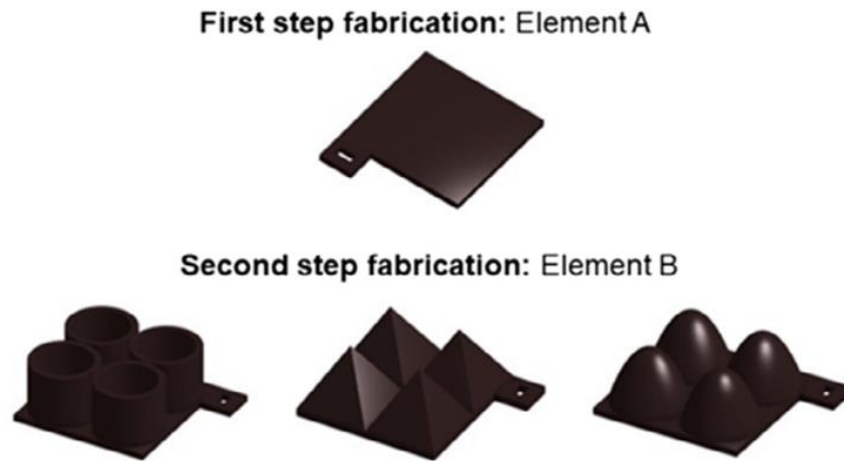
Při použití FDM se využívá vodivých kompozitních filamentů s vodivým plnivem, které může být například ve formě CB, nebo CNT. [30] Jako konkrétní typy materiálů pro tisk piezorezistivních senzorů pomocí FDM můžeme uvést například ABS s grafenem, nebo polykaprolakton (PCL) s CB. Piezorezistivní senzory zhotovené pomocí FDM mají výrazně menší rozsah snímání deformace, než je tomu u senzorů tištěných pomocí DIW. Další nevýhodou je vodivá anizotropie, nižší rychlost tisku a nižší možné rozlišení [25].

Klíčovou roli v FDM tištěných tenzometrech hraje mesostruktura, včetně mezivláknových dutin a orientace vláken, které vznikají během tisku a mají významný vliv na výsledné vlastnosti senzoru [27]. Mezi materiály využívané pro výrobu 3D tištěných tenzometrů patří PLA/CB [27], TPU/MWNT, ABS/grafen, nebo také PLA s grafenovým plnivem ve formě nanotyčí (GNR) [25].

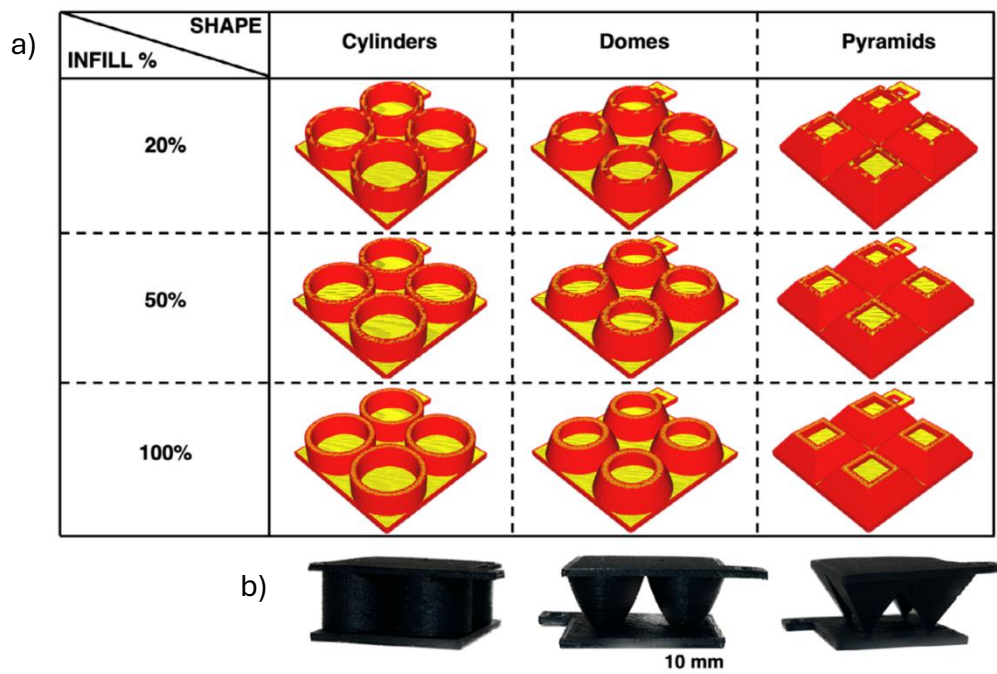
Pro piezorezistivní senzory tištěné pomocí DIW se používají viskózní vodivé inkousty, jako například nanopartikulární inkousty, inkousty na bázi uhlíku, nebo dokonce tekuté kovové pasty. Tato metoda je zvláště vhodná pro výrobu vysoce flexibilních a roztažitelných senzorů a umožňuje také nanášení vodivých vrstev i na nerovné povrchy [25]. Jako příklad Piezorezistivního senzoru tištěného pomocí technologie DIW uvádí zdroj [25] tisk vodivých vrstev na špičky prstů pro hmatové senzory. Nevýhodou piezorezistivních senzorů zhotovených pomocí DIW je nutnost post-processingu (sintrování a sušení) a také pre-processingu (formulace inkoustů), což prodlužuje dobu výroby [25].

Tlakové senzory

Byly vyvinuty plně 3D tištěné deformovatelné tlakové senzory pomocí technologie FDM. Zdroj [31] popisuje senzory, které se skládají ze dvou vzájemně do sebe zapadajících vrstev (prvků A a B), které jsou vytvářeny ve dvou krocích. Prvek A tvoří plochou základnu a prvek B může mít různé varianty s jehlanovými, kopulovitými, nebo válcovými tvary, které obsahují různý podíl infillu (20 %, 50 %, 100 %). Oblast výplně je na obrázku X zvýrazněna žlutou barvou, zatímco plochy jsou červené. Při kompresi senzoru dochází ke změně počtu kontaktních bodů, což má za důsledek změnu elektrického odporu senzoru. Tyto senzory byly vytištěny pomocí filamentu Filaflex, což je termoplastický TPU s rozptýlenou lampovou černí, což je specifický typ CB. Tyto senzory vykazují vysokou citlivost na nízké tlaky, menší než 22 kPa.



Obrázek 10 – Elementy typu A a B tlakového senzoru [31]



Obrázek 11 – a) Ilustrace strukturálních rozdílů kontaktního prvku B a všech tvarů výplně senzorů b) Vzhled výsledných senzorů [31]

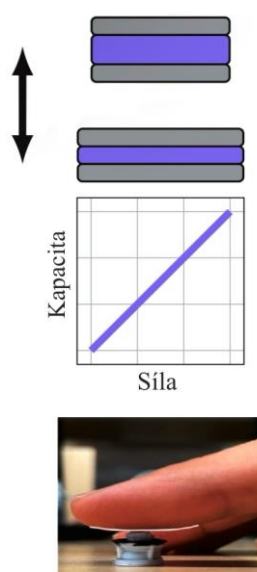
Kromě výše uvedeného modelu je možné vytvářet i jiné typy tlakových senzorů, jako například flexibilní odporové senzory s voštinovým designem z TPU a grafenových nanoplátek atd.

1.6.2.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory typicky obsahují dvě, nebo více vodivých elektrod, které tvoří kondenzátor. Změna kapacity může nastat v důsledku změny vzdálenosti mezi elektrodami, změnou efektivní plochy překrytí elektrod, nebo změny dielektrické konstanty materiálu. Kapacitní senzory mohou vykazovat vysokou citlivost a linearitu. [32]

Příkladem je kapacitní akcelerometr, nebo tzv. smart cap, popsaný ve zdroji [25], který obsahuje integrovaný induktor-kapacitní senzor. Pro detekci využívá změny dielektrické konstanty. Tato změna nastává, když je obal s potravinou vystaven faktorům způsobujícím znehodnocení. Měření dielektrické konstanty může senzor určit kvalitu tekutin. Například při použití ke sledování kvality mléka bylo možné pomocí senzoru detekovat 4,3% frekvenční posun během 36 hodin.

Kapacitní senzory pro měření hladiny kapalin jsou vytvářeny 3D tiskem struktur s integrovanými elektrodami, které tvoří kondenzátor. Změna hladiny kapaliny ovlivňuje kapacitu senzoru díky dielektrické konstantě kapaliny, což senzoru umožňuje určení hladiny kapaliny. Jako příklad materiálů využívaných pro tvorbu kapacitních senzorů si můžeme uvést například ABS/Cu pro senzory snímající působící sílu, Visijet EX200 pro indikaci kažení potravin a TPU/CNT pro tvorbu senzorů určujících hladinu kapaliny [25]. Na obrázku je zobrazen další z kapacitních senzorů. Konkrétně se jedná o tlakový kapacitní senzor, u kterého dochází ke změně elektrické kapacity vlivem mechanického tlaku. Tato změna kapacity je následně změřena a převedena na elektrický signál, který odpovídá detekovaného tlaku.



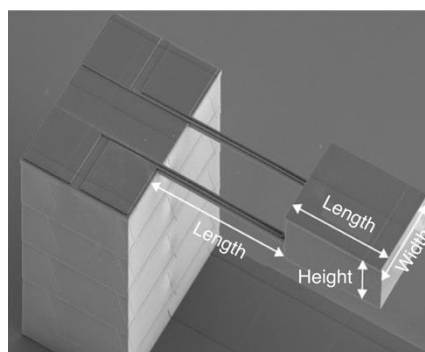
Obrázek 12 – Schéma principu fungování kapacitního tlakového senzoru [24]

1.6.2.3 Akcelerometry a Teplotní senzory

Akcelerometry

Akcelerometry se měří změna rychlosti pohybu objektů, což umožňuje detekovat otřesy, nárazy, směr a intenzitu zrychlení, sklon a orientaci v prostoru. [33] Tyto MEMS (mikro-elektromechanické systémy) se tradičně vyrábí metodou leptání křemíkových destiček. Tento proces

je však nákladný a časově náročný a jeho možnosti přizpůsobení jsou značně omezené [25]. 3D tisk se ukázal, jako nákladově efektivnější a rychlejší přístup pro výrobu MEMS zařízení [25, 34]. Příkladem je kapacitní akcelerometr popsáný ve zdroji [25], jehož komponenty byly tištěny pomocí PLA filamentu. K metalizaci těchto tištěných dílů byl použit speciálně formulovaný vodivý inkoust, který je vhodný pro nízkoteplotní spékání při teplotě 150 °C. Ten umožnil vytvoření vodivých filmů s rezistivitou $6,5 \times 10^{-4} \Omega$ po 30 minutách spékání. Vytisknutý akcelerometr vykazoval citlivost 46,8 mV/g s chybou nelinearity 4,06 % a prokázal slibný výkon ve sledování lidských aktivit, jako běh a skákání, což ho činí ideálním pro využití jako například krokoměr.



Obrázek 13 – SEM snímek struktury 3D tištěného akcelerometru [34]

Zdroj [25] rovněž popisuje tříosý odporový akcelerometr, který byl vyroben pomocí extruze termoplastického materiálu, schopný měřit zrychlení v rozsahu 10–50 m/s². Tento design umožňuje snadné přizpůsobení, díky možnosti kombinace různých materiálů pro jednotlivé komponenty senzoru. Nevýhodou těchto senzorů je riziko vznikání komplikací způsobených setrvačnými efekty a pohybem kolektorů, což ovlivňuje výkon senzoru.

Teplotní senzory

Funkčnost teplotních senzorů je založena na nanomateriálech, které jsou kombinovány s 3D tiskem a disponují jedinečnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Zdroj [30] popisuje odporový teplotní senzor s lineární odezvou vytisknutý pomocí FDM technologie. Pro tento senzor byl využit kompozitní filament z PLA s GNR. Senzor umožňuje monitorování změny teploty sledováním změny elektrického odporu. Je vhodný pro použití na vzduchu i pod vodou bez nutnosti dodatečného zapouzdření díky odolnosti PLA vůči vodě. Sensory tohoto typu vykazují výjimečnou stabilitu při testování v obou prostředích při teplotě až do 70 °C. To je činí vhodnými pro monitorování životního prostředí jak ve vodním, tak i suchozemském prostředí.

Tato studie se také zabývala vývojem ekonomického termoplastického vodivého kompozitu, který byl transformován do filamentární struktury vhodné pro FDM. Prototypy polymerního teploměru a senzoru ohybu ukázaly potenciál materiálu pro sensorické aplikace, a to zejména v oblasti nositelných zařízení a snímání teploty. Tyto filamenty jsou vhodné pro teploty až do 130 °C. Zdroj bohužel konkrétně neuvádí, jaké materiály byly využity pro vývoj těchto filamentů.

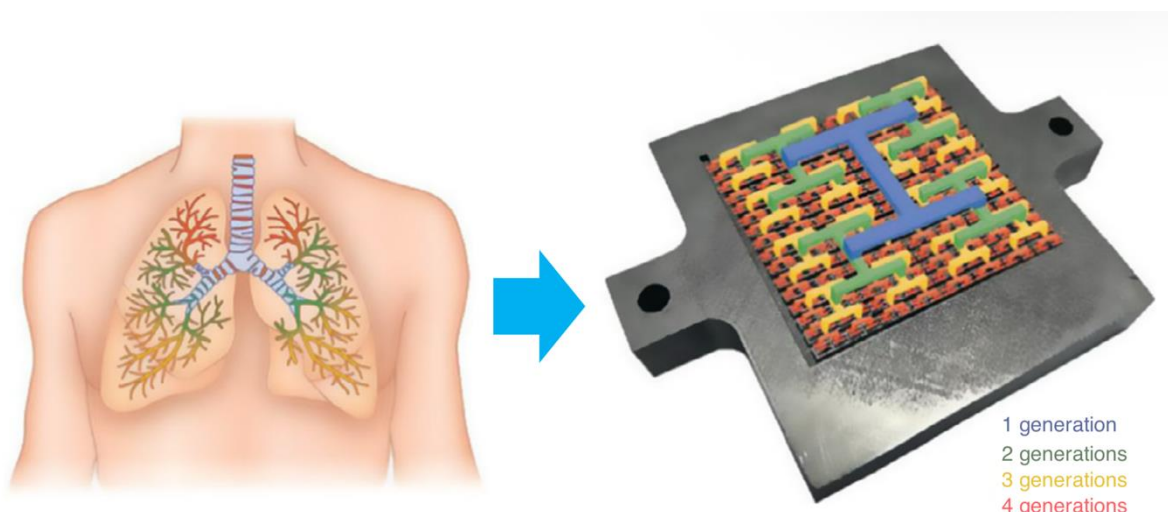
1.6.3 3D tištěné struktury pro generování energie

3D tisk se představil jako slibná technologie pro výrobu struktur umožňující výrobu energie, a to díky možnosti vytvářet složité struktury v různých měřítcích (od mikroskopických po makroskopické). Tyto 3D tištěné struktury mohou výrazně zlepšit výkon zařízení způsobem, který by byl tradičními výrobními technologiemi jen těžko dosažitelný. Energetická zařízení vytvořená pomocí 3D tisku mohou sloužit pro výrobu energie (generaci), její přeměnu (konverzi) nebo ukládání.

1.6.3.1 3D tištěné struktury pro palivové články

3D tiskem se dají zhotovovat palivové články, které vyrábějí elektrickou energii prostřednictvím elektrochemické reakce paliva s oxidantem. Při této reakci vzniká voda jako vedlejší produkt. To z nich činí slibnou technologii pro udržitelnou budoucnost. Konvenční způsoby přípravy palivových článků mají omezení v rozlišení, mechanických vlastnostech, nákladech a tvorbě složitých mikrostruktur, které je možné 3D tiskem překonat.

Zdroj [35] uvádí jako příklad design průtokového pole pro polymerní elektrolytické palivové články (PEFCs) inspirovaného plícemi. Byl navržen tak, aby řešil problém s nerovnoměrným prouděním reaktantů. Struktura tohoto typu má řešit problém s nerovnoměrnou distribucí plynu a nižšího poklesu tlaku ve srovnání s konvenční serpentinnou (hadovitou) strukturou. Využití 3D tisku vedlo k cca 30% zvýšení hustoty výkonu. Tato struktura inspirovaná plícemi byla vytištěna metodou FDM. Zatímco zdroj popisuje tuto strukturu vytištěnou FDM, na obrázku 14 je zobrazena tatáž struktura, ale za použití nerezové oceli a technologie PBF.

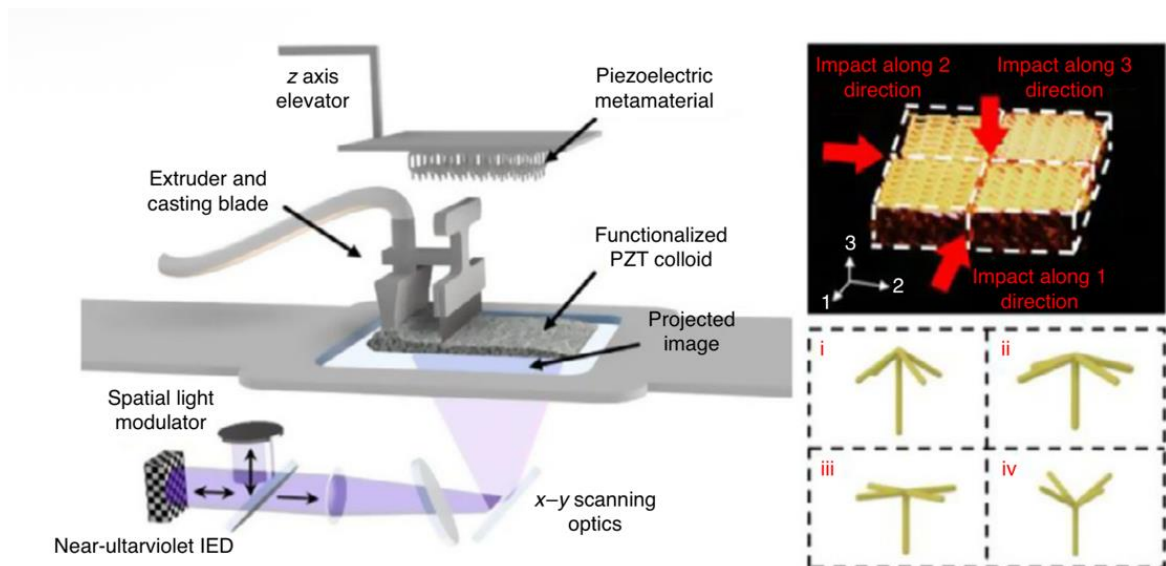


Obrázek 14 – Struktura palivového článku inspirovaného strukturou plic [35]

1.6.3.2 3D tisk piezoelektrických struktur

Piezoelektrické materiály dokážou měnit mechanickou energii (například tlak nebo vibrace) na elektrickou a naopak. To z nich činí ideální materiály pro využití v oblastech, jako jsou senzory, akumulátory a zařízení pro sběr energie. 3D tisk představuje velmi slibný pokročilý proces pro produkci piezoelektrických zařízení, protože umožňuje vytvářet složité tvary s přesně nastavitelnými vlastnostmi.

Příkladem je PTZ nanokompozit, který využívá složité 3D struktury a libovolné tenzory piezoelektrických koeficientů (veličiny, které určují, jak silně materiál reaguje na mechanické působení). Tento nanokompozit popisuje zdroj [35]. Byl vytvořen pomocí technologie DLP (Digital Light Processing). Na rozdíl od konvenčních piezoelektrických materiálů, kde je piezoelektrická nábojová konstanta určena krystalovou strukturou složkových materiálů, je ve zdroji popsán přístup k modifikaci piezoelektrického koeficientu uspořádáním sad piezoelektrických jednotek do specifických prostorových vzorů.

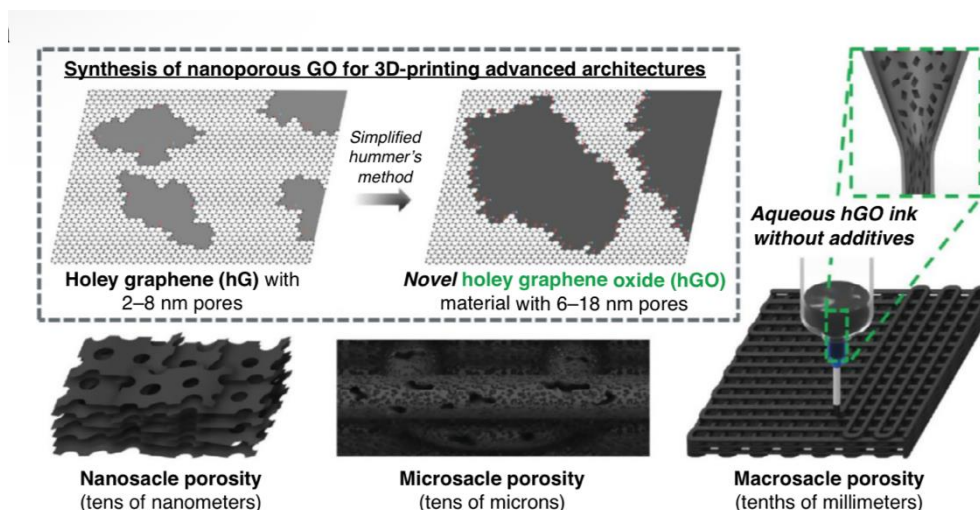


Obrázek 15 – 3D tisk piezoelektrických materiálů s vysokým rozlišením pomocí DLP s možností změny elektrických vlastností v závislosti na směru [35]

1.6.3.3 3D tisk akumulátorů

Baterie generují elektrickou energii přeměnou chemické energie prostřednictvím redoxních reakcí (reakcí s přenosem elektronů) na anodě a katodě. Tento proces umožňuje ukládání energie. 3D tisk umožňuje zlepšení výkonu, životnosti a řešení problémů baterií, které nelze aplikovat na baterie vyráběné současnými výrobními metodami.

Jako příklad uvádí zdroj [35] perforované mřížkové struktury v různých měřítcích pro Li-O₂ články (lithium-vzduchové baterie). Tento přístup využívající 3D tisk je silně spojen s technikou DIW (Direct Ink Writing). Na obrázku 16 jsou zobrazeny hierarchicky porézní pokročilé elektrody baterií, které jsou spojeny s materiálem z hydrofilního oxidu grafenu. Tento systém byl navržen pro Li-O₂ katodu. Tento přístup vedl k výrobě baterie pro 3D tištěnou Li-O₂ katodu, která vykazovala až 42násobné zvýšení výkonu, než je tomu u konvenční konfigurace 2D vakuovaného filtrovaného filmu.



Obrázek 16 – Schematické znázornění procesu syntézy a nano-, mikro- a makroporozity [35]

1.6.4 Nositelné technologie a funkční struktury

Elektricky vodivé filamenty mají vysoký potenciál také pro tisk flexibilní a nositelné technologie, díky jedinečným elektrickým a mechanickým vlastnostem. Umožňují vytvářet komplexní struktury s integrovanými funkcemi.

Flexibilní materiály

Vodivé polymery jsou tzv. chytré materiály, které jsou ideální pro flexibilní elektroniku díky možnosti ladění elektrických, optických a elektrochemických vlastností. U 3D tištěných vodivých polymerů je možné zachovat jejich vodivostní vlastnosti i po 10 000 cyklech ohýbání. Jak je řečeno ve zdroji [36], je možné dosáhnout vysoké pružnosti (až 13 % v suchém stavu a 20 % v hydrogelu) bez porušení vodivostních vlastností. Flexibilita materiálů je užitečná při dlouhodobé biomechanické interakci mezi biologickou tkání a bioelektrickými zařízeními, nebo implantáty.

Termoplastické elastomery jako například TPU se běžně využívají pro tisk flexibilních senzorů. Může se jednat například o TPU/CNT senzory, které mohou využívat auxetické struktury (možnost roztažnosti ve více směrech) pro zvýšení pružnosti. [36]

1.6.4.1 Vat Photopolymerization

Jak už bylo řečeno dříve, 3D tištěné polymery nachází uplatnění v tzv. nositelných zařízeních. Typicky se jedná například o oděvy a stélky do bot s integrovanými vodivými prvky. Díky

vysokému rozlišení se často využívá technologie vat photopolymerization (např. SLA) v kombinaci s FDM k výrobě jemných a detailních polymerních částí, které mohou tvořit flexibilní prvky nositelné elektroniky. Důležitou součástí nositelné elektroniky jsou také flexibilní superkondenzátory (FSCs), jejichž dominantou je mechanická pružnost, dlouhá životnost a rychlé nabíjení a vybíjení. Díky 3D tisku je také možné vytvářet jednorozměrné FSCs (1D FSCs), které lze zaplétat do textilií. Piezorezistivní senzory vyráběné pomocí vodivého FDM tisku se mohou využívat například k monitorování lidské aktivity, nebo k hmatovému snímání.[36]

1.6.4.2 Integrované spoje a funkční struktury

3D tisk usnadňuje výrobu detailních a vícemateriálových struktur z vodivých materiálů. Umožňuje přizpůsobit velikost a tvar strukturální elektroniky a vyrábět mikroelektronické součástky a obvody [36]. Díky možnosti multimateriálového tisku pomocí technik FDM a DIW, kdy je možné automaticky přepínat mezi vodivými a nevodivými materiály, lze efektivně vyrábět 3D funkční elektroniku. Tímto způsobem je možná jednokroková výroba senzorů. Některé systémy (např. 6-osé FDM/DIW) umožňují tisk na 3D povrchy (tzv. konformní tisk), což je ideální pro nositelnou elektroniku a konformní senzory, které se dokážou se přizpůsobit tvaru povrchu. [24]

Tisk pomocí FDM umožňuje integraci elektrických drah přímo do struktury 3D tištěných objektů, což poskytuje značnou svobodu návrhu ve třech rozměrech. Tímto způsobem je možné vytvářet mikro-, nebo dokonce nanostruktury jednoduchým, flexibilním a programovatelným způsobem. [36]

1.7 Výzvy a perspektivy

V oblasti 3D tisku, zejména v oblasti elektronických a funkčních systémů, se výzkum neustále snaží překonávat technologické limity a zároveň se dynamicky rozvíjejí budoucí inovace v materiálech, tiskových technikách a sériové výrobě.

1.7.1 Technologické limity (adheze, homogenita vodivosti, přesnost)

Hlavními technologickými problémy v FDM technologii jsou problémy s adhezí a mechanickými vlastnostmi. Klíčovou výzvou je především nízká mezivrstvová adheze (soudržnost mezi jednotlivými vrstvami), která je způsobena charakteristickým vrstvením materiálu [29,32]. Slabé mezivrstvové spojení je obzvláště kritické při tisku z více materiálů, čímž je ovlivněna celistvost tištěných objektů [29]. Zároveň musíme brát v potaz procesy po

tisku, jako je tuhnutí a ochlazování. Tyto procesy mohou způsobovat smrštění a zkreslení tištěných elektrolytů [35]. Nízká homogenita kompozitních materiálů může způsobovat delaminaci (oddělení vrstev) a křehký lom (lámání bez deformace), což je známka špatné adheze [29]. Jak už bylo řečeno dříve v této práci, funkční plniva, která jsou zaváděna do polymerní matrice může mít negativní vliv jak na pevnost filamentu, tak na pevnost vrstevového spoje, ve srovnání s původním, nekompozitním materiálem. I když je vyšší koncentrace plniva žádoucí, kvůli dosažení požadovaných vlastností filamentu, po překročení perkolace může docházet k těmto problémům. Tištěné vodivé prvky, jsou při vyšší deformaci náchylné k lomu a tím způsobenému nárůstu elektrického odporu, což snižuje jejich využitelnost [25].

Závažným problémem je také homogenita vodivosti a anizotropie. Při formulaci tisknutelných inkoustů a filamentů je často nutné přidávat různá aditiva jako polymerní pojiva a reologické modifikátory. Jejich přidáním, ale dochází ke snížení podílu funkčních plniv a tím potenciálně degradovat požadované vlastnosti materiálu [35]. V FDM tiskárnách vybavených míchacími tryskami může důsledkem nerovnoměrného míchání vysoce viskózních polymerů docházet k nehomogenním vlastnostem tištěné vrstvy. Při vytlačování dochází v trysce k laminárnímu toku, který brání konvenčnímu míchání, čímž dochází k extrémně malé míchací zóně a shlukům plniva v matrici [29]. U FDM senzorů je navíc vodivost závislá na směru vytlačování filamentu (vodivá anizotropie) [25].

V tištěných vodivých termoplastech může také docházet k tvorbě dutin, které jsou způsobeny nedokonalou adhezí mezi sousedními vrstvami filamentu a významně ovlivňují vodivost výsledného objektu. Z toho důvodu vykazují nejnižší efektivní rezistivitu a příčné vzorky nejvyšší, což brání toku proudu. Vyšší poréznost navíc vede ke zvýšení odporu a náchylnosti k deformacím [27]. Elektrické vlastnosti jsou také výrazně ovlivněny parametry tisku, jako je režim tisku, teplota, směr a typ výplně. Kvůli změně vodivých drah během tisku vykazují tištěné objekty nižší vodivost než samotné filamenty. Kvůli tomu nemůžeme usuzovat, že když samotný filament vykazuje dobré vodivostní vlastnosti, že to tak bude i u tištěného objektu [28].

Přesnost tisku a rozlišení mají také zásadní vliv na výsledné vlastnosti tištěného objektu. Standardní FDM tiskárny mají typicky minimální průměr trysky 200 μm a průměr filamentu 170 μm , což umožňuje tisk nejnižší vrstvy okolo 150 μm . Kvůli těmto rozměrům je dosažitelné rozlišení výrazně limitováno. Regulace mechanických vlastností 3D tištěných materiálů je obecně složité regulovat. Z toho důvodu je pro jejich zlepšení využíváno jiných

technologických postupů pro výrobu materiálů, které umožní dostatečnou přesnost i pro výrobu mikrozařízení [35].

Konvenční FDM tisk je limitován ve výrobě senzorů pro vysoké deformace, kvůli omezením v kompatibilitě s flexibilními materiály. Jak je popsáno ve zdroji [25], v porovnání mezi senzory tištěnými pomocí FDM a DIW, vykazují FDM tištěné senzory výrazně menší rozsah snímání deformace. Zároveň dosahuje tisk FDM senzorů nižších rychlostí a nižšího rozlišení než u DIW. Proto se v případech, které vyžadují velmi jemné detaily využívá jiných technologií, jako například dvou-fotonová polymerace (2PP). Pomocí technologie 2PP je možné vytvářet nanorozměrové struktury s velikostí nejmenšího bodu až 0,1 μm . To ale za cenu nižší rychlosti, vyšších nákladů a možnosti pracovat jen v malém měřítku [37].

1.7.2 Budoucí vývoj (inovace materiálů, tiskové techniky, sériová výroba)

I přes zmíněné výzvy se oblast elektricky vodivého FDM tisku dynamicky vyvíjí a nabízí různé perspektivy budoucího pokroku v inovacích materiálů, tiskových technik i škálovatelnosti výroby.

Zdroj [35] popisuje umožnění začlenění nových materiálů jako CNT a grafen pro dosažení požadovaných elektrických a mechanických vlastností v oblastech inovace materiálů a funkčních struktur. V dnešní době probíhá intenzivní výzkum mechanicky robustních CNT a grafenových elektrod. Ty řeší problémy s pevností a spolehlivostí.

V oblasti elektrolytových baterií se vývoj vydává směrem pevných polymerních elektrolytů, využívajících 3D-Archimedovskou spirálovou strukturu, která zajišťuje kratší transportní cestu iontů, zároveň s vylepšením adheze rozhraní a flexibility [35].

Pro budoucí vývoj je klíčové také zvyšování rozlišení, mechanické pevnosti a optimalizace inkoustů (pro DIW). Je stále nezbytné prohlubovat porozumění výkonným, výchozím materiálům, a to zejména funkčním filamentům a tisknutelným inkoustům. Výzkum se stále zaměřuje na ladění vlastností a vývoj nových kompozitních filamentů se specifickými dielektrickými vlastnostmi a antibakteriálními funkcemi. Jako příklad materiálu se specifickými dielektrickými vlastnostmi uvádí zdroj [32] BST/ABS (Baryum Stroncium Titanát/ABS) pro radiofrekvenční a telekomunikační aplikace. Vzhledem k tomu, že se čím dál více dbá na ekologii, výzkum se ubírá i směrem ekologických a biologicky rozložitelných

filamentů. Ty mohou být například na bázi oxidovaného kukuřičného škrobu, nebo směsi škrob/PLA/PBAT (Polybutylen-adipát-ko-tereftalát).

V oblasti inteligentních senzorů umožňuje 4D tisk (3D tisk, kde se tištěný objekt dokáže samovolně měnit v čase = 4. rozměr) výrobu senzorů, které vykazují vysokou citlivost na změnu elektrických signálů a dokážou se přizpůsobovat zakřiveným povrchům [32]. Spojením 3D tisku a chytrých materiálů vznikají nové možnosti pro interakci s prostředím, vývoje inovativních řešení a zlepšení kvality života. Tyto materiály mají potenciál zásadně proměnit snímací technologie díky výjimečné citlivosti na vnější podněty [37].

Energetická zařízení standardně obsahují více než 3 samostatné části. Z toho důvodu je velký zájem o vícemateriálový 3D tisk, díky kterému je možné vyrobit kompletní elektronické zařízení během jednoho tisku [35]. Inovace tiskových technik a procesů se proto zaměřuje na hybridní technologie, kombinující dvě vzájemně se doplňující techniky za účelem plynulé výroby několika komponent současně [35,29]. Jako příklad si můžeme uvést například blended FDM (b-FDM), které popisuje zdroj [29]. B-FDM využívá digitální materiálové filamenty (tzv. DM filamenty), díky čemuž je možné přesné řízení funkčních gradientů v různých vlastnostech materiálu. Tímto způsobem se můžou během tisku měnit parametry jako barva, mechanická pevnost, nebo elektrická vodivost. Hlavní výhodou této technologie je, že není nutné využívat drahých, nebo specializovaných 3D tiskáren a pomocí standardní FDM tiskárny vytvářet objekty s prostorově měnícími se vlastnostmi, a to za použití několika komerčně dostupných filamentů [29].

Aby bylo možné dosáhnout vyššího rozlišení, zejména u hierarchických pórovitých struktur v nanometrovém rozsahu, je nutný další rozvoj sofistikovaných 3D tiskových technologií, nebo kompozitních řešení [35].

V posledních letech se stále častěji využívá umělé inteligence (AI) a strojového učení (ML). Například u technologie PBF je možná fúze dat ze senzorů v reálném čase, která umožňuje detekci defektů a automatickou optimalizaci tiskových parametrů. Předpokladem je, že AI a ML budou hrát ústřední roli v řízení příští generace udržitelné aditivní výroby a představují slibnou oblast pro budoucí rozvoj. AI a ML se už částečně využívá, nebo bude využívat zejména k optimalizaci tiskových procesů, automatické detekce defektů, jejich řešení, predikce problémů a k inovaci materiálů a funkčních struktur [32]. Klíčová je také predikce termo-

elektricko-mechanického chování tištěných komponent a optimalizace multifunkčního výkonu úpravou tiskových parametrů a vzorů, což umožňují například in-silico platformy [27].

Dalšími předpoklady pro budoucí vývoj funkčního 3D tisku je přístupnost, flexibilita materiálů a zdokonalování samotných technologií. To povede ke zrychlení pokroku a širšímu využití 3D tištěných elektronických zařízení [35].

Z hlediska sériové výroby a škálovatelnosti má 3D tisk potenciál překonat omezení konvenčních výrobních technik, jako složitost procesu, dlouhá doba výroby, vysoké náklady a užitku materiálu. Využívání 3D tisku může vést k nižšímu podílu odpadu a nižších nákladů při hromadné výrobě [35, 38]. I přes dosavadní omezení, panuje předpoklad, že budoucí pokroky ve 3D tisku povedou k rozšíření jeho uplatnění a škálovatelnosti v různých průmyslových odvětvích [35].

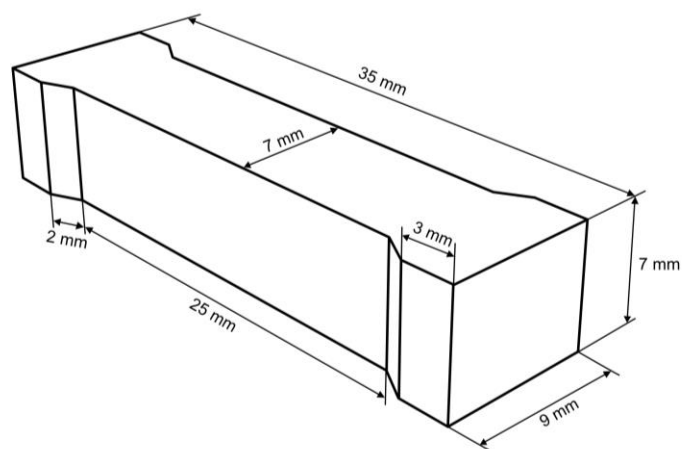
Jedním z hlavních cílů je zvýšení rychlosti a možnosti velkoobjemové výroby tištěných struktur pomocí funkčního 3D tisku. Plná realizace udržitelného potenciálu aditivní výroby zároveň závisí na souladu mezi technologickým pokrokem a politikou, průmyslem a enviromentálních priorit. Aditivní výroba tak může dosáhnout toho, že se vyvine v základní kámen cirkulární, zdrojově efektivní a nízkouhlíkové výroby [38]. Aditivní výroba s největší pravděpodobností nenahradí konvenční technologie výroby, ale bude s nimi koexistovat a doplňovat je tam, kde se konvenční postupy nevyplatí, nebo by byla jejich příprava technologicky příliš složitá.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

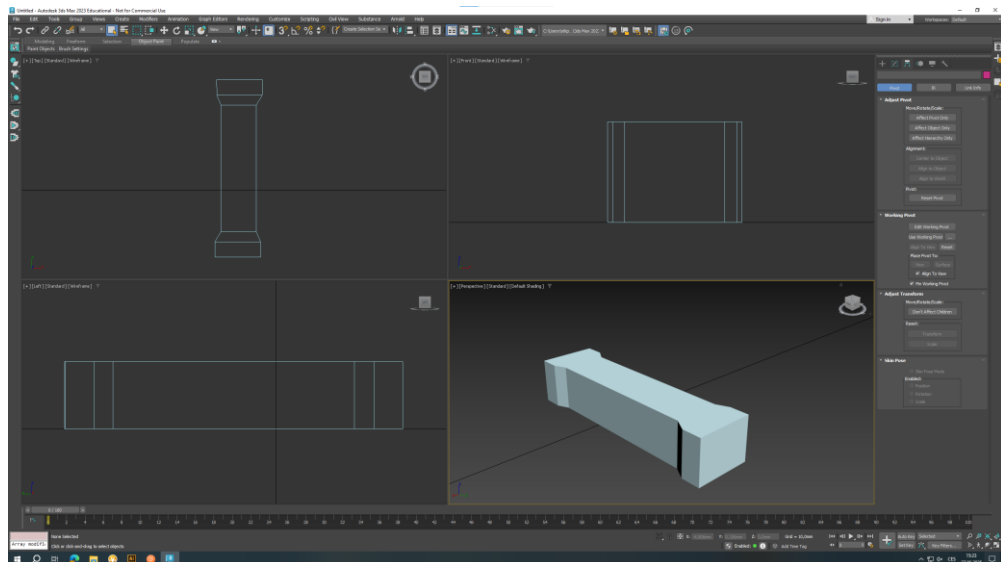
V experimentální části této práce byl zkoumán vliv infillu na elektrický odpor u zkušebních těles vytištěných pomocí FDM 3D tiskárny Prusa i3 MK3S+.

2.1 Příprava tiskových dat

Nejprve byl v programu Autodesk 3ds Max vytvořen model zkušebního tělesa ve tvaru dogbone (psí kost). Rozměry tělesa byly nastaveny tak, jak je zobrazeno na obrázku 9. Výsledný objekt byl poté exportován ve formátu *.stl a importován do programu Prusa Slicer.



Obrázek 17 – Rozměry zkušebního tělesa

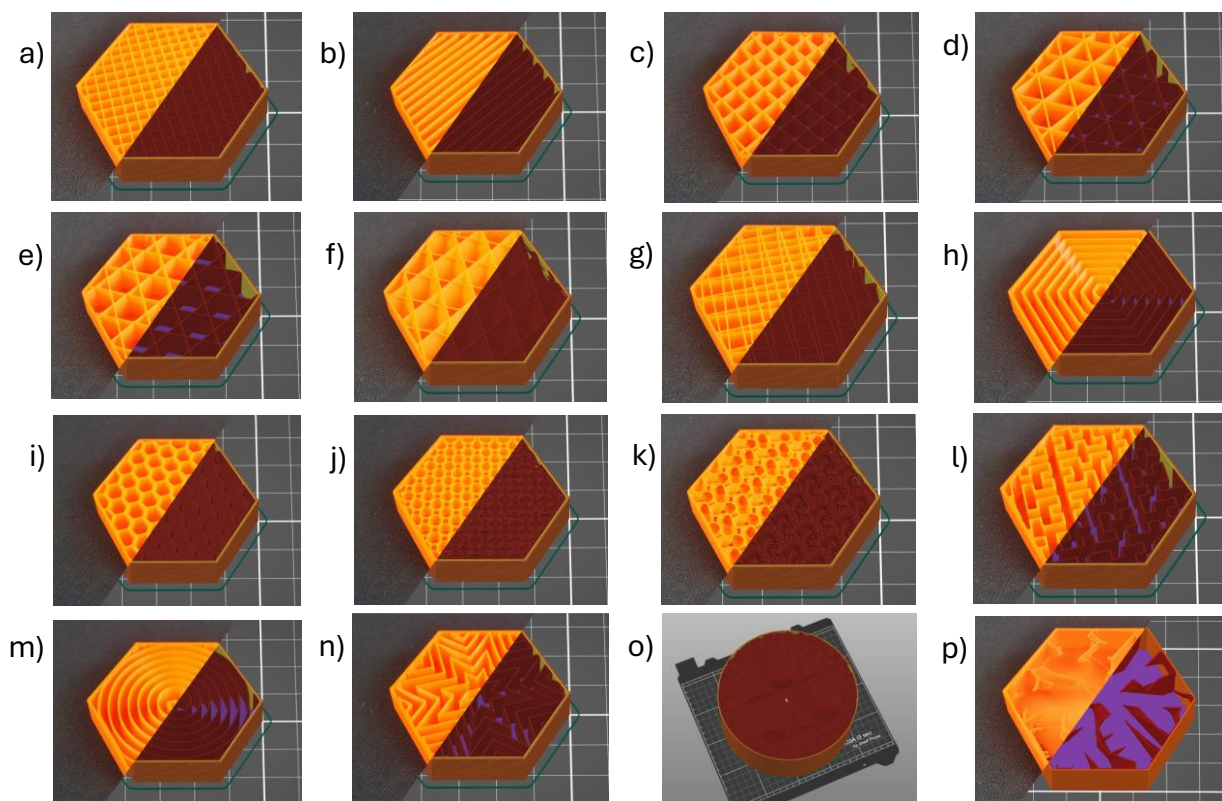


Obrázek 18 – Návrh modelu v programu Autodesk 3ds Max

V programu Prusa Slicer byly nastaveny nejprve ty parametry, které byly neměnné pro všechny výtisky. Konkrétně byly nastaveny tyto parametry:

Typ tiskárny Prusa i3 MK3S+, Typ filamentu Generic PLA, perimetr 1, počet stěn 1, Základní tisková vrstva 20, Minimální tloušťka vrstvy 0,4 mm, Velikost trysky 0,4 mm, Úhel výplně 90°, Teplota extruze 215 °C, Teplota tiskové podložky 60 °C.

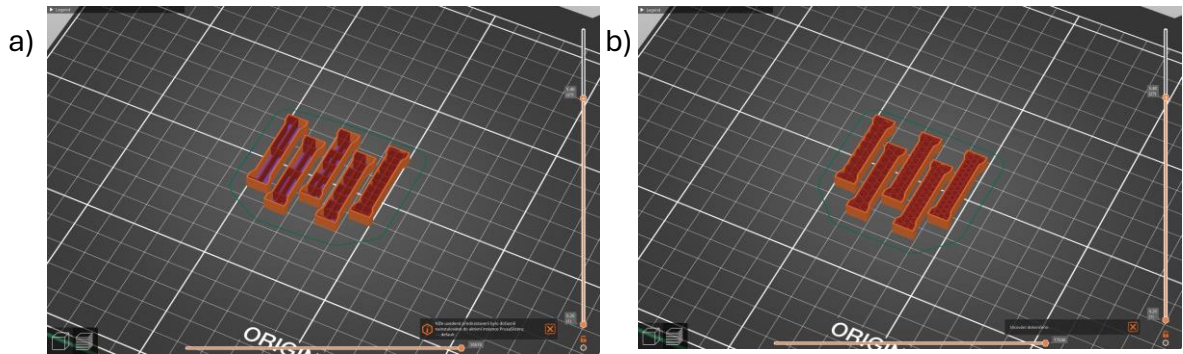
Poté co byly nastaveny tyto hodnoty, byly ve sliceru připraveny soubory, ve kterých se měnil už jen typ infillu a procenta infillu zkušebního tělesa. Byly připraveny soubory s několika testovacími tělesy, která měla 50% infill a měnil se jen typ výplně. Celkem bylo takto připravených 18 testovacích těles ve 4 souborech, které byly exportovány do formátu *.gcode.



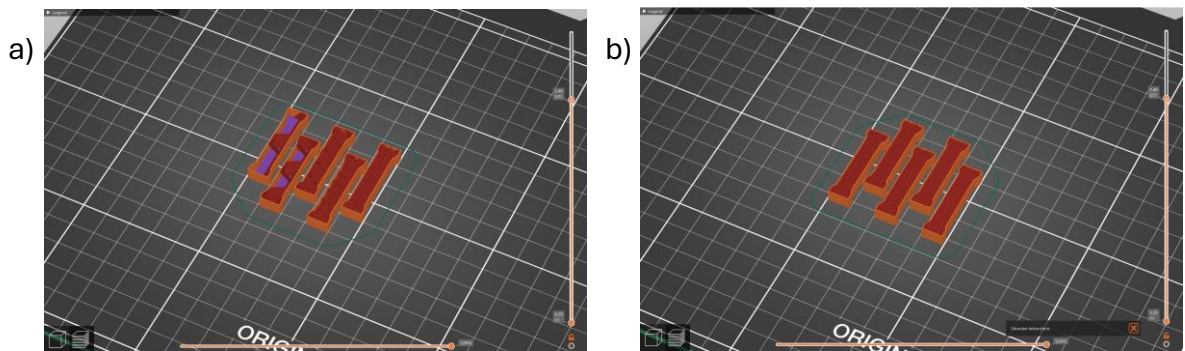
Obrázek 19 – Typy infillu: a) Přímočarý, b) Zarovnaný přímočarý, c) Mřížka, d) Trojúhelníky, e) Hvězdy, f) Kubický, g) Čára, h) Koncentrický, i) Plástev, j) 3D Plástev, k) Gyroid, l) Hilbertova Křivka, m) Archimedean chords, n) Octagram spiral, o) Kubický adaptivní, p) Lightning [39]

Následně byly připraveny 4 sady po dvou souborech. V každé sadě bylo 10 zkušebních těles se stejným typem výplně, které byly rozděleny do dvou souborů. Soubory obsahovaly tělesa s výplní 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %. Byly vybrány typy

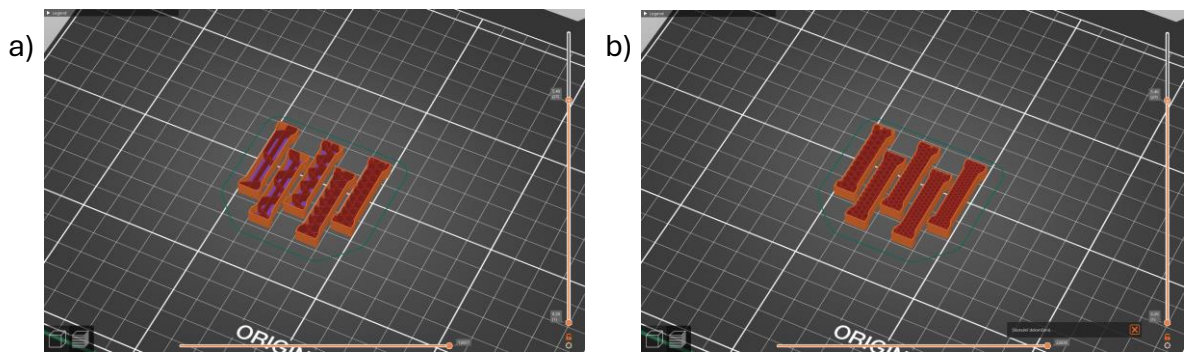
infillu: Mřížkový, Kubický, Hvězda a Koncentrický. Soubory byly také exportovány do formátu *.gcode.



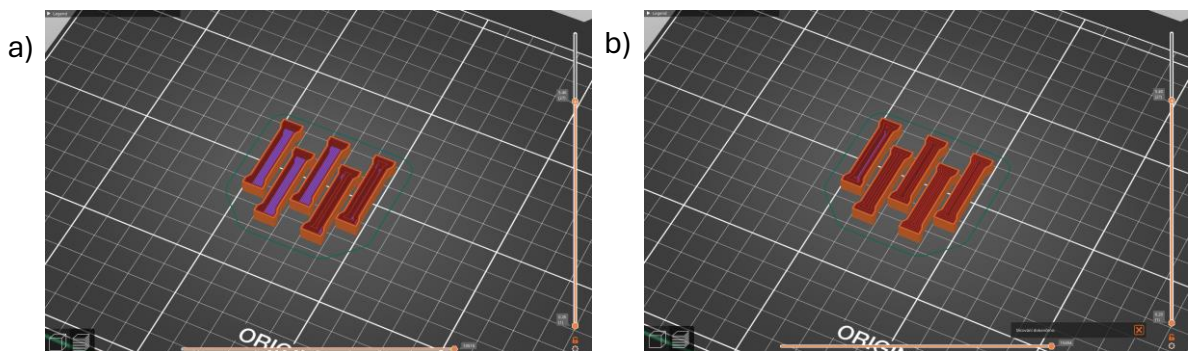
Obrázek 20 – Zkušební tělesa s mřížkovým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %



Obrázek 21 – Zkušební tělesa s kubickým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %

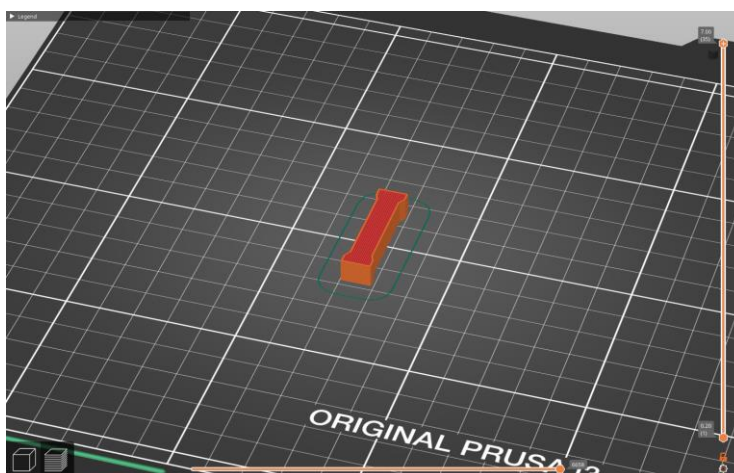


Obrázek 22 – Zkušební tělesa s infillem typu Hvězda: a) 5–40 %, b) 50–90 %



Obrázek 23 – Zkušební tělesa s koncentrickým infillem: a) 5–40 %, b) 50–90 %

Jako poslední byly pro tisk připraveny data s měnícím se parametrem násobiče extruze. Ten udává, kolik materiálu je reálně vytlačeno, oproti výpočtu ze sliceru. Jednotlivé soubory musely být připraveny, tak, že na jeden soubor připadalo pouze jedno testovací těleso. To bylo nutné, jelikož hodnota násobiče extruze se dá nastavit pouze na celý dokument, a ne na jednotlivé objekty, jako je tomu například u nastavení typu infillu. Bylo připraveno 11 souborů, které obsahovaly tělesa s násobičem extruze nastaveným od hodnoty 1,0 do 1,5 s krokem 0,05.



Obrázek 24 – Testovací těleso s nastavením násobiče extruze.

Všech 33 připravených souborů bylo přeneseno na SD kartu, čímž byly všechny data připraveny pro tisk.

2.2 Tisk testovacích těles

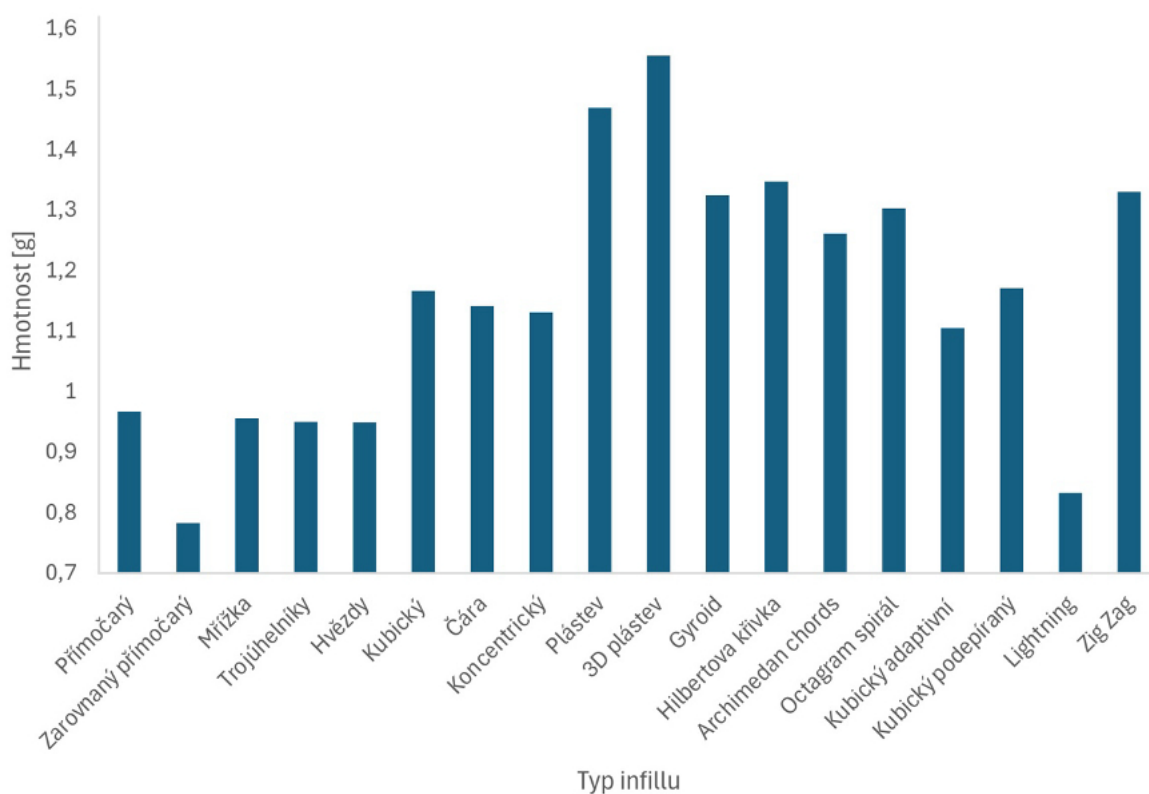
2.2.1 Kontrolní tisk pomocí nevodivého filamentu

Před samotným tiskem z vodivého filamentu bylo potřeba provést tisk pomocí konvenčního nevodivého filamentu. Cílem bylo ověření správného nastavení tiskových parametrů. Tento krok je nezbytný z důvodu vyšší ceny a citlivosti na změnu parametrů tisku vodivého filamentu.

SD karta byla zapojena do 3D tiskárny a byl zaveden klasický PLA filament. Po zavedení filamentu byl proveden samotný tisk jednotlivých sad. Po dokončení tisku byly testovací tělesa odstraněna z tiskové podložky, podložka byla očištěna a byl zapnutý tisk další sady. Všechna testovací tělesa byla zvážena na analytických vahách a označena štítkem s popisem typu a hustoty infillu. Tímto způsobem to bylo provedeno u všech tištěných sad. Získané hmotnosti jsou zobrazeny v tabulkách 1,2, 3, 4, 5, 6 a grafech 1,2, 3, 4, 5, 6.

Tabulka 1 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s různými typy infillu při podílu výplně 50 %

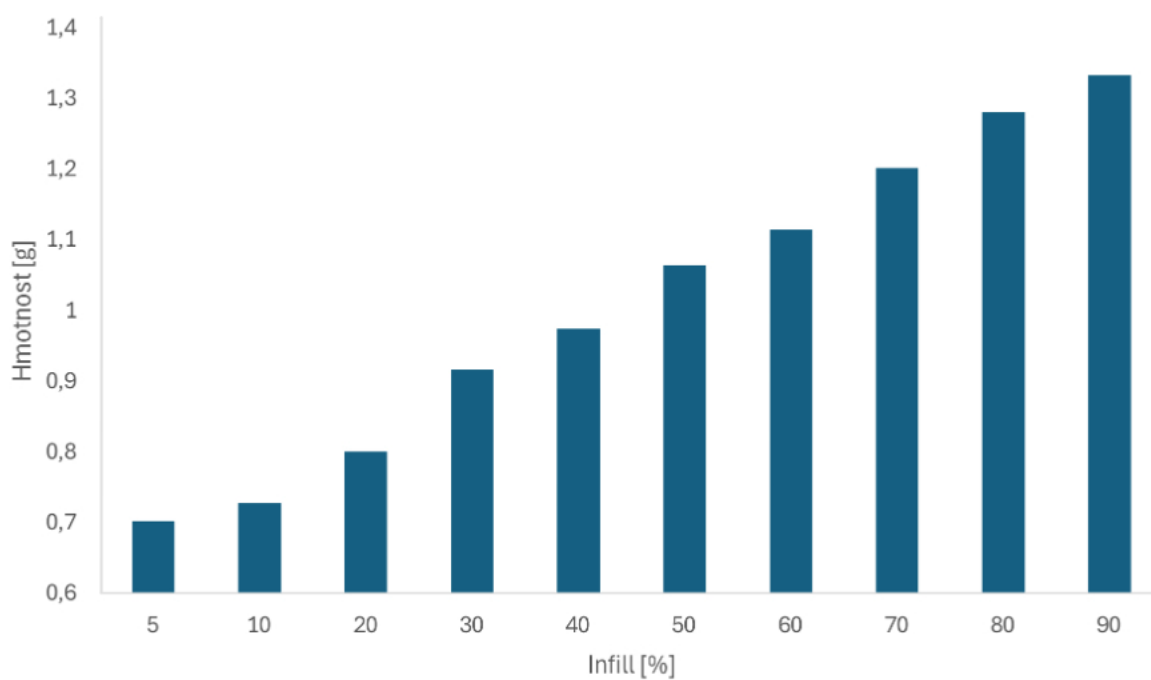
Typ infillu	Hmotnost výtisku [g]
Přímočarý	0,9685
Zarovnaný přímočarý	0,7832
Mřížka	0,9561
Trojúhelníky	0,9506
Hvězdy	0,9495
Kubický	1,1669
Čára	1,1416
Koncentrický	1,1320
Plástev	1,4699
3D plástev	1,5557
Gyroid	1,3253
Hilbertova křivka	1,3475
Archimedean chords	1,2622
Octagram spiral	1,3036
Kubický adaptivní	1,1061
Kubický podepíraný	1,1712
Lightning	0,8337
Zig Zag	1,3308



Graf 1 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s různými typy infillu při podílu výplně 50 %

Tabulka 2 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s mřížkovým infillem

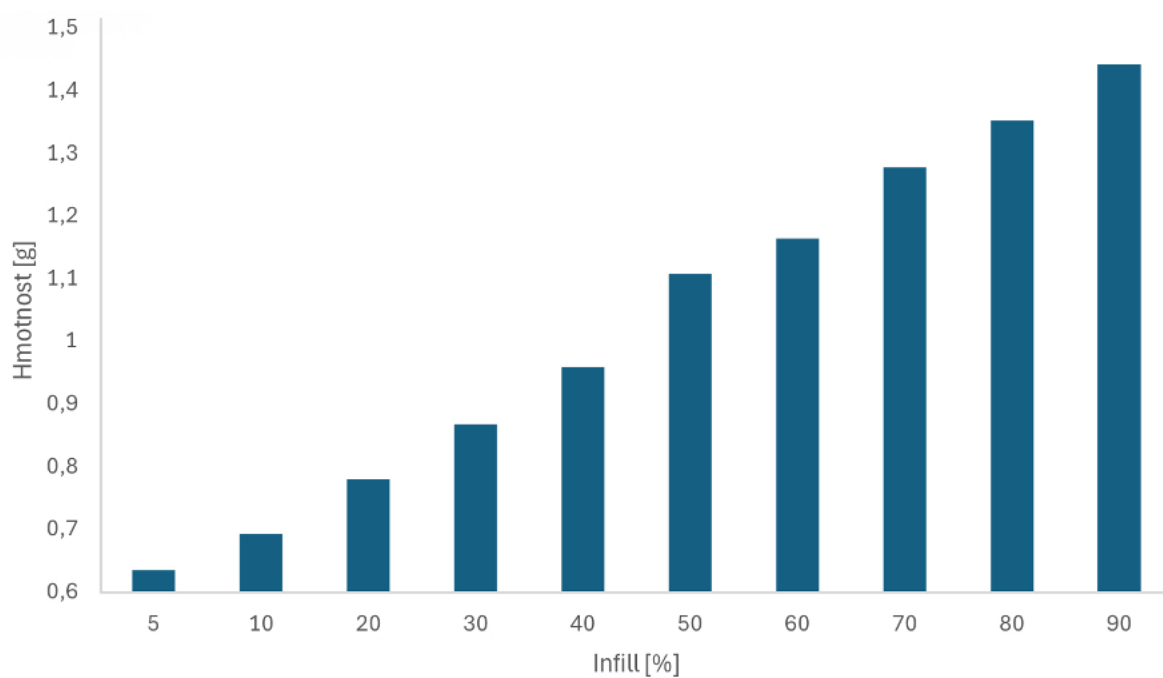
Infill [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,7023
10	0,7273
20	0,8004
30	0,9176
40	0,9754
50	1,0643
60	1,1148
70	1,2019
80	1,2818
90	1,3337



Graf 2 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s mřížkovým infillem

Tabulka 3 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s kubickým infillem

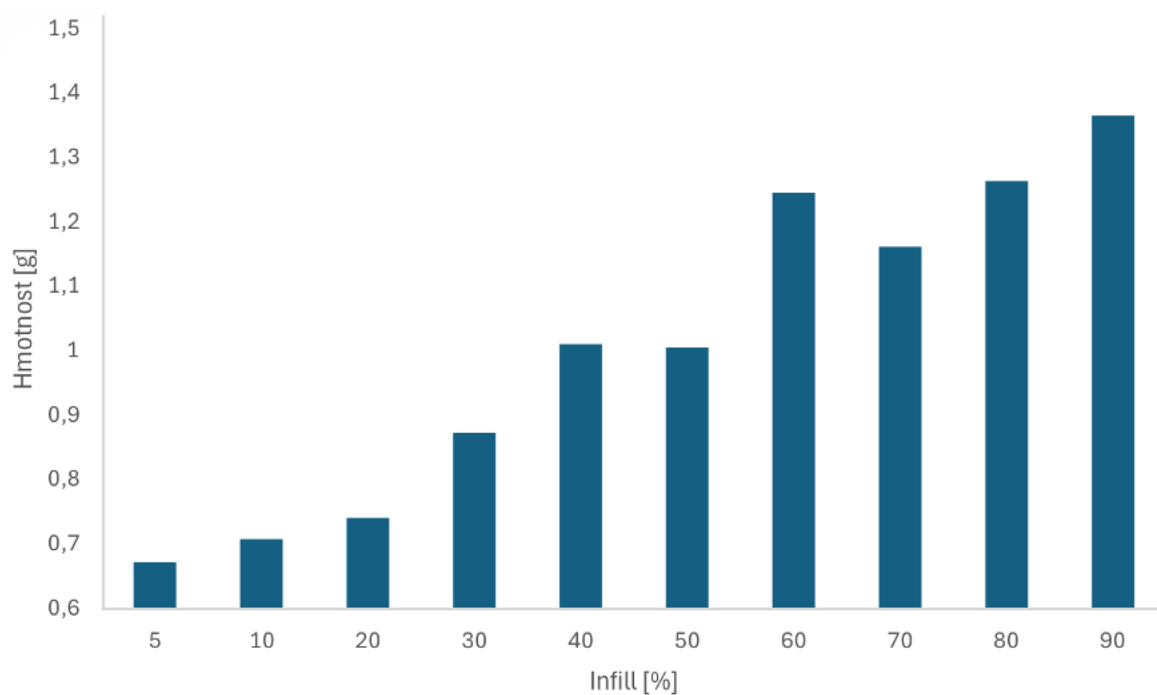
Infill [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,6361
10	0,6937
20	0,7809
30	0,8686
40	0,9598
50	1,1085
60	1,1654
70	1,2785
80	1,3534
90	1,4432



Graf 3 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s kubickým infillem

Tabulka 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s infillem typu hvězda

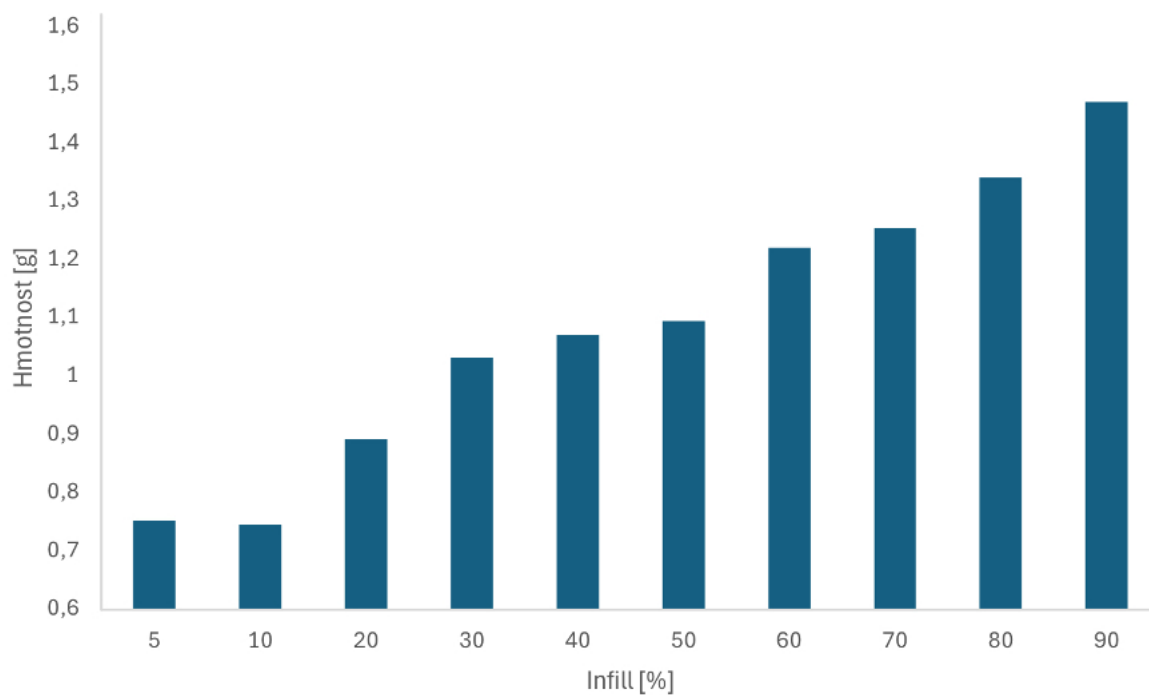
Infill [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,6738
10	0,7084
20	0,7416
30	0,8738
40	1,0116
50	1,0056
60	1,2457
70	1,1629
80	1,2646
90	1,3651



Graf 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s infillem typu hvězda

Tabulka 4 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s koncentrickým infillem

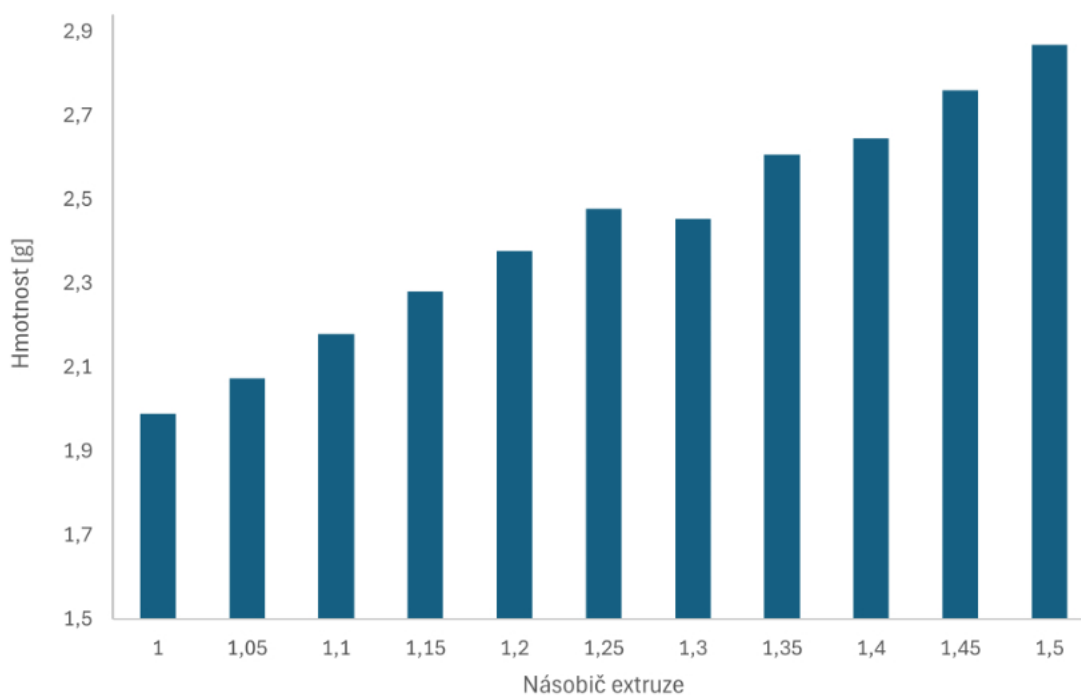
Infill [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,7518
10	0,7457
20	0,8921
30	1,0319
40	1,071
50	1,0947
60	1,2209
70	1,2534
80	1,3405
90	1,4706



Graf 5 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s koncentrickým infillem

Tabulka 6 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles s měnícím se násobičem extruze
(100% koncentrický infill)

Násobič extruze	Hmotnost výtisku [g]
1	1,9893
1,05	2,0732
1,1	2,1793
1,15	2,2811
1,2	2,3770
1,25	2,4781
1,3	2,4539
1,35	2,6066
1,4	2,6452
1,45	2,7597
1,5	2,8679



Graf 6 - Hmotnosti vytištěných testovacích těles s měnícím se násobičem extruze
(100% koncentrický infill)



Obrázek 25 – Fotografie testovacích těles vytištěných pomocí nevodivého filamentu

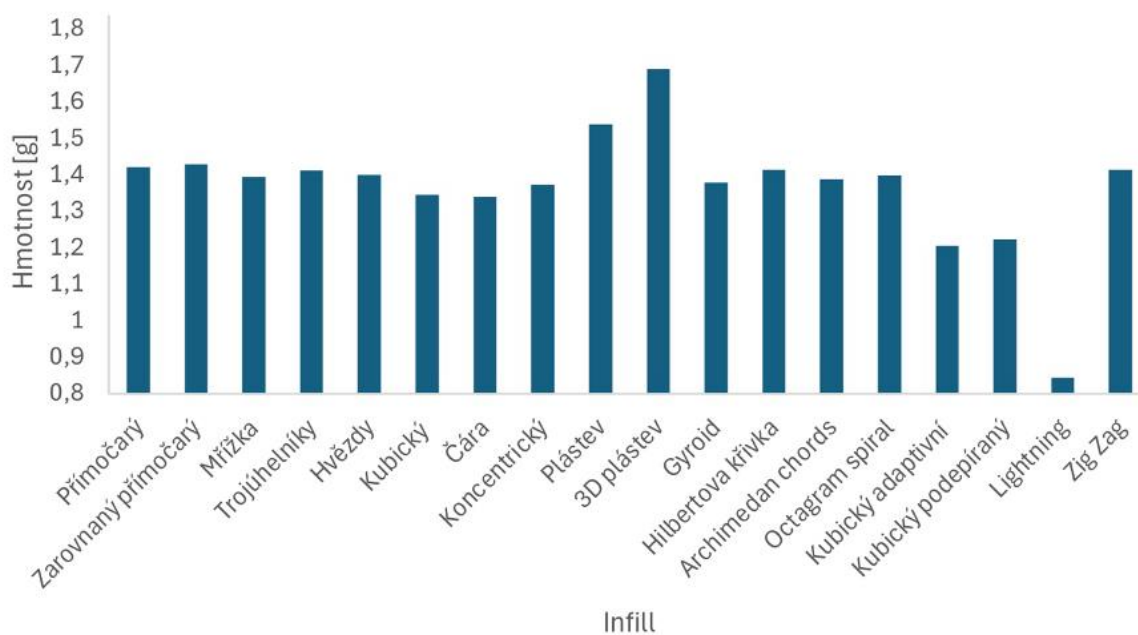
Byly zkontrolovány rozměry testovacích těles a výsledky potvrdily, že tiskový postup a zvolené parametry jsou vhodné pro tisk pomocí vodivého filamentu.

2.2.2 Tisk pomocí vodivého filamentu Proto-pasta Conductive PLA

Po provedení kontrolního tisku byly vytištěny testovací tělesa stejným způsobem jako u kontrolního tisku pomocí vodivého filamentu Proto-pasta. Při zavádění filamentu bylo potřeba několikrát odmítnout otázku na správnou barvu filamentu, aby byl zajištěn tisk pouze pomocí vodivého filamentu a nebyly ovlivněny vlastnosti materiálu zbytky předešlého filamentu. Všechna vytištěná tělesa byla zvážena na analytických vahách a označena. Hmotnosti testovacích těles jsou zobrazeny v tabulkách 7, 8, 9, 10, 11, 12 a grafech 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Tabulka 7 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %

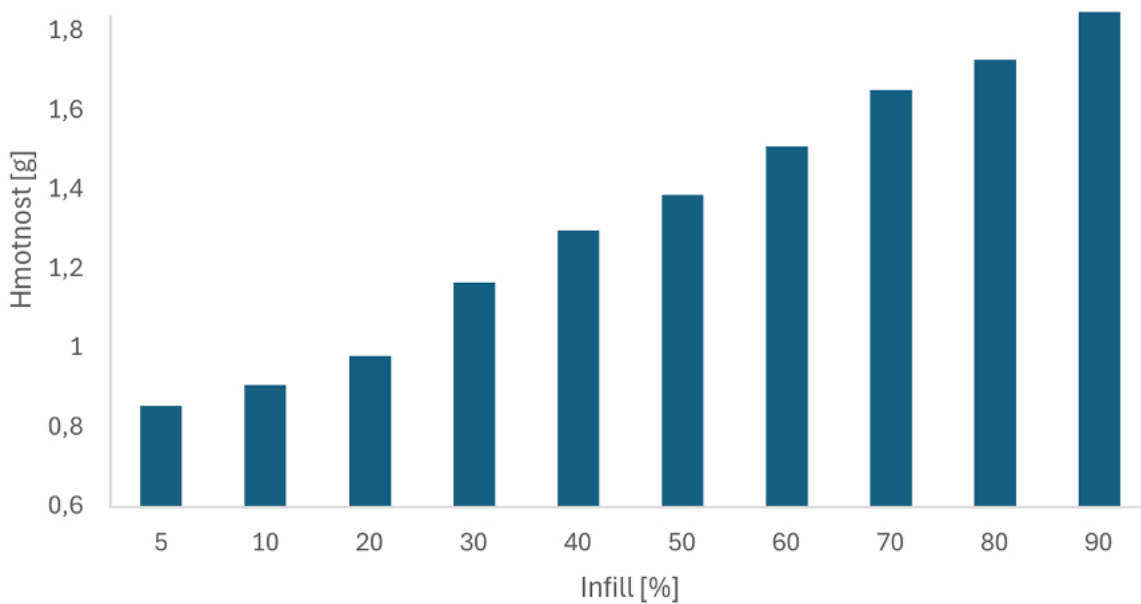
Typ infillu	Hmotnost výtisku [g]
Přímočarý	1,4221
Zarovnaný přímočarý	1,4309
Mřížka	1,3942
Trojúhelníky	1,4121
Hvězdy	1,4000
Kubický	1,3470
Čára	1,3412
Koncentrický	1,3743
Plástev	1,5387
3D plástev	1,6902
Gyroid	1,3798
Hilbertova křivka	1,4139
Archimedean chords	1,3886
Octagram spiral	1,3996
Kubický adaptivní	1,2055
Kubický podepíraný	1,2248
Lightning	0,8452
Zig Zag	1,4153



Graf 7 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %

Tabulka 8 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovou výplní

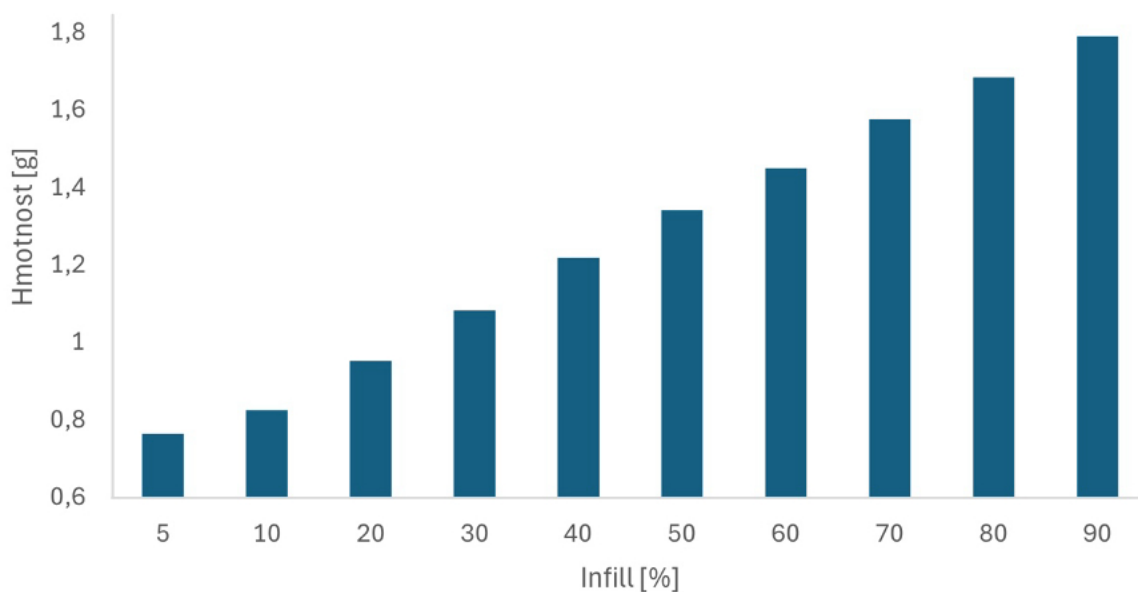
Výplň [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,8539
10	0,9068
20	0,9806
30	1,1661
40	1,2974
50	1,3871
60	1,5104
70	1,6519
80	1,7286
90	1,8490



Graf 8 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovým infillem

Tabulka 9 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickou výplní

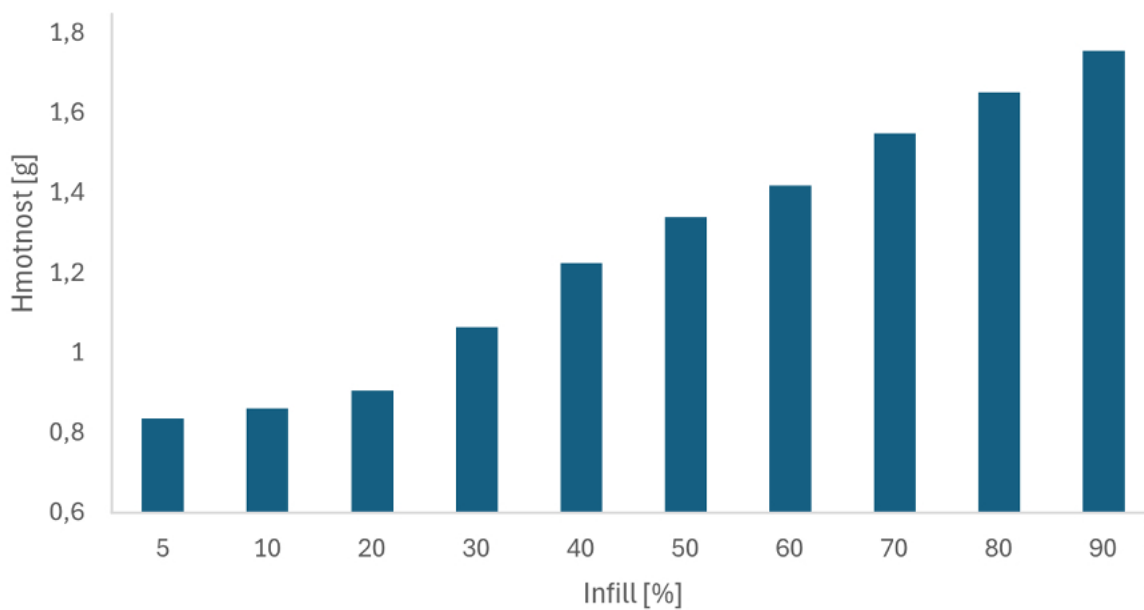
Výplň [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,7647
10	0,8271
20	0,9537
30	1,0840
40	1,2195
50	1,3432
60	1,4519
70	1,5784
80	1,6857
90	1,7915



Graf 9 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickým infillem

Tabulka 10 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s výplní typu hvězda

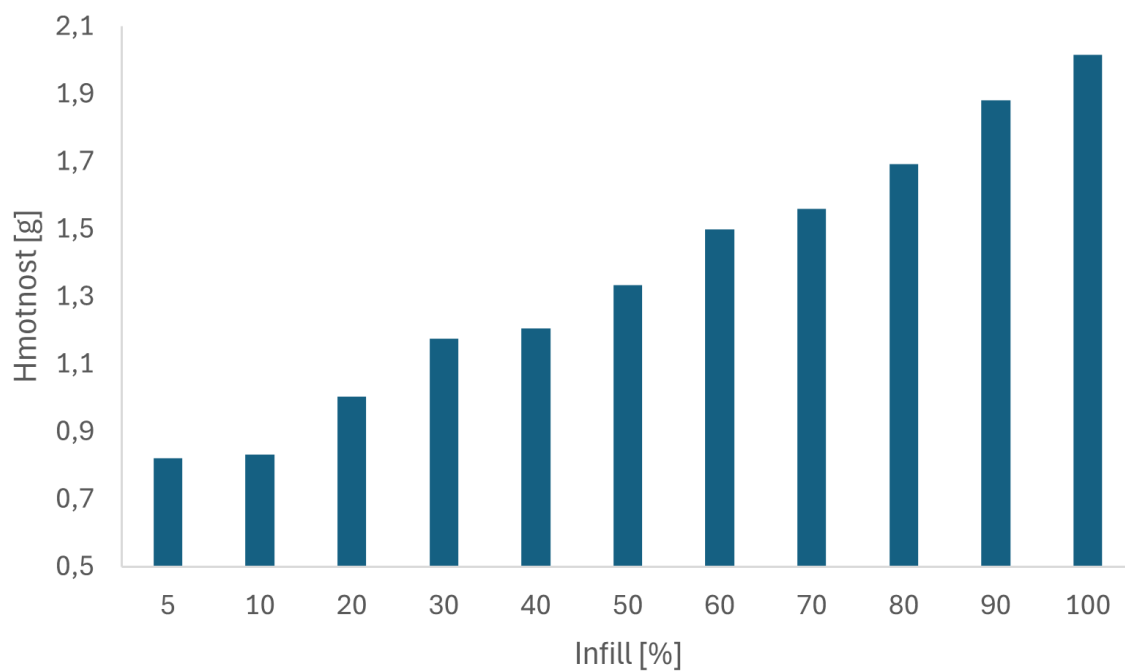
Výplň [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,8361
10	0,8608
20	0,9059
30	1,0644
40	1,2262
50	1,3414
60	1,4201
70	1,5505
80	1,6524
90	1,7577



Graf 10 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s infillem typu hvězda

Tabulka 11 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickou výplní

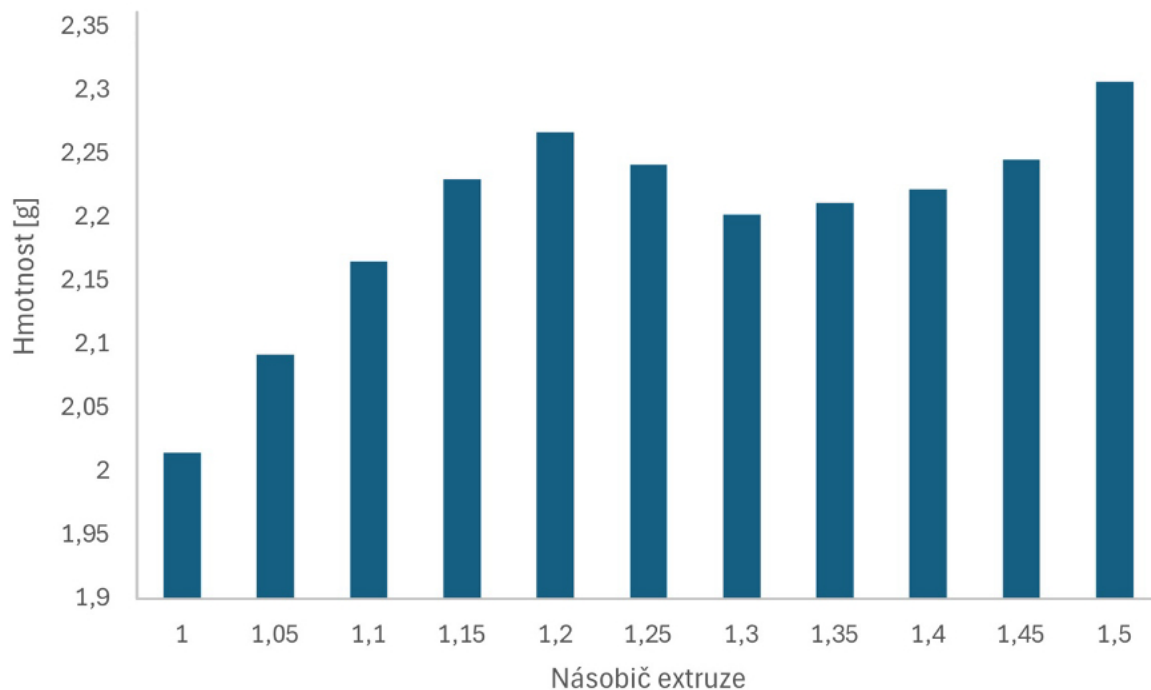
Výplň [%]	Hmotnost výtisku [g]
5	0,8214
10	0,8307
20	1,0023
30	1,1745
40	1,2052
50	1,3331
60	1,4997
70	1,5588
80	1,6928
90	1,8807
100	2,0149



Graf 11 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickým infillem

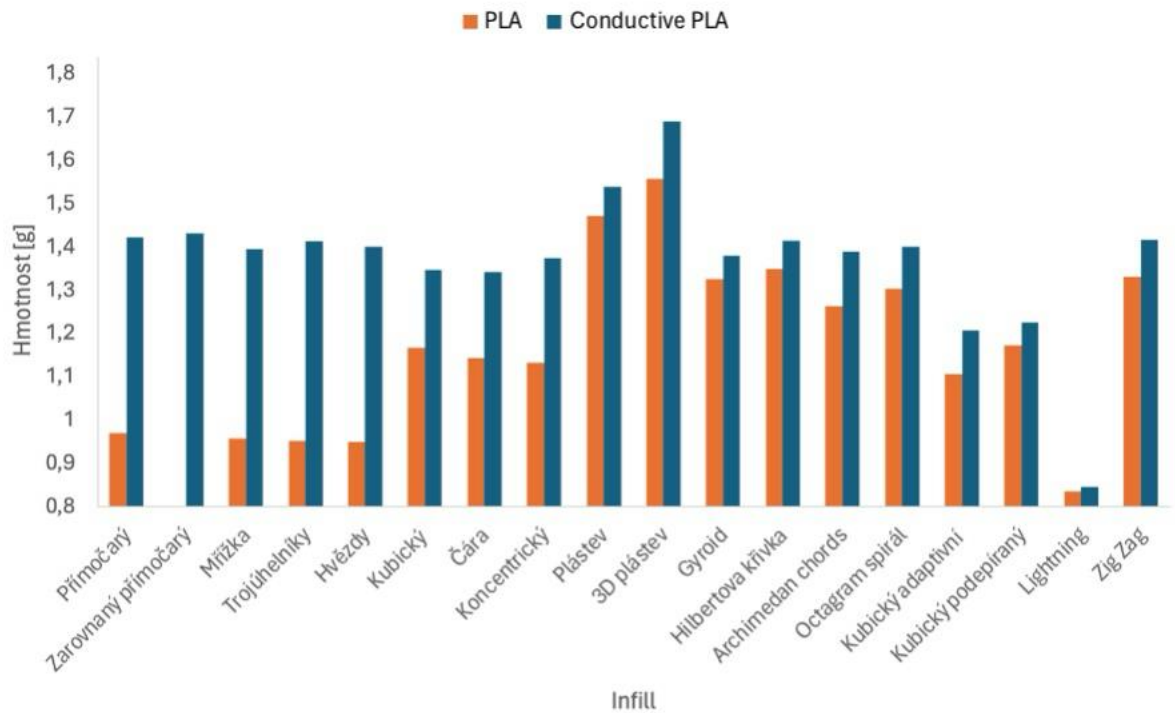
Tabulka 12 – Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)

Násobič extruze	Hmotnost výtisku [g]
1	2,0149
1,05	2,0922
1,1	2,1653
1,15	2,2303
1,2	2,2672
1,25	2,2413
1,3	2,2023
1,35	2,2116
1,4	2,2221
1,45	2,2452
1,5	2,3068

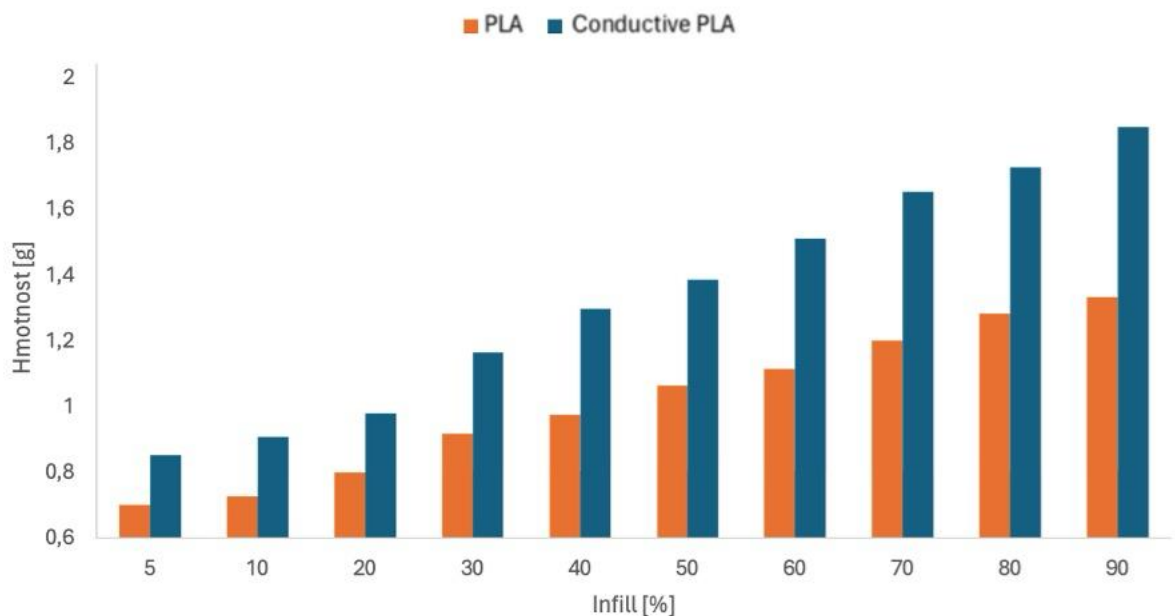


Graf 12 - Hmotnosti vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)

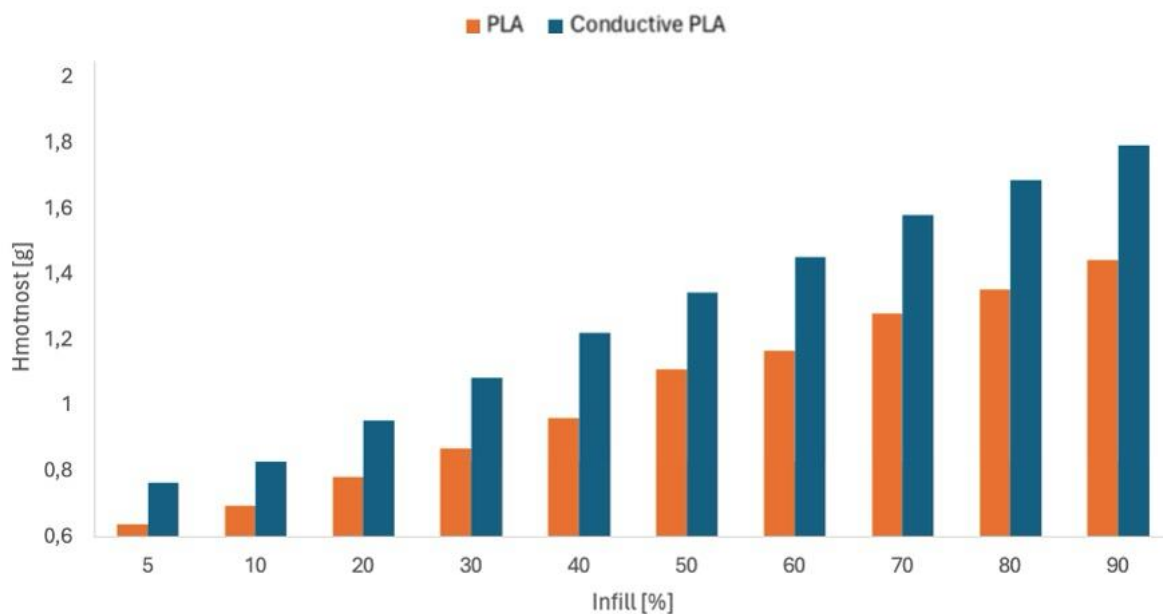
2.2.3 Srovnání hmotností výtisků z filamentu Proto-pasta a nevodivého filamentu



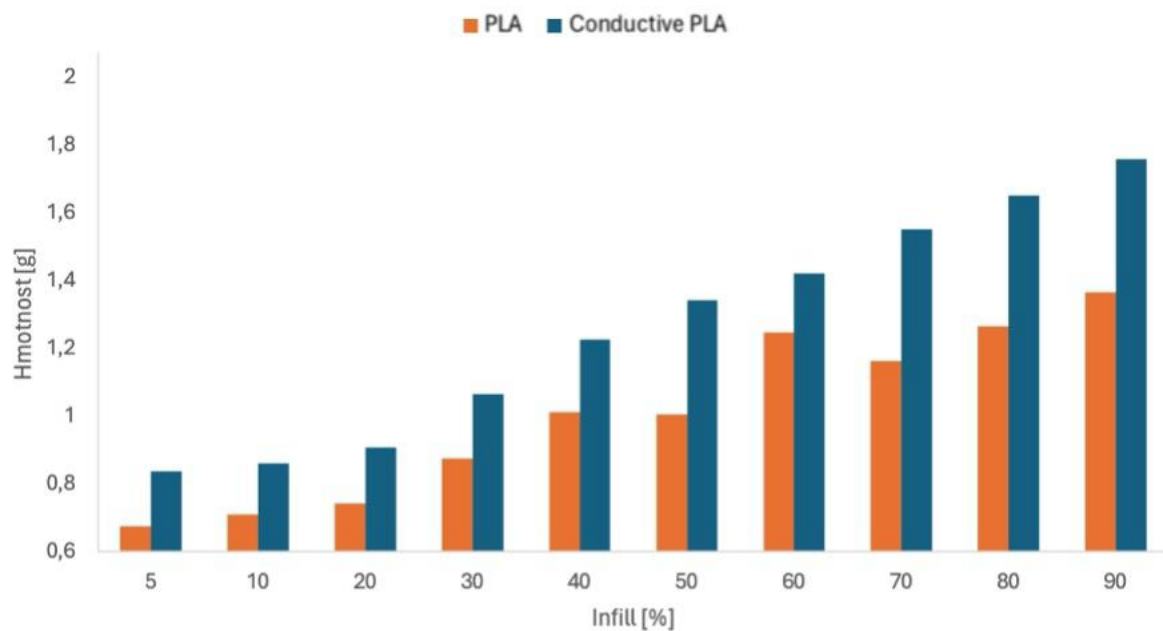
Graf 13 – Srovnání hmotností vtištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %



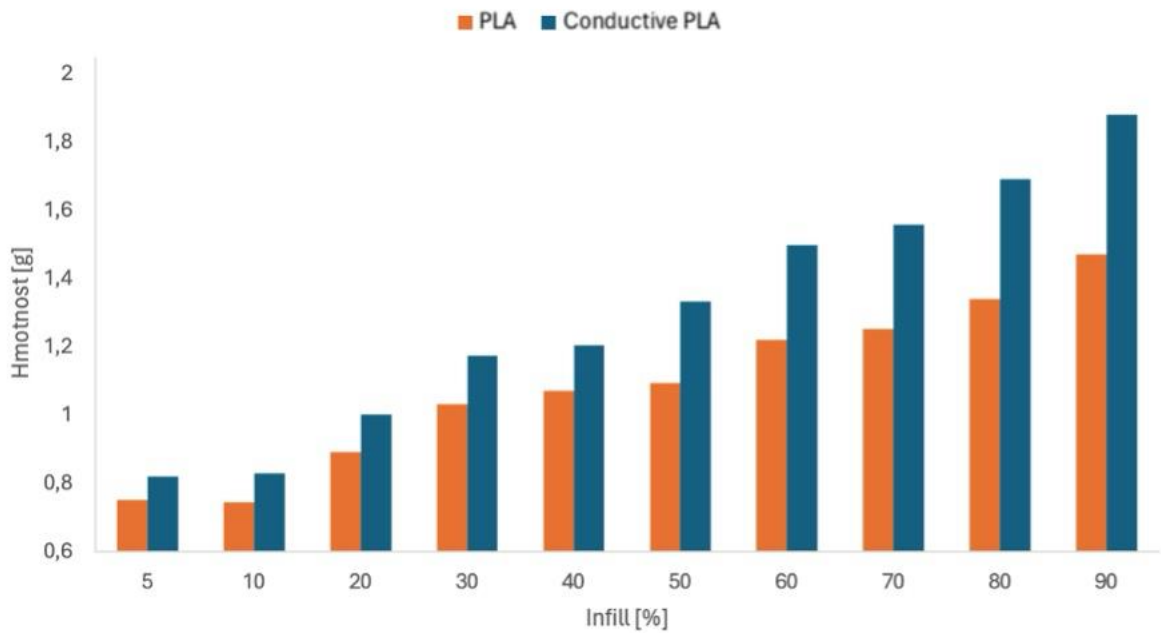
Graf 14 – Srovnání hmotností vtištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s mřížkovým infillem



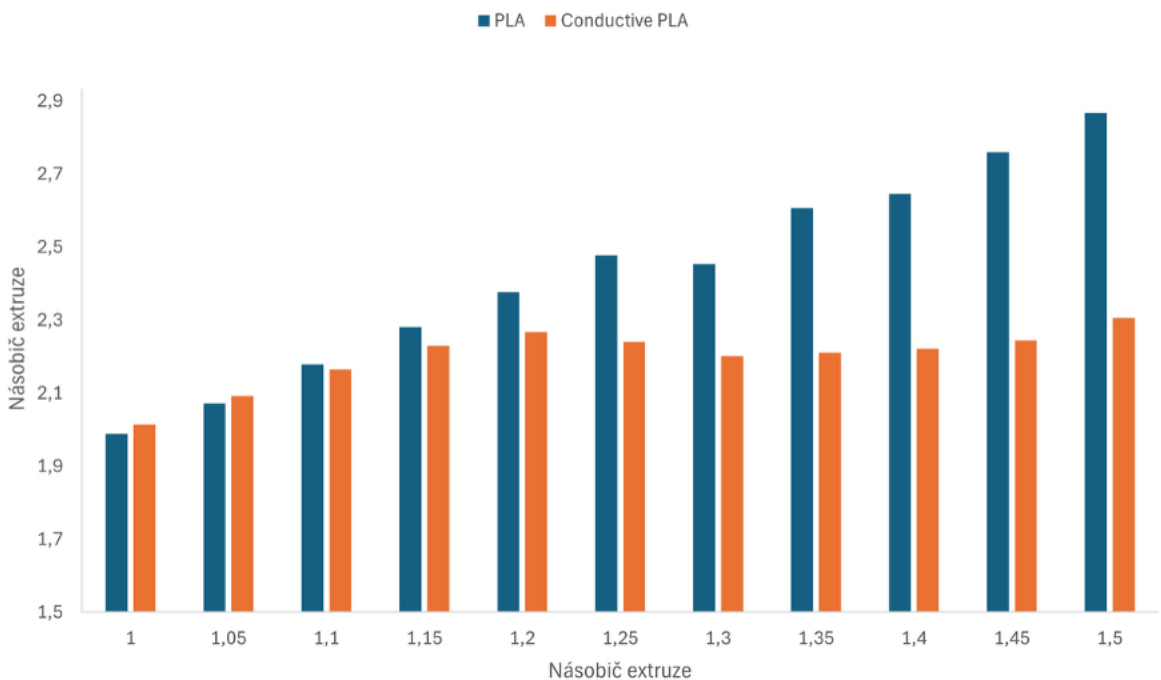
Graf 15 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s kubickým infillem



Graf 16 – Srovnání hmotností vytištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s infillem typu hvězda



Graf 17 – Srovnání hmotností vtištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s koncentrickým infillem



Graf 18 – Srovnání hmotností vtištěných testovacích těles z nevodivého a vodivého filamentu s měnícím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)

2.3 Měření elektrického odporu

2.3.1 Příprava testovacích těles na měření

Před samotným měřením elektrického odporu bylo nutné zajištění kvalitního spojení měřících elektrod se vzorkem. Toho bylo docíleno nanesením vodivé stříbrné pasty na konce testovacích těles a následným usušením v sušárně při 60 °C po dobu 5 hodin. Tím se snížil vliv přechodových odporů na kontaktech při dvoubodovém měření.



Obrázek 26 – Testovací tělesa v sušárně

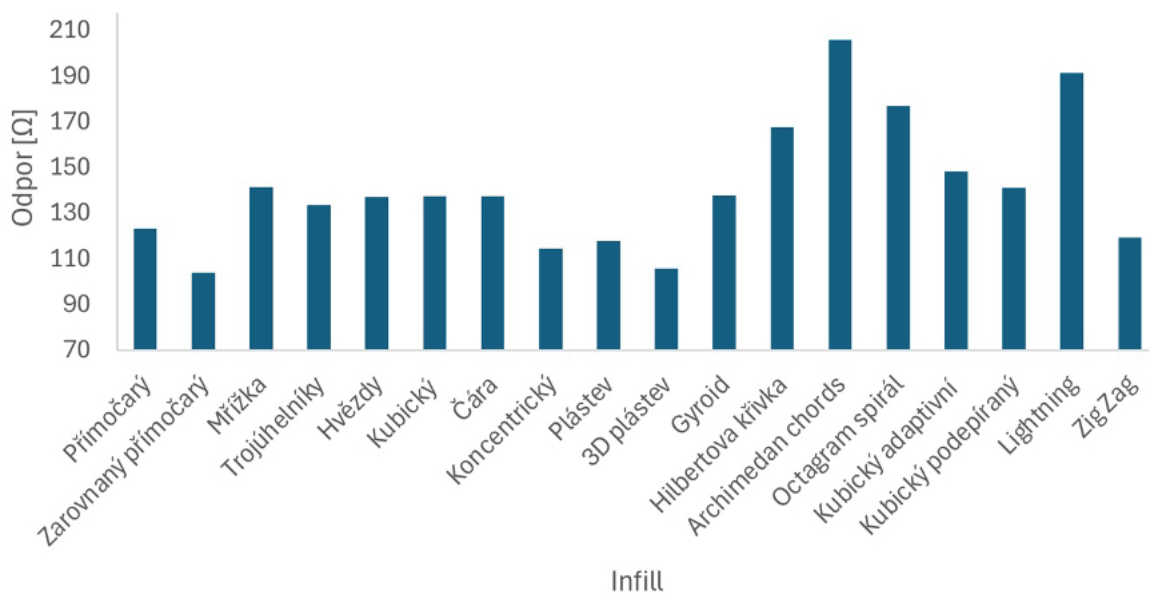
2.3.2 Měření elektrického odporu multimetrem Hioki DT4282

Po vyjmutí usušených testovacích těles ze sušárny, byla tělesa připravena k samotnému měření elektrického odporu dvoubodovou metodou pomocí multimetru Hioki DT4282. U všech 69 testovacích těles byla naměřena hodnota elektrického odporu třikrát. Každé měření bylo provedeno v jiném místě kontaktu, aby byl snížen vliv nedokonalého spojení elektrody s testovacím tělesem. Hodnoty naměřených odporů byly zavedeny do tabulky a zprůměrovány.

Naměřené hodnoty jsou vyobrazeny v tabulkách 13, 14, 15, 16, 17, 18 a grafech 19, 20, 21, 22, 23, 24.

Tabulka 13 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %

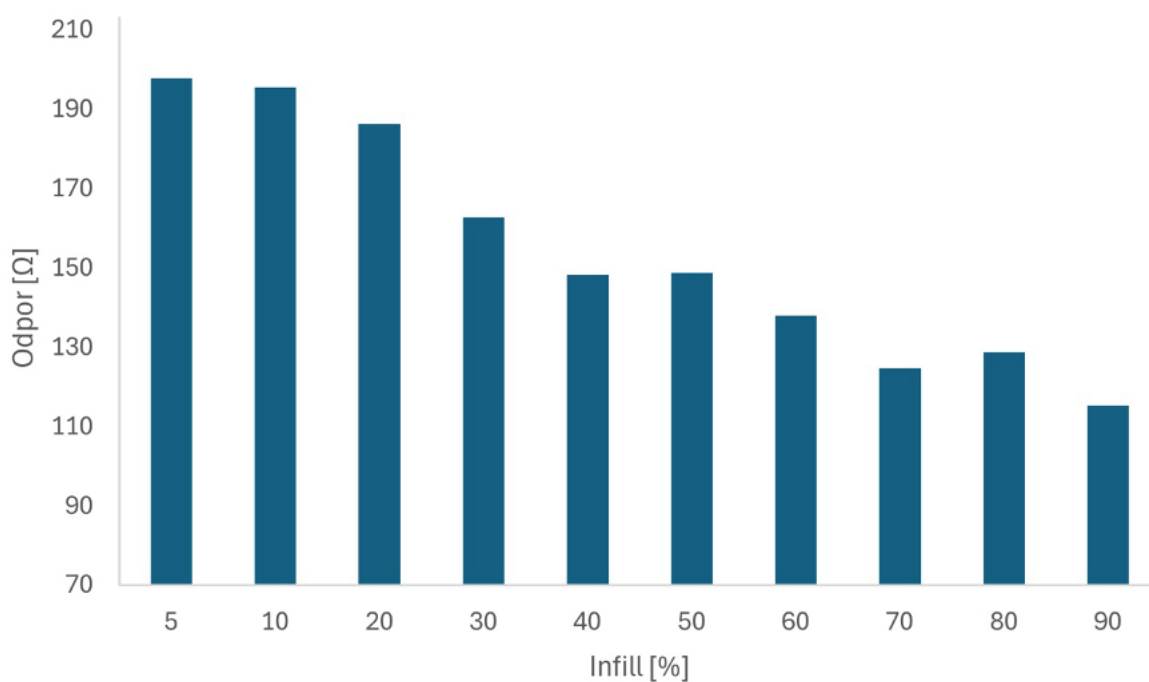
Typ infillu	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
Přímočarý	123,46	123,42	123,45	123,44
Zarovnaný přímočarý	103,94	103,93	103,91	103,93
Mřížka	141,51	141,52	141,54	141,52
Trojúhelníky	133,67	133,73	133,74	133,71
Hvězdy	137,08	137,12	137,21	137,14
Kubický	137,51	137,59	137,70	137,60
Čára	137,36	137,49	137,58	137,48
Koncentrický	114,55	114,54	114,59	114,56
Plástev	117,97	118,02	118,07	118,02
3D plástev	105,91	105,93	105,99	105,94
Gyroid	137,84	137,85	137,91	137,87
Hilbertova křivka	167,52	167,65	167,77	167,65
Archimedean chords	206,02	206,15	206,19	206,12
Octagram spirál	176,84	177,01	177,15	177,00
Kubický adaptivní	148,36	148,46	148,51	148,44
Kubický podepíraný	141,11	141,22	141,26	141,20
Lightning	191,45	191,54	191,56	191,52
Zig Zag	119,29	119,35	119,41	119,35



Graf 19 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s různými typy infillu při podílu 50 %

Tabulka 14 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovou vyplní

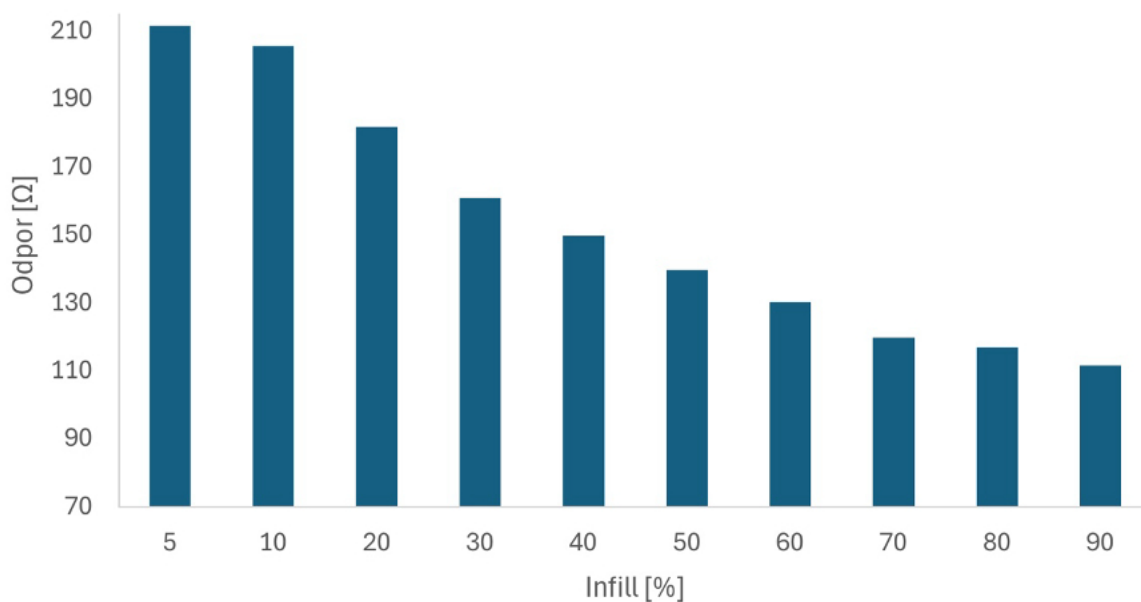
Výplň [%]	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
5	198,00	197,98	197,93	197,97
10	195,55	195,60	195,71	195,62
20	186,26	186,40	186,50	186,39
30	162,68	162,92	163,03	162,88
40	148,15	148,22	148,28	148,22
50	148,81	148,85	148,90	148,85
60	138,09	138,11	138,15	138,12
70	124,68	124,77	124,81	124,75
80	128,91	128,82	128,75	128,83
90	115,36	115,35	115,31	115,34



Graf 20 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s mřížkovým infillem

Tabulka 15 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickou výplní

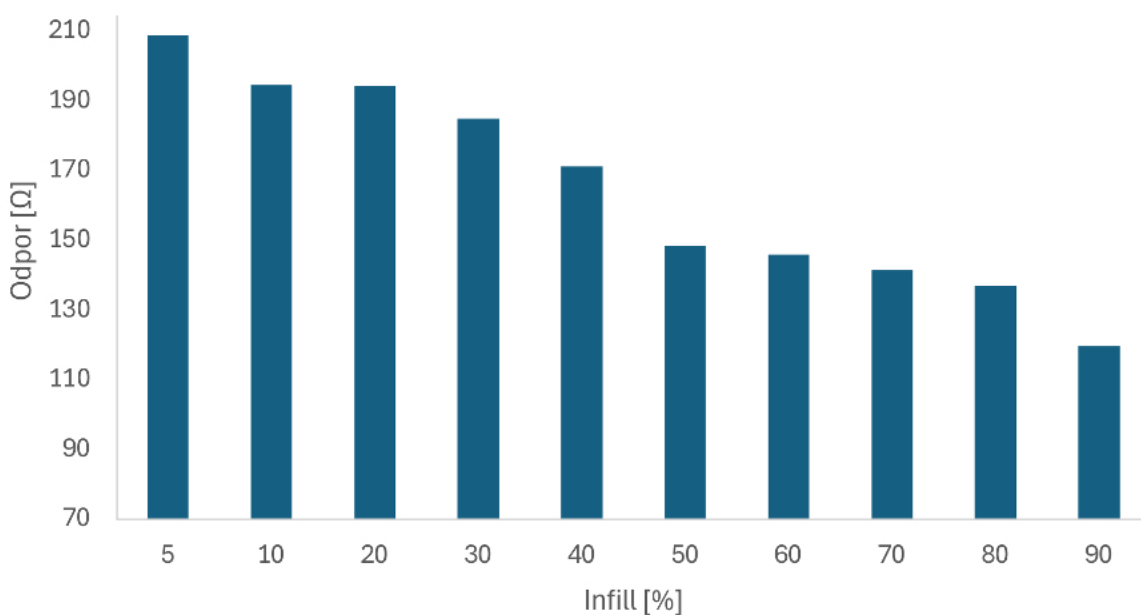
Výplň [%]	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
5	211,62	211,49	211,53	211,55
10	205,57	205,56	205,65	205,59
20	181,77	181,75	181,88	181,80
30	160,91	160,93	160,95	160,93
40	149,68	149,71	149,76	149,72
50	139,69	139,63	139,62	139,65
60	130,16	130,27	130,28	130,24
70	119,79	119,82	119,86	119,82
80	116,91	116,93	116,95	116,93
90	111,63	111,67	111,71	111,67



Graf 21 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s kubickým infillem

Tabulka 16 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s výplní typu hvězda

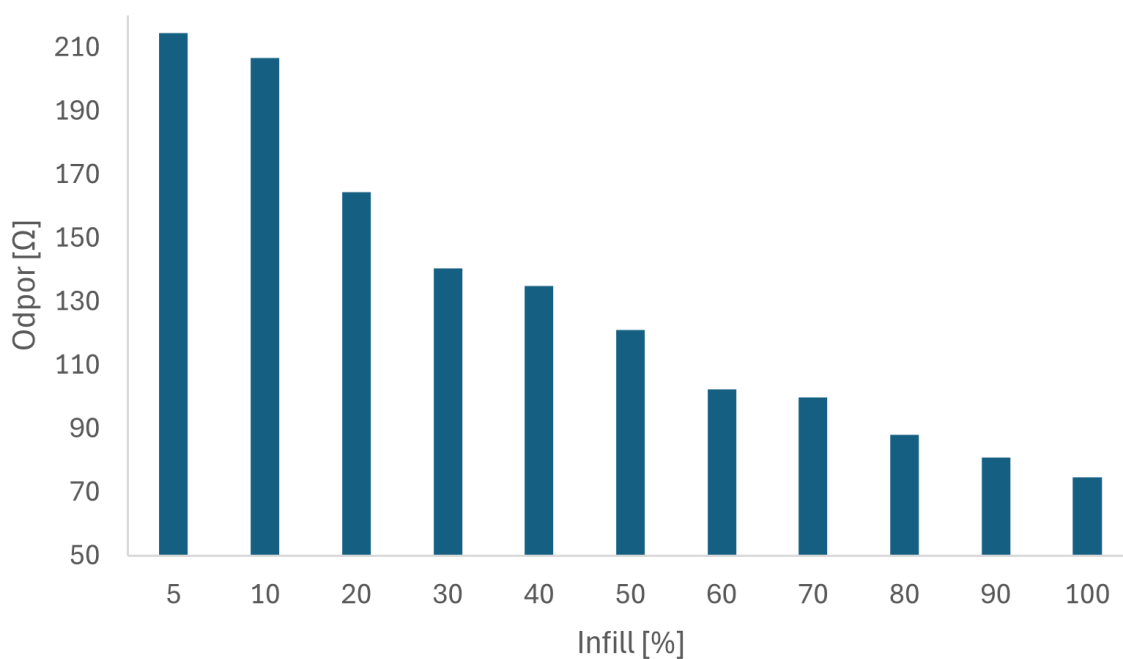
Výplň [%]	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
5	208,90	208,93	208,82	208,88
10	194,60	194,56	194,61	194,59
20	194,38	194,45	194,48	194,44
30	184,77	184,83	185,20	184,93
40	171,22	171,31	171,40	171,31
50	148,45	148,59	148,63	148,56
60	145,93	146,00	146,11	146,01
70	141,52	141,55	141,59	141,55
80	136,98	137,02	137,09	137,03
90	119,75	119,85	119,87	119,82



Graf 22 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s infillem typu hvězda

Tabulka 17 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickou výplní

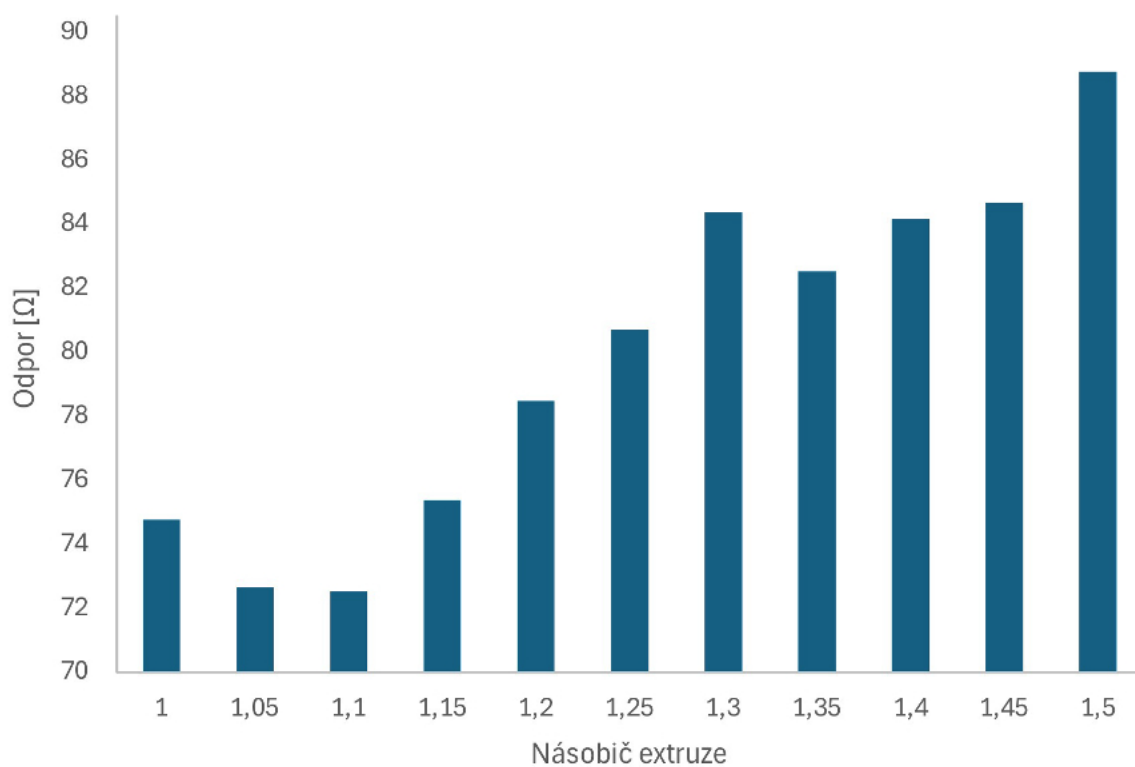
Výplň [%]	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
5	214,36	214,55	214,57	214,49
10	206,63	206,72	206,71	206,69
20	164,42	164,58	164,73	164,58
30	140,52	140,51	140,55	140,53
40	134,77	134,86	134,95	134,86
50	120,94	121,00	121,05	121,00
60	102,24	102,31	102,41	102,32
70	99,71	99,77	99,83	99,77
80	87,97	88,02	88,04	88,01
90	80,81	80,86	80,91	80,86
100	74,74	74,77	74,8	74,77



Graf 23 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s koncentrickým infillem

Tabulka 18 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnicím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)

Násobič extruze	Odpor [Ω]			Prům. odpor [Ω]
1	74,74	74,77	74,8	74,77
1,05	72,62	72,67	72,69	72,66
1,1	72,51	72,54	72,57	72,54
1,15	75,36	75,38	75,42	75,39
1,2	78,48	78,51	78,5	78,50
1,25	80,7	80,72	80,75	80,72
1,3	84,36	84,39	84,42	84,39
1,35	82,51	82,52	82,56	82,53
1,4	84,14	84,17	84,21	84,17
1,45	84,64	84,68	84,74	84,69
1,5	88,73	88,77	88,83	88,78



Graf 24 – Naměřené hodnoty elektrického odporu vytištěných testovacích těles z vodivého filamentu s měnicím se násobičem extruze (100% koncentrický infill)

3 DISKUZE

3.1 Tisk pomocí nevodivého PLA

Tisk pomocí klasického PLA filamentu probíhal bez větších problémů. Dvakrát se stalo, že byl tisk přerušen, z důvodu odtržení tištěného tělesa od podložky. Tento problém byl vyřešen nanesením disperze PUR lepidla a vody na tiskovou podložku pro zvýšení adheze. Poté už tisk probíhal bez problému.

3.2 Tisk pomocí vodivého filamentu Proto-pasta PLA

Během tisku filamentem Proto-pasta došlo několikrát k ucpání trysky extruderu. To bylo nejspíš způsobeno vyšším obsahem uhlíkových částic, které způsobily ucpání. Tento problém byl vyřešen výměnou filamentu za standardní PLA, kterým byla tryska vyčištěna metodou tzv. cold pull (proplachování). Poté byl opět zaveden vodivý filament a tisk pokračoval.

3.3 Srovnání hmotnosti výtisků zhotovených pomocí vodivého a nevodivého filamentu.

Z naměřených hodnot hmotností výtisků je zřejmé, že vodivý filament Protoplant PLA vykazuje vyšší hmotnosti výtisků než běžné nevodivé PLA ve všech sledovaných případech. Tento trend je patrný jak při srovnání různých typů infillu (Graf 13), tak při změně podílu infillu. Například u 50 % (Grafy 14, 15, 16, 17) dosahuje vodivý filament oproti nevodivému PLA v průměru o 20–40 % vyšší hmotnost. To se dá odůvodnit vyšší hustotou materiálu a nutností zvýšeného průtoku z důvodu přítomnosti vodivých plniv. S rostoucím podílem infillu se rozdíl dále zvyšuje, což potvrzuje vyšší materiálovou náročnost vodivých filamentů pro dosažení stejné mechanické integrity výtisku.

Rozdíl se také projevuje také v hmotnostech u těles s měnícím se násobičem extruze (Graf 18). U obou typů filamentu docházelo po překročení určité hranice nastavení násobiče extruze ke snižování kvality tištěných testovacích těles, což bylo pravděpodobně způsobeno vlivem nadměrného vytlačování materiálu. Testovací tělesa tištěná pomocí běžného PLA vykazovala se zvyšujícím se násobičem extruze jednoznačně rostoucí trend hmotnosti. To odpovídá předpokladu, že vyšší nastavení násobiče vede k extruzi většího množství materiálu.

U těles tištěných pomocí vodivého filamentu proto-pasta je patrný celkově rostoucí, ale méně stabilní nárůst hmotnosti. Nelinearita tohoto nárůstu hmotnosti se dá přisuzovat horší tekutosti

kompozitního filamentu, kde kladou vodivé částice odpor toku a způsobují nekonzistentní extruzi.

Tyto poznatky je potřeba zohlednit při návrhu a výrobě funkčních objektů s využitím kompozitních filamentů, a to hlavně při optimalizaci parametrů tisku a plánování spotřeby materiálu.

3.4 Měření elektrického odporu testovacích těles vytištěných pomocí filamentu Protoplant PLA

Měření elektrického odporu potvrdilo, že je výsledná vodivost výtisku ovlivněna jak typem infillu, tak podílem výplně a nastavením násobiče extruze.

Z dat v tabulce 13 je patrné, že ze všech typů infillu při 50% podílu dosahovaly nejnižších průměrných hodnot odporu infilly: Zarovnaný přímočarý (103,93 Ω), 3D pláštěv (105,94 Ω) a koncentrický (114,56 Ω). Tyto infilly vytvářejí kompaktní a relativně přímou vodivou dráhu s minimem mezer, což má pozitivní vliv na snížení odporu.

Naopak infilly s komplikovanou strukturou, jako je například Archimedean chords (206,12 Ω), nebo Octagram spiral (177 Ω) vykazují výrazně vyšší hodnoty odporu. Tyto struktury prodlužují celkovou dráhu průchodu elektrického proudu a často obsahují více přechodů a zlomů, které také zvyšují hodnotu elektrického odporu.

Významný vliv na odpor má i podíl výplně, jak můžeme pozorovat v grafech 20–23. Se zvyšujícím podílem infillu pozorujeme téměř lineární snižování elektrického odporu. Například u mřížkového infillu (Graf 20) odpor klesá z průměrné hodnoty 197,97 Ω při 5 %, až na hodnotu 115,34 Ω při 90 % výplně. Stejný trend lze pozorovat i u kubického infillu (Graf 21) a infillu typu hvězda (Graf 22). Nejvýraznější pokles odporu se zvyšujícím se podílem výplně vykazovala tělesa s koncentrickým infillem (Graf 22), kde průměrná hodnota infillu klesla z 214,49 Ω při 5 %, až na hodnotu 80,86 Ω při 90 %.

Dále byla sledována změna elektrického odporu se zvyšující hodnotou násobiče extruze. Z naměřených dat vyplývá, že při nízkých hodnotách (1,0–1,15) se odpor pohyboval v rozmezí 72–75 Ω , což značí optimální průtok materiálu bez významného vzniku mezer. Při dalším zvyšování hodnoty násobiče extruze dochází k postupnému nárustu odporu až na hodnotu 88,78 Ω při hodnotě násobiče extruze 1,5. Tento trend však není zcela lineární, jak by se mohlo očekávat. Například mezi hodnotami 1,2 a 1,35 je patrný skokový vzestup odporu s menšími lokálními odchylkami. Tato nelinearita může být způsobena specifickým chováním taveniny

vodivého filamentu při vyšších průtocích. Dalším faktorem, který může mít vliv na nelinearitu je skutečnost, že se při vyšších hodnotách násobiče extruze může měnit orientace vodivých částic v polymerní matrici, což může způsobit přerušování vodivých cest ve výtisku a zhoršení transportu elektronů strukturou materiálu. Z tohoto důvodu je doporučována hodnota násobiče extruze mezi 1,0–1,1, která zajišťuje nejnižší odpor a kvalitní slinutí vrstev bez nadbytečných lokálních defektů.

Souhrnně tedy vyplývá, že pro dosažení co nejnižšího odporu vodivých výtisků je klíčové použít nejvyšší možný podíl výplně, geometrii s co nejpřímějšími vodivými cestami, jako je například koncentrický infill a optimální nastavení průtoku. Tak jsme schopni předcházet nedostatečné adhezi, nebo vzniku lokálních defektů.

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat problematiku tisku funkčních objektů pomocí 3D tisku se zaměřením na technologii FDM a experimentálně ověřit vliv různých typů infillu na podíl výplně na elektrický odpor tištěných vzorků.

V teoretické části byla podrobně charakterizována technologie FDM, popsány používané materiály, zejména vodivé a kompozitní filameny. Dále byly diskutovány možnosti aplikace funkčního 3D tisku v oblasti elektroniky, průmyslu a nositelných technologií.

Experimentální část prokázala, že typ a podíl výplně má zásadní vliv na elektrickou vodivost tištěných objektů. Zároveň bylo potvrzeno že při tisku vodivými filameny je nutná optimalizace tiskových parametrů, jako například násobič extruze, aby bylo dosaženo požadované homogenity vodivosti a minimalizace odchylek v odporových vlastnostech.

Výsledky této práce poukazují na praktické limity FDM technologie při tisku elektricky funkčních objektů a zdůrazňují potřebu dalšího vývoje vodivých filamentů se správnou disperzí plniv a co nejvyšší stabilitu vodivosti.

Závěrem lze říct, že FDM tisk funkčních struktur má značný potenciál, zejména v oblasti prototypování a vývoje různých funkčních struktur, jako jsou například senzory. Vyžaduje ale pečlivou volbu materiálů a optimalizaci tiskových parametrů.

Tato práce může sloužit jako základ pro navazující experimenty a aplikace v oblasti aditivní výroby funkčních objektů.

5 Seznam použité literatury:

- [1] REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemon a GARRET, Brian. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [2] HORVATH, Joan C. Mastering 3D printing. New York: Apress, [2014]. ISBN 978-1-4842-0026-1.
- [3] REPRAP. RepRap Wiki [online]. [cit. 2025-03-12]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [4] WOODFORD, Chris. 3D Printing [online]. [cit. 2025-03-12]. Dostupné z: <https://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html>
- [5] XJet Introduces New 3D Printing Breakthrough: Ceramic NanoParticle Jetting Technology. Online. Dostupné z: <https://3dprint.com/154789/xjet-ceramic-nanoparticle-jetting/>. [cit. 2025-03-31].
- [6] 30Drop on Demand (DOD) 3D Printers. Online. Dostupné z: <https://3dprintingtoday.com/3d-printing-technologies/3d-printers/drop-on-demand-dod-printers/>. [cit. 2025-04-07].
- [7] HEMACHANDRA, M.; MAMEDIPAKA, Ramesh; KUMAR, Adepu a THAPLIYAL, Shivraman. Investigating the microstructure and mechanical behavior of optimized eutectic Al Si alloy developed by direct energy deposition. Online. Journal of manufacturing processes. 2024, roč. 110, s. 398-411. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.002>. [cit. 2025-04-01].
- [8] Polymers for 3D printing. Plastics design library, 2022. ISBN 9780128183113.
- [9] A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2021, roč. 143, č. 106194, s. 18.
- [10] Sušení filamentu. Online. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/suseni-filamentu_332086. [cit. 2025-04-09].
- [11] Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 3, s. 9.
- [12] Integrating Smart Materials with FDM 3D Printing. Online. 3D Printing Industry. 2024, roč. Neznámé, č. Neznámé, s. 1. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/integrating-smart-materials-with-fdm-3d-printing-226211/>. [cit. 2025-04-15].
- [13] Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 3, s. 236–244. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140>.

- [14] BAUHOFER, W. a J.Z. KOVACS. a review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Composites Science and Technology*. 2009, 69(10), 1486–1498. ISSN 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>
- [15] A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021, roč. 5, č. 2, s. 40.
- [16] 3D Printing of a Robust Polyamide-12-Carbon Black Composite via Selective Laser Sintering: Thermal and Electrical Conductivity. Online. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2019, č. 304. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/mame.201800718> [cit. 2025-05-20].
- [17] 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. Online. *Matter*. 2022, č. 5, s. 43–76. ISSN 2590-2385. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018> . [cit. 2025-05-14].
- [18] Enhancement of 3D Printability by FDM and Electrical Conductivity of PLA/MWCNT Filaments Using Lignin as Bio-Dispersant. Online. *Polymers*. 2023, č. 15. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15040999> . [cit. 2025-05-14].
- [19] 3D printing of polymer composites to fabricate wearable sensors: a comprehensive review. Online. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2023, roč. 2023, č. 154, s. 1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100734> . [cit. 2025-05-13].
- [20] *Polymers for 3D Printing Methods, Properties, and Characteristics*. Elsevier, 2022. ISBN 9780128183113.
- [21] STANKEVICH, Stanislav; SEVCENKO, Jevgenijs; BULDERBERGA, Olga; DUTOVS, Aleksandrs; ERTS, Donat et al., 2023. Electrical Resistivity of 3D-Printed Polymer Elements. Online. *Polymers*. Roč. 15, č. 14. ISSN 2073-4360. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym15142988>. [accessed 2025-05-29].
- [22] PENTEK, Attila; NYITRAI, Miklos; SCHIFFER, Adam; ABRAHAM, Hajnalka; BENE, Matyas et al. The Effect of Printing Parameters on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of PLA and ABS Based Carbon Composites in Additive Manufacturing of Upper Limb Prosthetics. Online. *Crystals*. 2020, roč. 10, č. 5. ISSN 2073-4352. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/cryst10050398>. [cit. 2025-05-29].
- [23] VASQUES, César M. A.; FERREIRA, João P. R.; FIGUEIREDO, Fernando A. V. a ABRANTES, João C. C. On the Electrical Resistivity Measurement Methods and Properties of Conductive 3D-Printing PLA Filaments. Online. *Engineering Proceedings*. 2025, roč. 87, č. 1. ISSN 2673-4591. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/engproc2025087026>. [cit. 2025-05-29].
- [24] WOLSTRUP, Anders Frem; SPANGENBERG, Jon; YAMAMOTO, Akio; GLEADALL, Andrew a ZSURZSAN, Gabriel. Advances in 3D printed electromechanical sensors: Performance comparison, trends, and future directions: Performance comparison, trends, and future directions. *Additive Manufacturing*. 2025, roč. 106, s. 104799. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104799>.

- [25] RAJ, Abhishek; CHANDRAKAR, Anand Swarup; TYAGI, Bobby; JAIN, Akash; GUPTA, Hritav et al. Advancements in material extrusion based three-dimensional printing of sensors: a review: a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024, roč. 18, č. 2, s. 627-648. ISSN 1955-2505. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01718-6>.
- [26] SHAHZAD, Aamir a LAZOGLU, Ismail. Direct ink writing (DIW) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges: Recent achievements and future challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2021, roč. 225, s. 109249. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109249>.
- [27] CRESPO-MIGUEL, Javier; LUCARINI, Sergio; GARZON-HERNANDEZ, Sara; ARIAS, Angel; MARTÍNEZ-PAÑEDA, Emilio et al. In-silico platform for the multifunctional design of 3D printed conductive components. *Nature Communications*. 2025, roč. 16, č. 1, s. 1359. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56707-y>.
- [28] GLOGOWSKY, Alexandra; KORGER, Michael a RABE, Maike. Influence of print settings on conductivity of 3D printed elastomers with carbon-based fillers. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024, roč. 9, č. 4, s. 791-803. ISSN 2363-9520. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00483-y>.
- [29] AHN, Sang-Joon; LEE, Howon a CHO, Kyu-Jin. 3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients. *Nature Communications*. 2024, roč. 15, č. 1, s. 3605. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5>.
- [30] KUMAR, Sudhir; SINGH, Harpreet; SINGH, Inderjeet; BHARTI, Shalok; KUMAR, Dinesh et al. A comprehensive review of FDM printing in sensor applications: Advancements and future perspectives: Advancements and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, roč. 113, s. 152-170. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.030>.
- [31] MASSARONI, Carlo; VITALI, Loy; LO PRESTI, Daniela; SILVESTRI, Sergio a SCHENA, Emiliano. Fully Additively 3D Manufactured Conductive Deformable Sensors for Pressure Sensing. *Advanced Intelligent Systems*. 2024/08/01, roč. 6, č. 8, s. 2300901. ISSN 2640-4567. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aisy.202300901>.
- [32] MA, Tengbo; ZHANG, Yali; RUAN, Kunpeng; GUO, Hua; HE, Mukun et al. Advances in 3D printing for polymer composites: a review: a review. *InfoMat*. 2024/06/01, roč. 6, č. 6, s. e12568. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/inf2.12568>.
- [33] BARŠI PALMIĆ, Tibor; SLAVIČ, Janko a BOLTEŽAR, Miha. Process Parameters for FFF 3D-Printed Conductors for Applications in Sensors. Online. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 16. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s20164542>. [cit. 2025-06-24].

- [34] PONGWISUTHIRUCHTE, Aphiwat a POTIYARAJ, Pranut. Challenges and innovations in sustainable 3D printing. *Materials Today Sustainability*. 2025, roč. 31, s. 101134. ISSN 2589-2347. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101134>.
- [35] SON, Jin-ho; KIM, Hongseok; CHOI, Yoonseob a LEE, Howon. 3D printed energy devices: generation, conversion, and storage: generation, conversion, and storage. *Microsystems & Nanoengineering*. 2024, roč. 10, č. 1, s. 93. ISSN 2055-7434. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00708-2>.
- [36] GUPTA, Ram K. (ed.). *3D Printed Conducting Polymers*. CRC Press, 2024. ISBN 9781003415985.
- [37] VASHISHTHA, Govind; CHAUHAN, Sumika; YADAV, Nitin; CHHABRA, Deepak; GUPTA, Munish et al. Shaping the future: latest developments in 3D printing stimuli-responsive soft polymers: latest developments in 3D printing stimuli-responsive soft polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025/02/03, roč. 136, s. 4215-4237. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15095-9>.
- [38] ZHANG, Naibo; WANG, Zilai; ZHAO, Zixin; ZHANG, Dongxing; FENG, Junyu et al. 3D printing of micro-nano devices and their applications. *Microsystems & nanoengineering*. 2025/02/27, roč. 11, s. 35. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00812-3>.
- [39] *Infill patterns*. Online. In: Prusa Knowledge Base. 2025. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130. [cit. 2025-07-01].