

**KATEDRA EKONOMIKY,
MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH
VĚD**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
PLNĚNÉ FOTOPOLYMERY PRO
STEREOLITOGRAFII**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KVĚTEN 2023

**LUKÁŠ
MICHL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Michl** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **499138**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fotopolymery pro stereolitografii

Název bakalářské práce anglicky:

Photopolymers for Stereolithography

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte literární rešerši na tematiku kompozitních materiálů připravených technologií stereolitografie
2. Připravte fotopolymerní resiny s přidavkem vhodného plniva
3. Navrhněte a vyrobte zkušební vzorky
4. Analyzujte jejich mechanické a elektrické vlastnosti
5. Provedte kalkulaci nákladů na výrobu zvoleného výrobku pomocí stereolitografie, případně porovnejte částku s jinými technologiemi

Seznam doporučené literatury:

1. Redwood, B.; Schöffer, F.; Garret, B., The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. 3D Hubs B.V.: 2017. <https://books.google.cz/books?id=R3OvswEACAAJ>
2. Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T. Q.; Hui, D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering 2018, 143, 172-196. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944>
3. Kalsoom, U.; Nesterenko, P. N.; Paull, B., Recent developments in 3D printable composite materials. RSC Advances 2016, 6 (65), 60355-60371. <http://dx.doi.org/10.1039/C6RA11334F>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Jonáš Uříčář katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Jonáš Uříčář
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 24. května 2023

ABSTRAKT

Cílem této práce je zlepšení elektrických a dielektrických vlastností fotopolymerních resinů určených pro stereolitografický 3D tisk. Toho je dosahováno přidáním hliníkového prášku do samotného resinu. Elektrická vodivost bude porovnána s dalšími kompozitními materiály určenými pro stereolitografický 3D tisk se zlepšenou vodivostí. Při tom jsou sledovány i mechanické vlastnosti výsledných produktů. Cíle je dosahováno s nejvyšší ekonomickou efektivitou, která bude porovnána pomocí nákladů na výrobek s technologií ohýbání hliníkového drátu. Obmyšleným výrobkem je elektroda určená pro elektrolýzu vody.

Klíčová slova: 3D tisk, stereolitografie, kompozitní materiály, elektrická vodivost.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to enhance electrical conductivity and dielectric properties of photopolymeric resins made for stereolithographic 3D print. This is accomplished that by addition of aluminium powder into resin. Electrical conductivity will be compared with other composite materials with enhanced electrical conductivity, that are made for stereolithographic 3D print. While doing this the mechanical properties of printed products are also measured. Part of the aim is to achieve the enhancement with maximal economical effectivity, which will be compared using costs per product. Comparison will be between stereolithography and aluminium bending technologies and used product will be electrode for electrolysis.

Keywords: 3D printing, stereolithography, composite materials, electrical conductivity.

OBSAH

ÚVOD	11
KAPITOLA 1: POPIS TECHNOLOGIÍ A MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PŘI 3D TISKU ..	12
1.1 3D TISK	12
1.1.1 Stereolitografie	14
1.1.1.1 Polymerizace při SLA.....	17
1.1.1.2 Elektricky vodivé materiály pro SLA.....	17
1.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	18
KAPITOLA 2: PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO RESINU S VHODNÝM PLNIVEM	21
2.1 TEST SEDIMENTACE A OVĚŘENÍ KVALITY KOVOVÝCH PRÁŠKŮ	21
2.2 PŘÍPRAVA RESINU	22
KAPITOLA 3: PŘÍPRAVA VZORKŮ	24
3.1 OBECNÝ POSTUP PŘI PŘÍPRAVĚ VZORKŮ	24
3.2 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	25
3.3 ZKOUŠKY PROVEDENÉ POMOCÍ TRHAČKY	26
3.4 DIELEKTRICKÉ ZKOUŠKY	28
3.5 ZKOUŠKA REZISTIVITY	28
3.6 TRANSMISNÍ MIKROSKOPIE	29
KAPITOLA 4: VÝSLEDKY ANALÝZ MECHANICKÝCH, DIELEKTRICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ	30
4.1 KONTROLA KVALITY KOVOVÝCH PRÁŠKŮ	30
4.2 TEST SEDIMENTACE	31
4.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	32
4.3.1 Vrubová houževnatost.....	32
4.3.2 Pružnost (Youngův modul pružnosti).....	32
4.3.3 Tažnost.....	33
4.3.4 Pevnost v tahu.....	34
4.4 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	34
4.4.1 Relativní permitivita.....	34
4.4.2 Ztrátový činitel.....	35
4.5 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI	36
4.5.1 Elektrická rezistivita.....	36
4.6 TRANSMISNÍ MIKROSKOPIE	36
KAPITOLA 5: EKONOMICKÉ POROVNÁNÍ	38
5.1 PŘEDMĚT POROVNÁNÍ	38
5.2 NÁKLADOVÉ POLOŽKY	38
5.2.1 3D tisk + napaření.....	38
5.2.2 Ohýbání hliníkového drátu	39
5.2.3 Společné nákladové položky	40
5.3 ZPŮSOB VÝPOČTU	41
5.3.1 Výpočty výdajů.....	41
5.3.2 Výpočet odpisů.....	43
5.3.3 Výpočet cash flow	43
5.3.4 Výpočet nákladů na výrobek.....	44

5.4 VÝSLEDEK VÝPOČTU.....	44
5.5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA	45
ZÁVĚR.....	46
LITERATURA.....	48
PŘÍLOHA A:.....	50
SEZNAM ZKRATEK.....	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Nákrasy jednotlivých typů výrobních technologií [1]	12
Obr. 1-2 Technologie pro 3D tisk (na základě [1-2]).....	13
Obr. 1-3 Princip laser SLA a MSLA [6] (upraveno).....	15
Obr. 1-4 Pole LED v tiskárně SL1S od firmy Original Prusa [7]	15
Obr. 1-5 Uspořádání bottom up vs top down [1] (upraveno)	16
Obr. 1-6 Typy kompozitních materiálů podle použité výztuže [11]	19
Obr. 1-7 Příklad synergického chování kompozitního materiálu [10].....	20
Obr. 2-1 Snímek hliníkového prášku vytvořený pomocí elektronového mikroskopu	21
Obr. 2-2 Snímek měděného prášku vytvořený pomocí elektronového mikroskopu	22
Obr. 2-3 Použitá ultrazvuková lázeň PS – 20 A	23
Obr. 3-1 Ukázka chyby při tisku vzniklé kvůli nedostatečné přilnavosti vzorku k podložce	24
Obr. 3-2 Použité přístroje (nalevo mycí a vytvrzovací stanice CW1 a napravo tiskárna Original Prusa SL1)	25
Obr. 3-3 Přístroj na měření vrubové houževnatosti RESIL 5.5 od výrobce Ceast	26
Obr. 3-4 Digitální model vzorků použitých pro testování vrubové houževnatosti	26
Obr. 3-5 Trhačka X-250-3 od výrobce Testometric	27
Obr. 3-6 Digitální model vzorků použitých pro testy na trhače.....	27
Obr. 3-7 Digitální model vzorků použitých pro dielektrické testy, test rezistivity a transmisní mikroskopii.....	28
Obr. 4-1 Porovnání vzorků pro test sedimentace ihned po smíchání (nalevo) a o 2 hodiny později (napravo)	31
Obr. 4-2 Porovnání vzorků pro test sedimentace 2 hodiny po smíchání (nalevo) a 2 dny po smíchání (napravo) ...	31
Obr. 4-3 Graf závislosti vrubové houževnatosti na množství plniva.....	32
Obr. 4-4 Graf závislosti Youngova modulu na množství plniva	33
Obr. 4-5 Graf závislosti tažnosti na množství plniva	33
Obr. 4-6 Graf závislosti tažnosti na množství plniva	34
Obr. 4-7 Graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různá množství plniva	35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1. Přehled materiálů se zlepšenou elektrickou vodivostí (na základě [14]).....	18
Tab. 4-1. Výsledky testů na složení hliníkového prášku.....	30
Tab. 4-2. Výsledky testů na složení měděného prášku.....	30
Tab. 5-1. Investiční výdaje pro technologii 3D tisku.....	38
Tab. 5-2. Materiálové provozní náklady 3D tisku.....	39
Tab. 5-3. Výčet drobného spotřebního materiálu pro 3D tisk.....	39

Obr. 4-8 Graf závislosti ztrátového činitele ne frekvenci pro různá množství plniva	35
Obr. 4-9 Graf závislosti rezistivity na množství plniva..	36
Obr. 4-10 Snímky pořízené transmisním mikroskopem	37
Obr. 5-1 Vývoj ceny hliníku [36].....	41
Obr. 5-2 Citlivostní analýza - růst mezd.....	45
Obr. 5-3 Citlivostní analýza - růst cen hliníku	45

ÚVOD

3D tisk se v posledních letech těší nárůstu v popularitě. Aby tato technologie mohla být využívána ve více odvětvích, jsou zapotřebí nové materiály použitelné pro tuto technologii. Jedním z chybějících materiálů je elektricky vodivý a ekonomicky dostupný materiál pro stereolitografii. Dalším důležitým faktorem jsou mechanické vlastnosti materiálu, u nichž je nežádoucí jejich výrazné zhoršení.

V první části jsou probrána již známá fakta ohledně 3D tisku a zkoumaných materiálů se sníženou rezistivitou (zlepšenou elektrickou vodivostí), která budou následně použita pro porovnání.

V druhé části jsou uvedeny metody pro zjištění vhodnějšího plniva a pro charakterizaci vzorků po stránce elektrických, dielektrických a mechanických vlastností. Dále jsou v této části uvedeny výsledky vzešlé z těchto metod.

V poslední části je ekonomické porovnání dvou technologií (3D tisk + napaření vs ohýbání hliníkového drátu). Pro porovnání je využito ročních ekvivalentních nákladů na výrobek, po dobu životnosti.

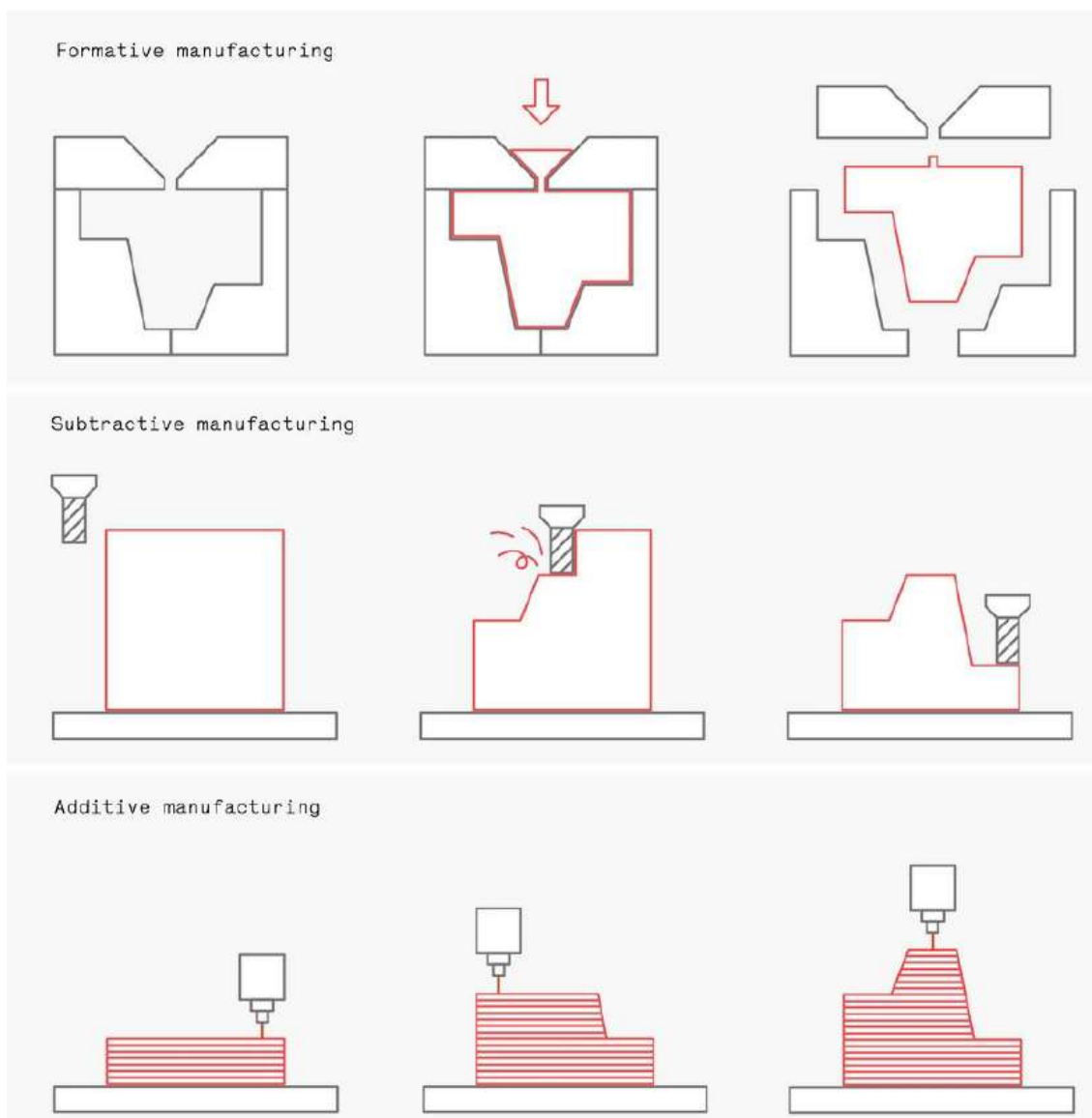
Cílem této práce je vytvoření materiálu vhodného pro stereolitografii se zvýšenou vodivostí a ekonomicky porovnat dvě odlišné technologie vyrábějící stejný produkt.

KAPITOLA 1: POPIS TECHNOLOGIÍ A MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PŘI 3D TISKU

1.1 3D tisk

Obecně se výrobní technologie dělí na tři základní skupiny [1]:

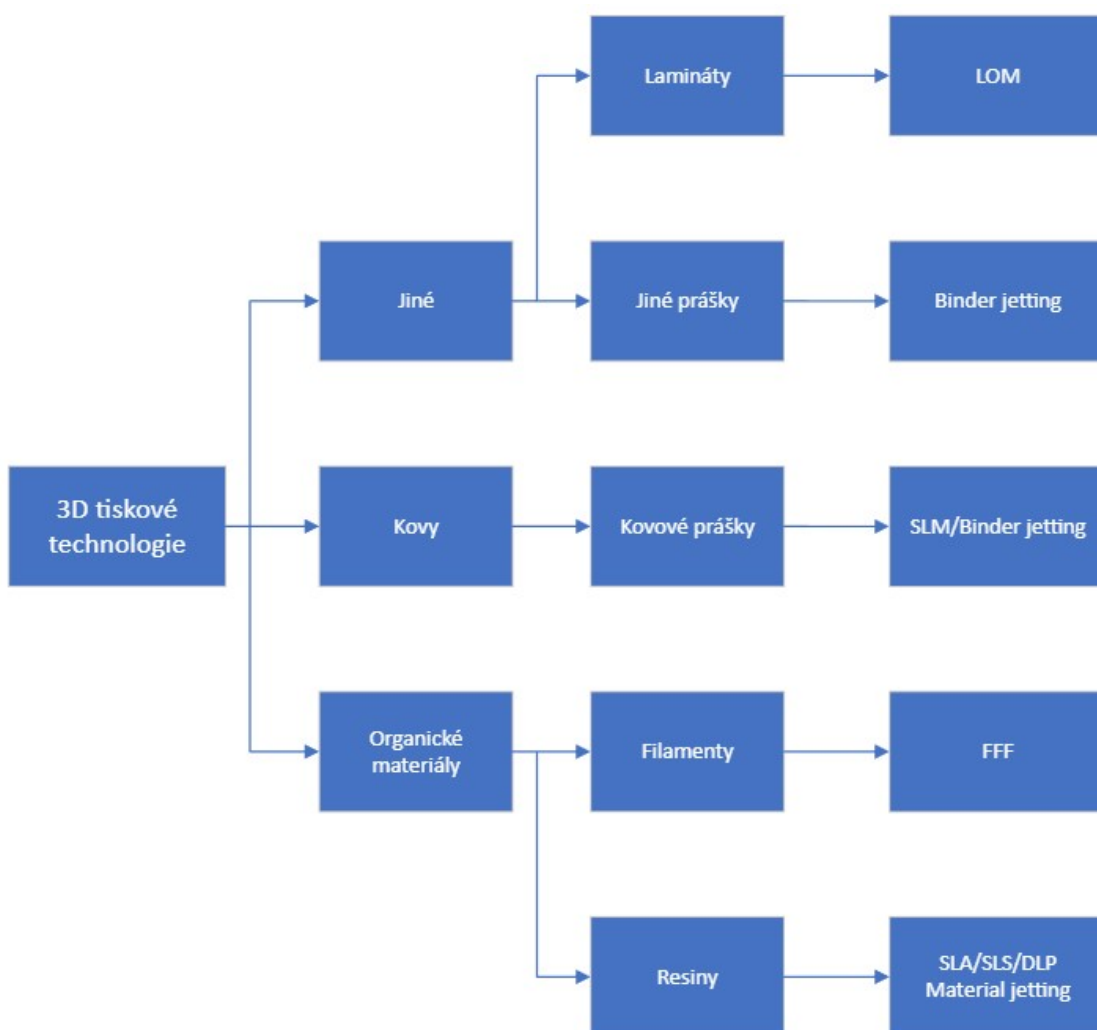
- Formativní výroba (využívá forem, tepla a tlaku)
- Subtraktivní výroba (využívá odstranění materiálu)
- Aditivní výroba (využívá vytváření po jednotlivých vrstvách)



Obr. 1-1 Nákresy jednotlivých typů výrobních technologií [1]

3D tisk se řadí mezi aditivní výrobní technologie. Hlavními výhodami 3D tisku jsou, že celý výrobní proces je velmi rychlý (dá se stihnout i za méně než dva týdny), že stálé náklady jsou v porovnání s ostatními výrobními technologiemi malé a že odpad z výroby je minimální. Nevýhodou 3D tisku oproti ostatním výrobním technologiím může být horší kvalita povrchu. [2]

3D tisk se dělí podle materiálu a následně podle způsobu vytváření vrstev. Takových technologií existuje mnoho a každá z nich má jiné výhody a nevýhody, proto se pro každou aplikaci hodí jiná technologie. Přehled nejčastějších je uveden v obrázku 1-2.



Obr. 1-2 Technologie pro 3D tisk (na základě [1])¹

3D tisk se v dnešní době uplatňuje v medicíně na výrobu protéz, podpěr pro růst tkání, implantátů, anatomických modelů, speciálních operačních nástrojů, pouzder naslouchátek a

¹ LOM = Laminated object manufacturing, SLM = Selective laser melting, FFF = Fused filament fabrication, SLS = selective laser sintering, DLP = Digital light processing

zubních pomůcek [3], dále pro ukládání energie v elektrochemických zdrojích [4] nebo v chemii pro výrobu laboratorních nástrojů.

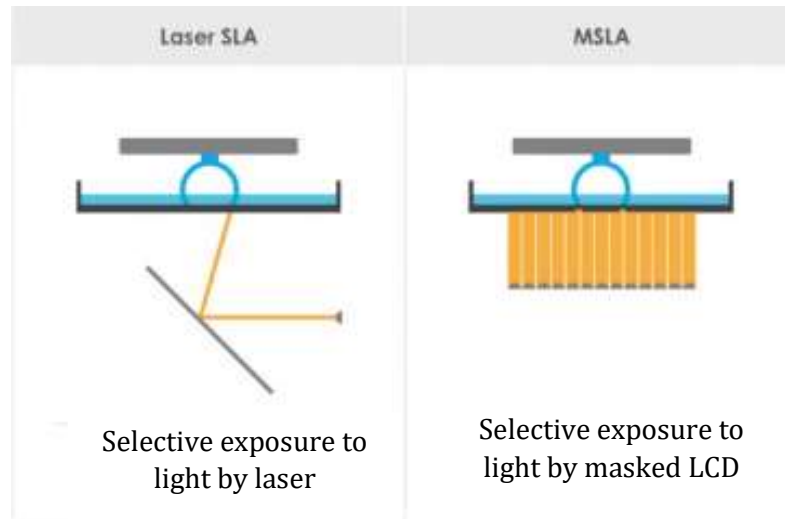
Proces 3D tisku se skládá z pěti základních částí. První část je vytvoření 3D modelu ať už pomocí skenování již existujícího výrobku nebo pomocí vytvoření digitálního 3D modelu v Computer Aided Design softwaru (CAD). Druhou částí procesu 3D tisku je tzv. „slicování“, při němž dochází k převodu z 3D modelu na G-code, což je programovací jazyk, který se používá pro ovládání 3D tiskárny. G-code obsahuje informace nejen o velikosti jednotlivých objektů, ale například i tloušťku jedné vrstvy nebo dobu vytváření jedné vrstvy a je jiný pro každý typ tiskárny. Pro druhou část procesu 3D tisku se využívá skupina softwarů označovaná jako slicery mezi, které patří například Netfabb, Slic3r nebo PrusaSlicer. Třetí část procesu je samotný tisk, kdy dochází k vytváření objektu, který je plně automatizovaný podle G-codu a probíhá po vrstvách. Čtvrtou částí je odstranění objektu z podložky, na níž je vytvářen. Může jít i o velmi složitý a precizní proces vyžadující specifické prostředí a zkušené pracovníky. Pátou částí je post processing, který se stejně jako tisk a odstranění objektu z podložky liší na základě zvolené výrobní technologie. Mezi časté metody post processingu patří odstranění podpěr nebo osvit UV zářením. [1]

1.1.1 Stereolitografie

Stereolitografie (SLA) je jedna z metod 3D tisku využívajících organických materiálů pro vytváření výsledného objektu. Tuto technologii si v roce 1986 nechal patentovat Charles W. Hull [1].

Stereolitografie spočívá ve vytvrzování vrstev z resinu složeného z fotoiniciátorů, monomerů a oligomerů, které jsou následně osvětleny světlem (většinou UV), čímž dochází k polymerizaci, a tím i k již zmiňovanému vytvrzení[1].

Původní SLA tiskárny využívaly dvou pohyblivých zrcátek (jedno pro osu x a jedno pro osu y) a UV laser jako zdroj světla. V dnešní době se jako zdroj používají pole LED, která jsou pomocí masky zakryta v místech, kde nechceme, aby došlo k vytvrzení. Díky tomuto použití masek se také občas tento typ procesu nazývá masked SLA (MSLA) [1].

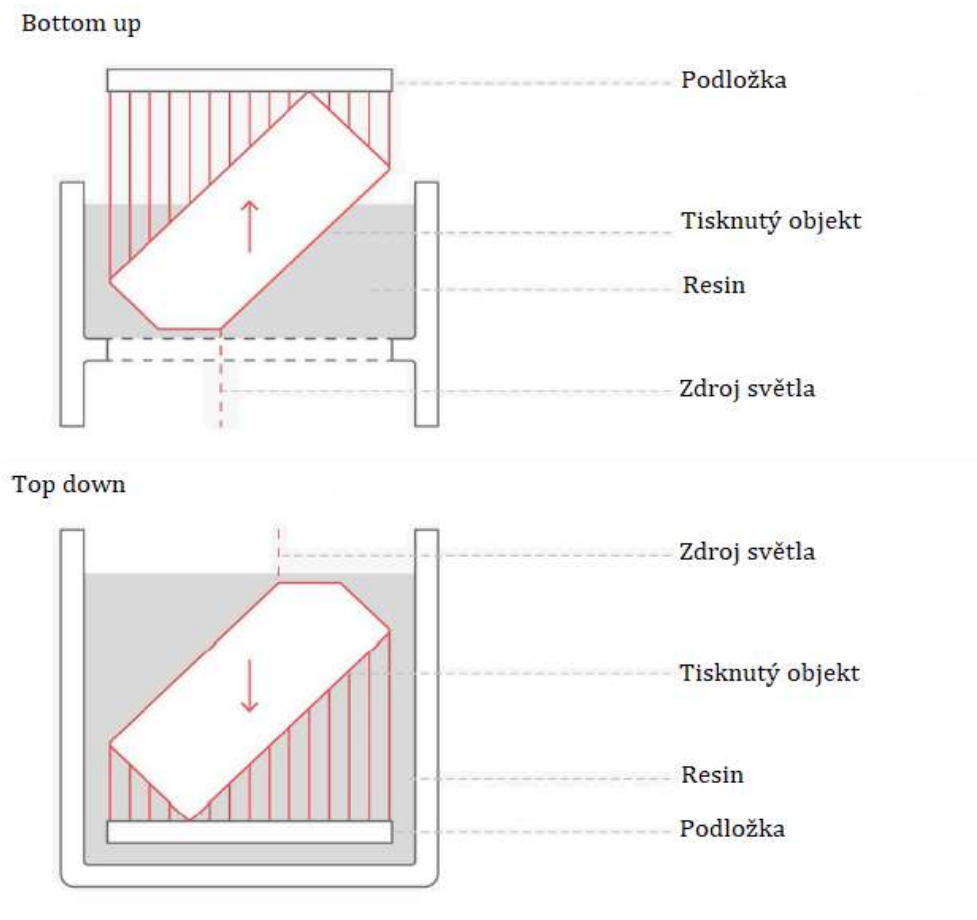


Obr. 1-3 Princip laser SLA a MSLA [6] (upraveno)



Obr. 1-4 Pole LED v tiskárně SL1S od firmy Original Prusa [7]

Tiskárny se dále rozlišují podle způsobu provedení. Způsoby provedení jsou dva (*bottom up* a *top down*) a jsou ukázány na obr. 1-5.



Obr. 1-5 Uspořádání bottom up vs top down [1] (upraveno)

Hlavními výhodami použití SLA tiskárny s uspořádáním *bottom up* oproti uspořádání *top down* jsou potřeba menšího množství resinu pro tisk, jednodušší výměna resinu, jednodušší kontrola tloušťky vrstvy a menší velikost a s tím i spojená cena tiskárny. Naopak výhodami *top down* uspořádání oproti uspořádání *bottom up* jsou rychlost procesu (stačí posun dolů, u *bottom up* vždy posun nahoru a poté dolů), menší potřeba podpůrného materiálu a menší šance chyby z důvodu špatné přilnavosti k podložce (u *bottom up* musí být adhezní síla vyšší než gravitační, k čemuž pomáhá poškrábání podložky).[1]

Při tisku s tiskárnou s uspořádáním *bottom up* nejprve podložka sjede do vaničky s resinem, dále pak dojde k osvitu zamaskovaným LED polem, poté vyjede podložka s tisknutým objektem mimo vaničku, přičemž dochází k promíchávání resinu nakláněním vaničky. Tento proces se neustále opakuje, než dojde k úplnému vytisknutí požadovaného objektu. Při použití tiskárny s uspořádáním *top down* je proces obdobný s rozdíly, že podložka se posouvá směrem dolů do vaničky, tedy tisknutý objekt neopouští a že místo míchání dochází ke stěru přebytečného nevytvrzeného resinu z tisknutého objektu.

Často se při použití technologie SLA využívá post processingu, ať už k odstranění podpůrných struktur nebo zejména k dalšímu vytvrzení v zařízeních k tomu určených. Dodatečné vytvrzování využívá opět pole UV LED, které osvětluje vyráběný objekt, a tím způsobuje polymerizaci. Aby vyráběný objekt byl požadovaných rozměrů musí se nejprve očistit od přebytečného resinu, v němž byl ponořen, k čemuž se často používá organických rozpouštědel jako např.: acetonu.

1.1.1.1 Polymerizace při SLA

Polymerizace „je proces, v jehož průběhu se monomer nebo směs monomerů přeměňuje na polymer [13]“, tedy „na látku tvořenou molekulami, pro které je charakteristické mnohonásobné opakování jednoho nebo více druhů atomů nebo skupin atomů (konstitučních jednotek) navzájem spojených v tak velkém počtu, že existuje řada vlastností, které se znatelně nezmění přidáním nebo odstraněním jedné nebo několika konstitučních jednotek [13].“

Při 3D tisku pomocí SLA technologie se využívá radikálové polymerizace, která využívá volných radikálů (sloučenin s nepárovým elektronem) a monomerů s dvojnou vazbou mezi uhlíky. Radikálová polymerizace se skládá ze čtyř částí, a to z generace, iniciace, chemické růstové reakce a terminace.

Při generaci dochází k osvětlení fotoiniciátoru UV zářením, díky kterému dochází k rozkladu fotoiniciátoru na radikály, které pak iniciují chemickou růstovou reakci. Při této reakci musí být počet nově vznikajících malý, aby se stačilo odvádět reakční teplo a nedocházelo k vzájemné reakci radikálů, což by mělo za výsledek nižší polymerizační stupně polymerních řetězců. Terminace reakce pak nastává, pokud dojde k vyčerpání volných radikálů, což v případě využití SLA nastává při skončení osvětlení UV zářením.

1.1.1.2 Elektricky vodivé materiály pro SLA

V současné době neexistuje samostatně vodivý resin (rezistivita bývá větší než $10^{12} \Omega \cdot m$), který by se dal použít přímo pro výrobu elektronických zařízení, baterií či na elektromagnetické stínění. Pro SLA je to způsobené zejména požadavkem na resin, aby byl daný resin vytvrditelný pomocí UV záření. Z tohoto důvodu je zatím jediný známý způsob na zvýšení elektrické vodivosti přidání elektricky vodivého plniva, a tím vytvoření kompozitního materiálu. Vodivost takto vzniklého materiálu je proto nutně závislá na množství plniva, které je omezeno (pro každý typ plniva jinak) přilnavostí mezi vrstvami při tisku, která je přidáním plniva snížena. [14]

V tabulce 1-1 je uveden základní přehled již zkoumaných materiálů, u kterých se projeví zlepšené elektrické vlastnosti.

Tab. 1-1. Přehled materiálů se zlepšenou elektrickou vodivostí (na základě [14])

Plnivo	Matrice	Elektrické vlastnosti	Reference
PEDOT:PSS (1:5)	PEGDA	$0,05 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$	[15]
PANI nanotrubičky (5 hm%) a grafen (1,2 hm%)	Polyakrylátový resin	$4\cdot 10^{-9} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$	[16]
Uhlíkové nanotrubičky (0,3 hm%)	PEGMEMA	$8\cdot 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$	[17]
Stříbrné nanočástice (20 hm%)	PEGDA	$1,5\cdot 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$	[18]
Více stěnné uhlíkové nanotrubičky (0,3 hm%)	Resin na bázi akrylátů	$2,7\cdot 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$	[19]
Měď ze solného prekursoru (20-30 obj%)	Resin na bázi akrylátů	$0,0012 \Omega\cdot\text{mm}$	[20]
Nikl ze solného prekursoru (20-30 obj%)	Resin na bázi akrylátů	$0,0035 \Omega\cdot\text{mm}$	[20]

Vysvětlení zkratk použitých v Tab. 1-1:

- PEDOT:PSS = poly(3,4-ethylendioxythiofen)-poly(styrensulfát)
- PEGDA = polyethylenglykoldiakrylát
- PANI = polyanilín
- PEGMEMA = polyethylenglykolmethylethermethakrylát

1.2 Kompozitní materiály

Kompozitním materiálem se rozumí synergická kombinace dvou a více různých navzájem od sebe odlišitelných komponent (chemicky nezávislých složek). Častým příkladem kompozitního materiálu bývá polymer obsahující anorganické plnivo. [8]

Komponenty kompozitního materiálu se nazývají matrice a výztuž. Matrice je komponenta, která je spojitá a jejími úkoly jsou ochraňovat výplň (před korozi či mechanickým namáháním), udržení materiálu v celku a přenos mechanického napětí z jedné části výplně na jinou. Matrice mohou být z polymerního, kovového nebo keramického materiálu či z karbonu. Jednotlivé typy matic se od sebe navzájem liší zejména mechanickou pevností a maximální teplotou, kterou vydrží. Výztuž je komponenta, která je rozptýlena v matrici. Typy výztuže se dají rozdělit podle jejich geometrického tvaru na výztuže částicové a výztuže vláknové (dále se dělí podle délky

vláken na krátko-vláknové a dlouho-vláknové). Podle typu výztuže se také dají rozdělit typy kompozitních materiálů (Obr. 1-6). [9]



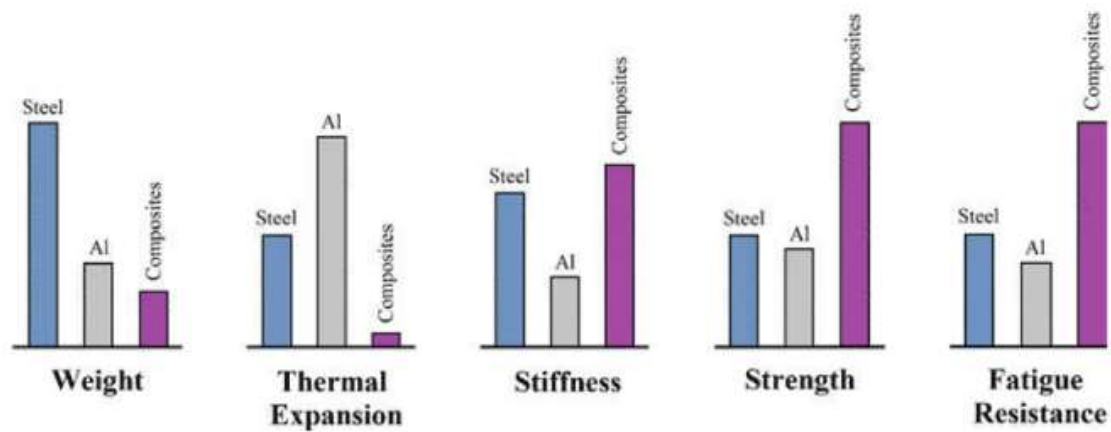
Obr. 1-6 Typy kompozitních materiálů podle použité výztuže [11]

Časticová výztuž se používá pro zvýšení elektrické vodivosti [12], odolnosti při zvýšených teplotách, tvrdosti a odolnosti proti otěru. Většinou jsou částice rozmístěny náhodně, což může negativně i pozitivně ovlivnit vlastnosti materiálu a může znamenat, že požadované vlastnosti má jen část objektu vyrobeného z kompozitního materiálu. Často se pro časticovou výztuž používají oxidy kovů, kovové částice, saze či skleněné kuličky. [9]

Vláknová výztuž se používá pro zvýšení pevnosti, modulu pružnosti a pro zvýšení houževnatosti. Pro samotná vlákna je typické, že jejich vlastnosti jsou anizotropní (tedy mají v různých směrech různé vlastnosti jako např.: modul pružnosti bývá u vláken mnohem vyšší ve směru osy vlákna než ve směru kolmo k ose). Mezi nejčastěji využívané typy vláken patří skelná, karbonová, borová a kovová vlákna. [9]

Na rozhraních matrice a výztuže může docházet k chemickým reakcím nebo jiným procesům, kvůli kterým může docházet ke zhoršení nebo naopak ke zlepšení vlastností kompozitního materiálu.[9]

Jak již bylo zmíněno výše, v kompozitním materiálu dochází k synergickému chování jednotlivých komponent. Tím se rozumí, že alespoň některá z výsledných fyzikálních vlastností materiálu je lepší než daná fyzikální vlastnost u jednotlivých komponent. Příklad takového chování je ukázán na Obr. 1-7.[10]



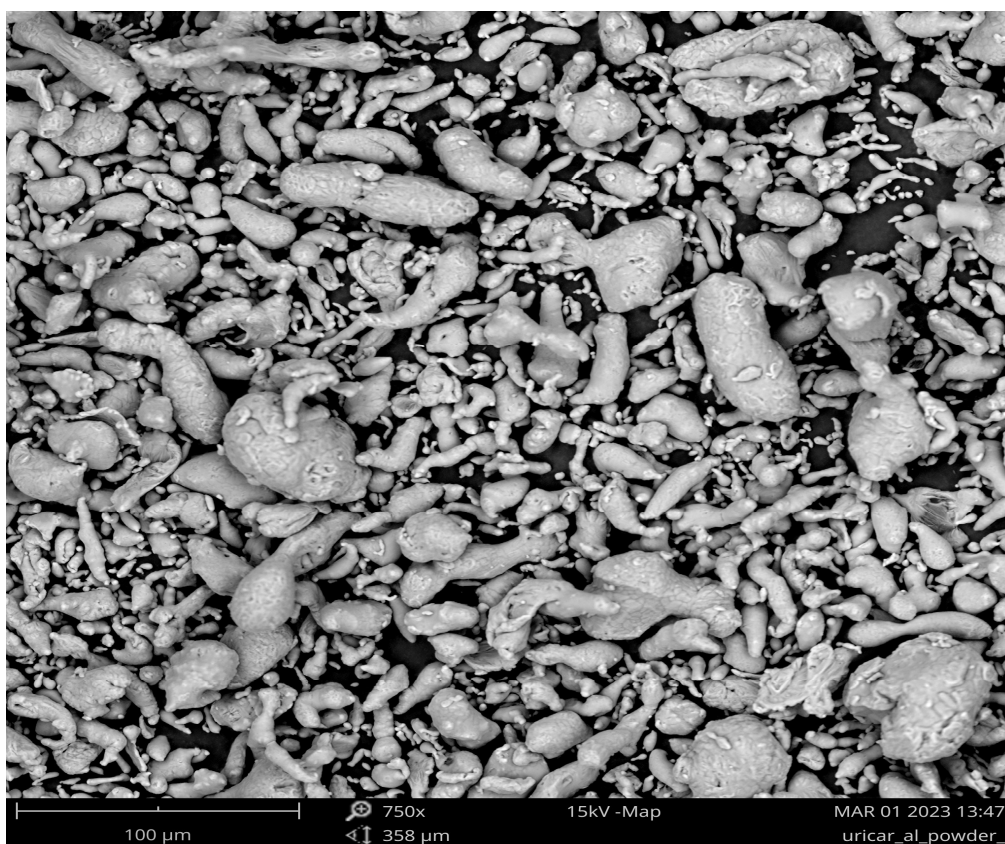
Obr. 1-7 Příklad synergického chování kompozitního materiálu [10]

Použití kompozitních materiálů je v dnešní době velmi rozšířené a zahrnuje vesmírný průmysl (výroba antén a optických zařízení), letecký průmysl (dnešní letadla jsou tvořena z cca 50 % z kompozitních materiálů), vojenský průmysl, energetický průmysl (větrné turbíny), elektronika (elektricky vodivá lepidla), a mnoho dalších. [9]

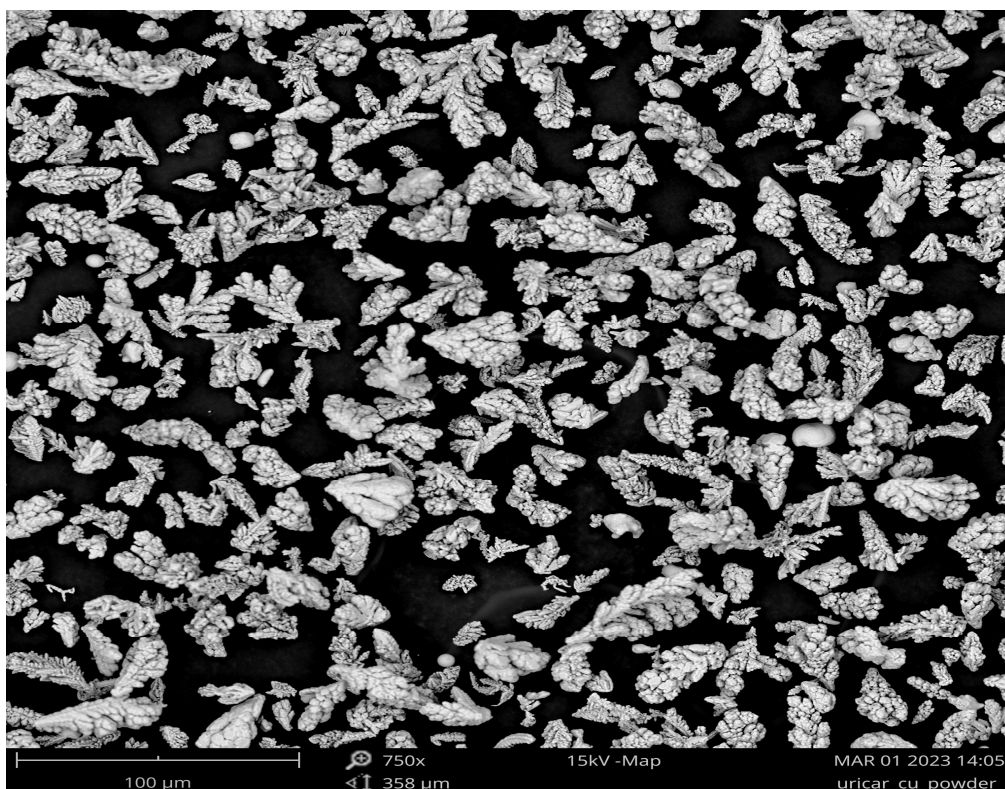
KAPITOLA 2: PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO RESINU S VHODNÝM PLNIVEM

2.1 Test sedimentace a ověření kvality kovových prášků

Jako první experiment byl proveden test sedimentace. Cílem testu sedimentace bylo zjistit, který z vybraných kovových prášků o čistotě 99,7 % (hliník [obr. 2-1] nebo měď [obr. 2-2]) se usazuje pomaleji v resinu, proto abychom určili, zda je lepší používat pro tisk hliník nebo dendritickou elektrolytickou měď (oba prášky byly vyrobeny firmou Widerangemetals). Velikosti částic a jejich čistota (na 4 místech) byly ověřeny pomocí elektronového mikroskopu Phenom ProX od americké firmy Thermofisher Scientific.



Obr. 2-1 Snímek hliníkového prášku vytvořený pomocí elektronového mikroskopu



Obr. 2-2 Snímek měděného prášku vytvořený pomocí elektronového mikroskopu

Pro samotný test sedimentace byly nejprve vybrány vhodné kovové prášky podle velikosti částic. Cílem bylo vybrání co nejmenších částic, pro zajištění pomalejší sedimentace těchto částic. Výsledkem výběru byly prášky z mědi a hliníku, které oba měly částice o velikosti 45 μm . Dále byly do zkumavek připraveny směsi obsahující 10 ml resinu Flashforge LCD 405 nm UV-curing standard transparentní barvy a 0,1 g vybraných kovových prášků. Připravené směsi byly po dobu 15 minut míchány pomocí ultrazvukové lázně PS-20 a poté ponechány po dobu dvou dní ve svislé poloze na místě, kam dopadá co nejméně slunečního záření, aby nedošlo případnému částečnému vytvrzení resinu ve zkumavce.

2.2 Příprava resinu

Tisknuté objekty byly připravovány ze směsi resinu a hliníkového prášku. Pro přípravu modifikovaného polymerního resinu je potřeba nejprve navážít 100 g resinu Flashforge LCD 405 nm UV-curing standard transparentní barvy (množství takové, aby vystačilo na jeden tisk a nebylo mnoho odpadu, odpovídá přibližně 100 ml) a odpovídající množství hliníkového prášku o čistotě 99,7 % (pro testy bylo použito 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 13 a 15 hmotnostních procent hliníkového prášku ve směsi). Po navážení následuje přesypání hliníkového prášku do sklenice s resinem a promíchání směsi pomocí ultrazvukové lázně pro zajištění co nejrovnoměrnějšího

rozmístění částic. Směsi byly míchány v ultrazvukové lázni PS – 20 A (obr. 2-3) o výkonu 120 W po dobu 15 minut bez přídavného ohřívání.



Obr. 2-3 Použitá ultrazvuková lázeň PS – 20 A

KAPITOLA 3: PŘÍPRAVA VZORKŮ

3.1 Obecný postup při přípravě vzorků

Příprava vzorků začíná jejich návrhem, pro který bylo využito softwaru Prusa Slicer verze 2.4.2. Software Prusa Slicer také provedl slicování na vrstvy podle zadané velikosti vrstev, která byla 0,05 mm a nastavení dalších parametrů tisku jako je například doba osvitů.

Dalším krokem je již dříve připravený modifikovaný resin (příprava viz kapitola 2.2) přelít tak, aby bylo zabráněno tvorbě vzduchových bublin, které by kazily kvalitu tisku, do vaničky 3D tiskárny Original Prusa SL1 (Obr 3-2), na níž jsem byl následně vybrán soubor obsahující G-code pro požadovaný typ vzorků. Potom je možno na tiskárně přenastavit požadované doby osvitů (pro vzorky do 10 váhových procent včetně jsme používali pro prvních 10 vrstev 25 sekund a pro zbývajících vrstvy 15 sekund a pro vzorky s vyšším obsahem hliníkového prášku byli doby osvitů 60 sekund pro prvních 10 vrstev a 20 sekund pro vrstvy zbývajících.). Ke změně doby osvitů došlo z důvodu nedostatečné přilnavosti vzorku k podložce při nižší době osvitů (viz Obr. 3-1). Po nastavení doby osvitů je spuštěn tisk, který trvá 20-45 minut v závislosti na počtu vrstev a nastavené době osvitů.

Maximální množství hliníku, se kterým se stále podařilo vytisknout objekty, bylo 15 hm%.

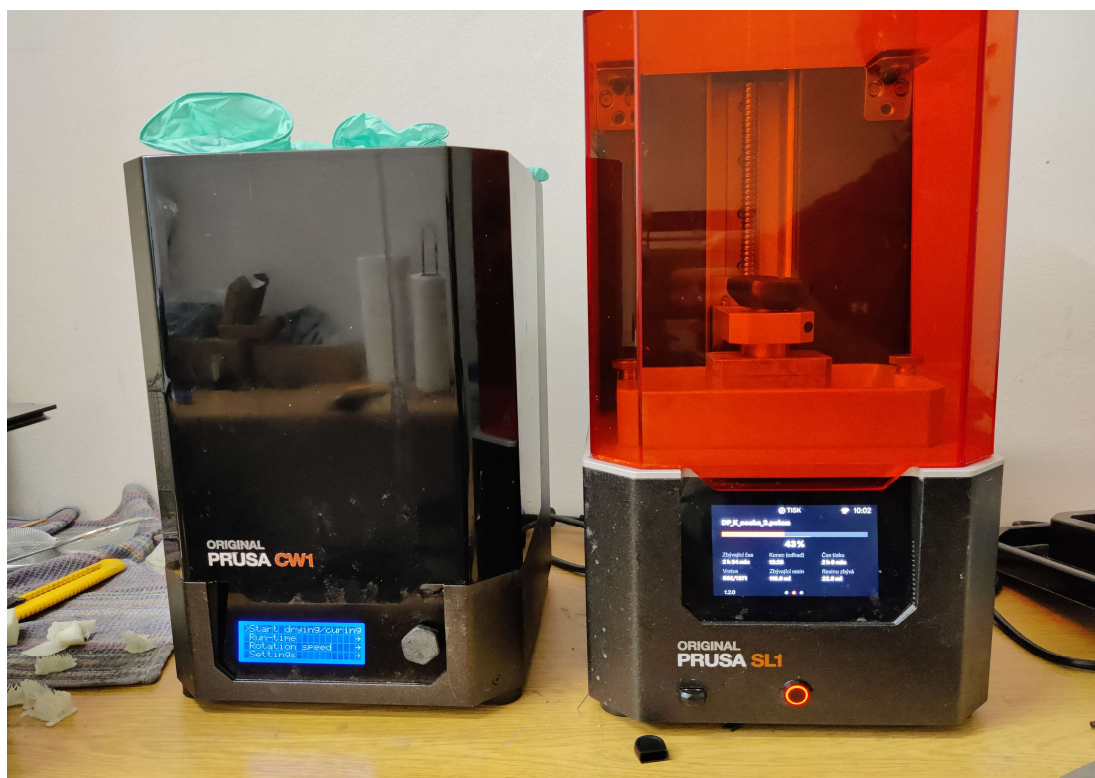


Obr. 3-1 Ukázka chyby při tisku vzniklé kvůli nedostatečné přilnavosti vzorku k podložce

Po skončení tisku byla podložka sundána z držáku a i s vzorky ponořena do nerezové nádrže s izopropylalkoholem, kde z těchto objektů byly pomocí rukou (v ochranných rukavicích) utřeny přebytečné zbytky nevytvrzené směsi z povrchu vzorku. Po očištění byla část každého vzorku pomocí ocelové špachtle nebo řezáku nadzvednuta část, tak aby bylo možné vložit používaný nástroj pod vzorek, a tak odseparovat vzorek od podložky. Toto bylo provedeno pro všechny vzorky. Vzorky sundané z podložky byly dále otírány papírovými utěrkami napuštěnými isopropylalkoholem pro zajištění nezměnění rozměrových parametrů vzorků při dodatečném

vytvrzování, tím že by byla vytvrzena přebytná kapalná směs. Tím je také zabráněno tomu, aby povrch nebyl lepkavý.

Dostatečně očištěné vzorky byly vloženy do mycí a vytvrzovací stanice CW1 (Obr. 3-2), na níž byl zvolen program obsahující pouze *curing* (vytvrzení) a doba programu 5 minut.



Obr. 3-2 Použité přístroje (nalevo mycí a vytvrzovací stanice CW1 a napravo tiskárna Original Prusa SL1)

3.2 Zkouška vrubové houževnatosti

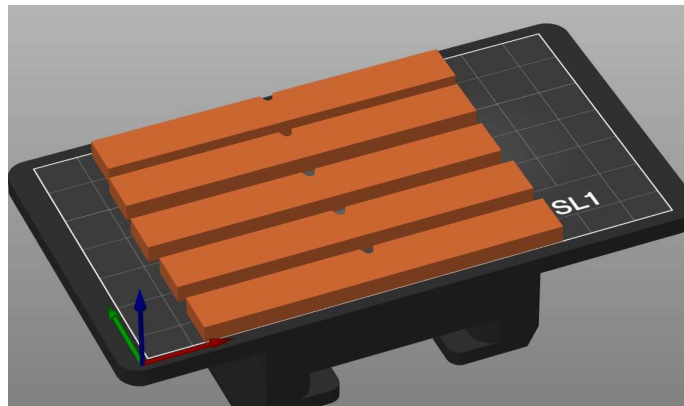
Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena podle normy ASTM D6110 -18 pro vzorky typu B pomocí přístroje RESIL 5.5 od výrobce Ceast (Obr. 3-3). Pro každé hmotnostní procento bylo naměřeno pět vzorků o rozměrech 80x10x4 mm (Obr 3-4). Pro výpočet byla použita rovnice (3-1),

$$\alpha = \frac{E}{h \cdot b} \cdot 1000 \quad (3-1)$$

kde α je vrubová houževnatost (kJ/m²), E je měřená energie (J), h je tloušťka vzorku (mm) a b je šířka vzorku.



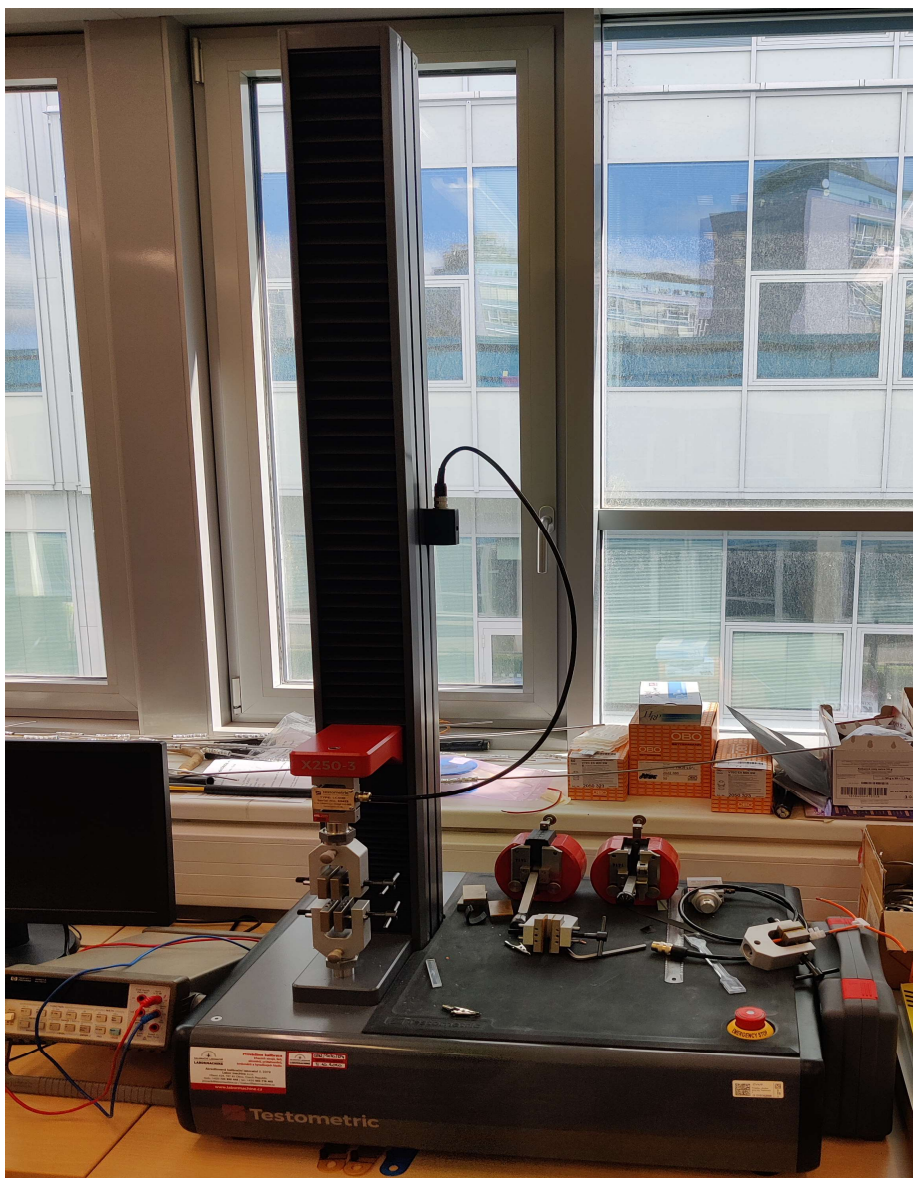
Obr. 3-3 Přístroj na měření vrubové houževnatosti RESIL 5.5 od výrobce Ceast



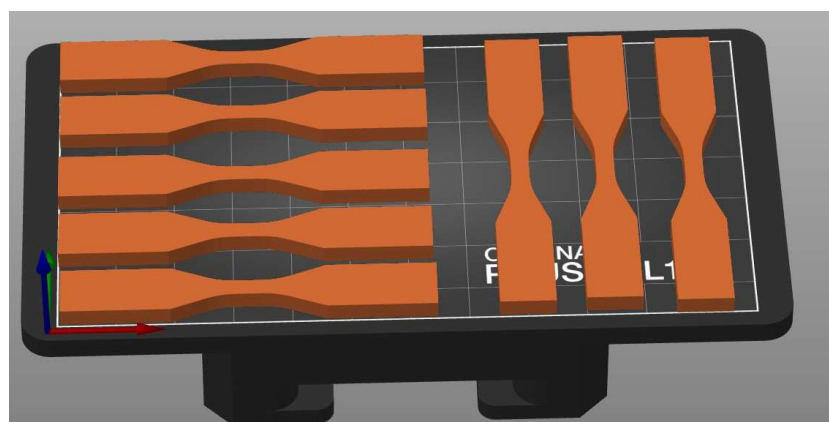
Obr. 3-4 Digitální model vzorků použitých pro testování vrubové houževnatosti

3.3 Zkoušky provedené pomocí trhačky

Zkoušky proběhly podle normy ASTM D638-14. Pro účely zkoušky bylo připraveno 8 vzorků o rozměrech 63,51x9,57x3,2 mm (Obr. 3-6) pro každé hmotnostní procento. Použitým typem vzorků byl typ V podle zmíněné normy. Přístroj použitý pro tento typ charakterizace materiálu byla trhačka X250-3 od firmy Testometric (Obr. 3-5), na níž byl stanoven Youngův modul pružnosti, relativní prodloužení při přetržení vzorku a mechanické napětí při přetržení vzorku. Všechny tyto veličiny jsou počítány softwarem používaným pro ovládání trhačky.



Obr. 3-5 Trhačka X-250-3 od výrobce Testometric



Obr. 3-6 Digitální model vzorků použitých pro testy na trhačce

3.4 Dielektrické zkoušky

Pro dielektrické testy byly vytvořeny válce o průměru podstavy 5 cm a výšce 0,5 mm. U těchto válců byla poté změřena frekvenční závislost relativní permitivity a ztrátového činitele pomocí přístroje TH2818 automatic component analyser a soupravy se dvěma elektrodami a nastavitelného přitlaku. Tento přístroj přímo měří ztrátový čítel, ale relativní permitivita se musí dopočítat pomocí změřené kapacity. Relativní permitivita ϵ_r byla spočtena podle rovnice (3-2)

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot h}{\epsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3-2)$$

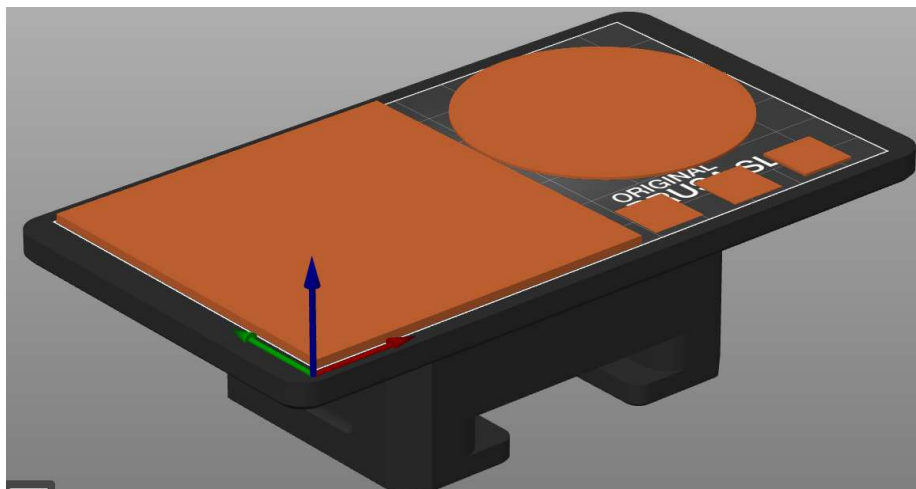
, kde C je změřená kapacita (F), h je tloušťka vzorku (m), ϵ_r počítaná relativní permitivita (-), ϵ_0 permitivita vakua ($F \cdot m^{-1}$) a r je poloměr vzorku (m).

3.5 Zkouška rezistivity

Pro změření rezistivity byly použity stejné vzorky jako pro dielektrické zkoušky. Na tyto vzorky je potřeba napařit tenkou vodivou vrstvu hliníku (při tlaku 5,5 Pa) pro zajištění dobrého elektrického kontaktu mezi měřicími elektrodami a vzorkem. U vzorků s napařeným hliníkem poté byl změřen odpor R pomocí elektrometru Kiethley Model 617 a měřící sady s elektrodami Resistivity Adapter Kiethley 6105. Z naměřeného odporu byla pomocí geometrických parametrů vzorku podle rovnice (3-4) vypočítána rezistivita materiálu ρ .

$$\rho = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot R \cdot h \quad (3-3)$$

, kde ρ ($\Omega \cdot cm$) je rezistivita materiálu, d (cm) je průměr menší napařené části hliníku na vzorku, h (cm) je tloušťka vzorku a R (Ω) je odpor vzorku.



Obr. 3-7 Digitální model vzorků použitých pro dielektrické testy, test rezistivity a transmisní mikroskopii

3.6 Transmisní mikroskopie

Pro ověření množství plniva a jeho rozložení byl použit transmisní mikroskop Dino-Lite AM4113ZT. Pro mikroskopii byly použity vzorky (obr. 3-7) výše s podstavou o rozměrech 10x10 mm a výškou 0,2 mm a 0,5 mm.

KAPITOLA 4: VÝSLEDKY ANALÝZ MECHANICKÝCH, DIELEKTRICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ

4.1 Kontrola kvality kovových prášků

U hliníkového prášku testy ukázaly přítomnost stříbra (Tab. 4-1), zatímco u měděného prášku byla čistota 100% (Tab. 4-2). Velikosti částic odpovídají těm, které uvádí výrobce. Rychlost sedimentace je důležitá pro zajištění rovnoměrného rozmístění částic ve výsledném vzorku.

Tab. 4-1. Výsledky testů na složení hliníkového prášku

Číslo testu	Al molekuly (%)	Al (hm%)	Ag molekuly (%)	Ag (hm%)
1	98,78	95,31	1,22	4,69
2	98,86	95,58	1,14	4,42
3	98,80	95,36	1,20	4,64
4	98,71	95,04	1,29	4,96
Průměr	98,79	95,32	1,21	4,68
Rozptyl	0,0025	0,037	0,0025	0,037

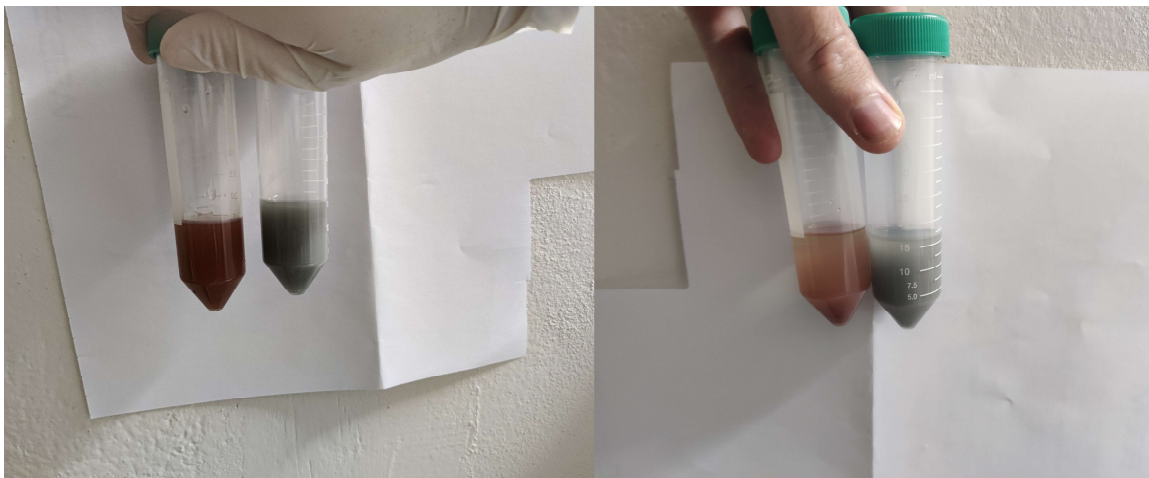
Tab. 4-2. Výsledky testů na složení měděného prášku

Číslo testu	Cu molekuly (%)	Cu (hm%)
1	100	100
2	100	100
3	100	100
4	100	100
Průměr	100	100
Rozptyl	0	0

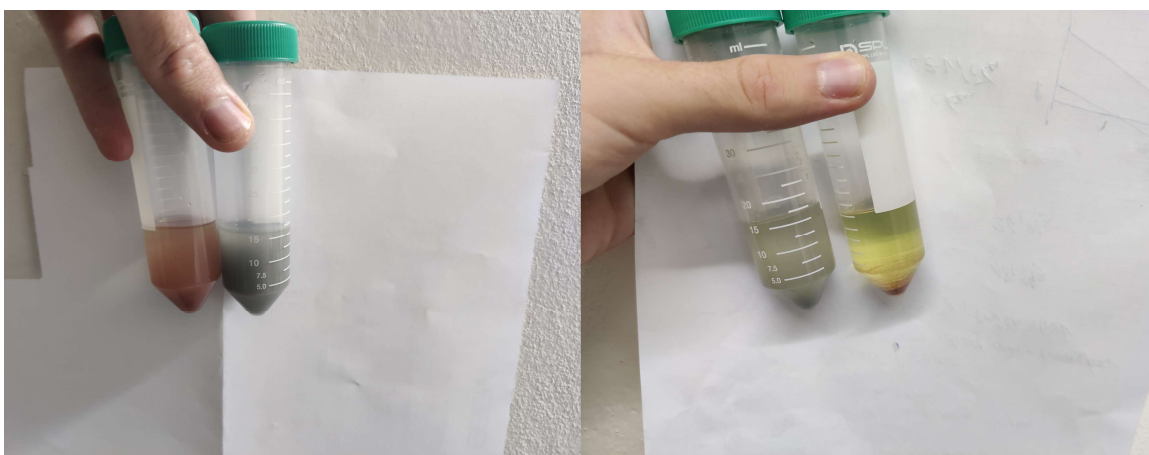
Přítomnost stříbra v hliníkovém prášku by neměla mít negativní vliv na vodivost výsledných vzorků. Hlavním důvodem tohoto testu byla kontrola oxidace jednotlivých prášků. Díky výsledkům testů můžeme vyloučit oxidaci prášku, která by měla negativní vliv na vodivost připravených vzorků.

4.2 Test sedimentace

Výsledky testu v podobě obrázků:



Obr. 4-1 Porovnání vzorků pro test sedimentace ihned po smíchání (nalevo) a o 2 hodiny později (napravo)



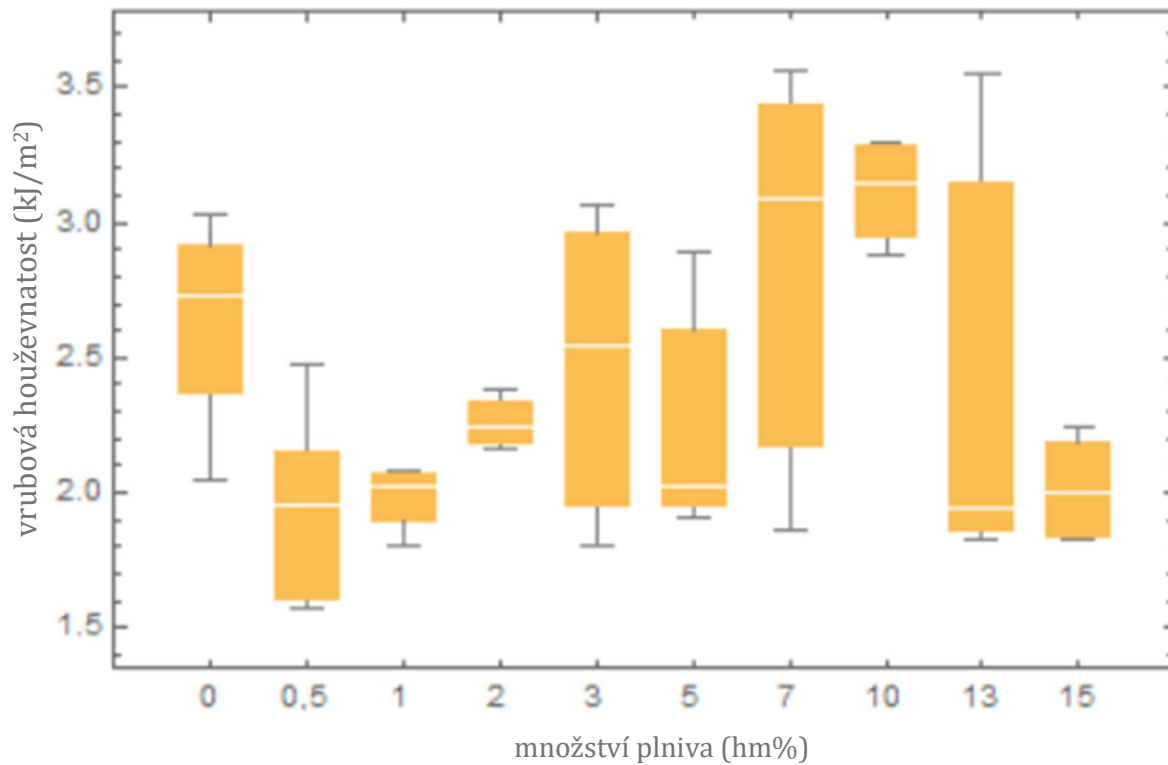
Obr. 4-2 Porovnání vzorků pro test sedimentace 2 hodiny po smíchání (nalevo) a 2 dny po smíchání (napravo)

Na základě optického zhodnocení obr. 4-1 a 4-2, kde jsou hliníkové částice šedostříbrné, měděné částice červenohnědé a resin lehce nažloutlý, bylo dosaženo závěru, že hliníkové částice klesají ke dnu pomaleji než částice měděné v obou časových intervalech, a proto je hliníkový prášek vhodnějším plnivem resinu pro zachování lepší homogenity směsi po dobu stereolitografického 3D tisku.

4.3 Mechanické vlastnosti

4.3.1 Vrubová houževnatost

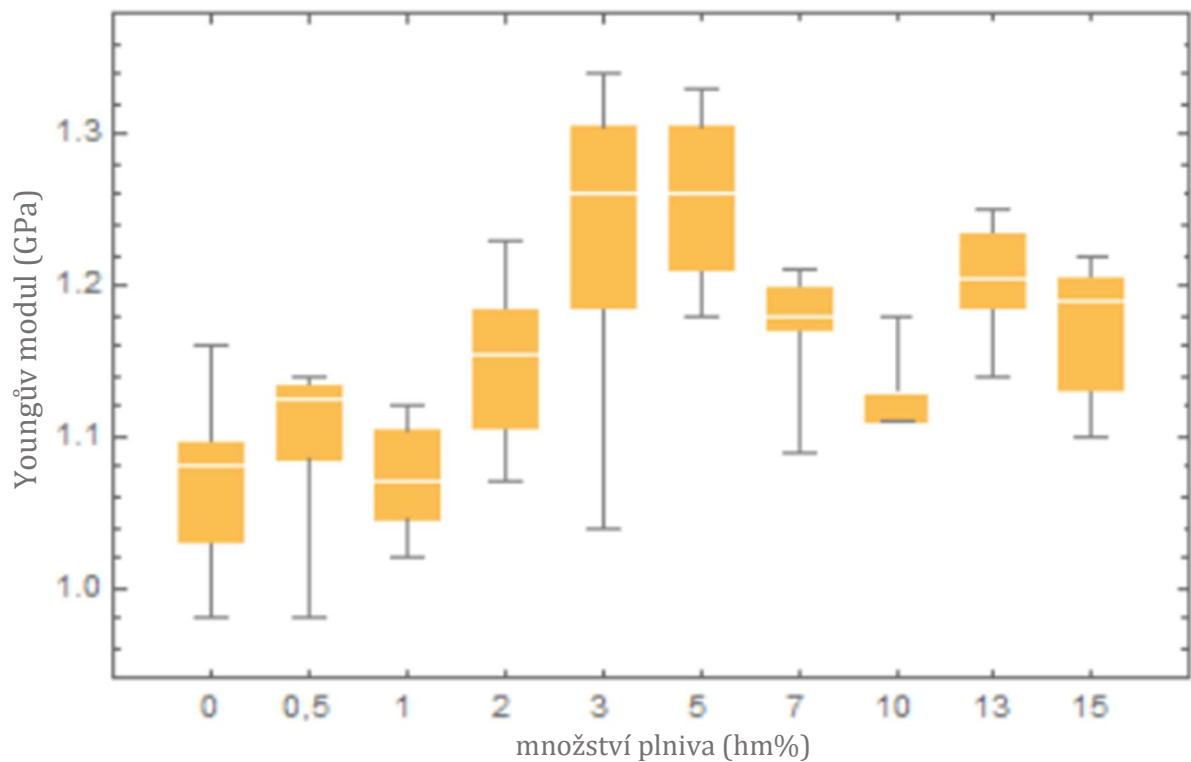
Na obr. 4-3 je vidět, že vrubová houževnatost vzorků s plnivem je horší než u samotného resinu až na jeden případy. V případě 10 hm% plniva se vrubová houževnatost zvyšuje.



Obr. 4-3 Graf závislosti vrubové houževnatosti na množství plniva

4.3.2 Pružnost (Youngův modul pružnosti)

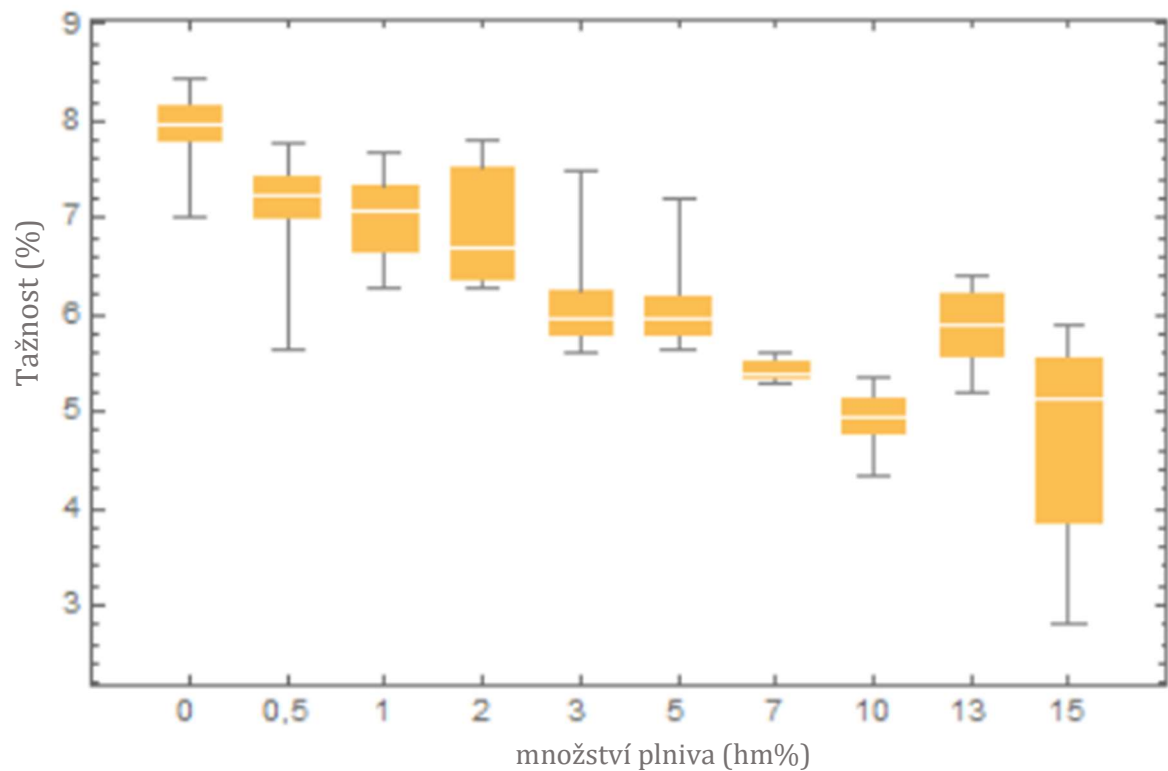
Na obr. 4-4 lze vidět nárůst Youngova modulu pružnosti s nárůstem podílu hliníkového prášku až do 5 hm%, kde už dochází k poklesu Youngova modulu pružnosti oproti jeho maximu, ale stále je vyšší než u vzorků vytištěných bez přidaného plniva.



Obr. 4-4 Graf závislosti Youngova modulu na množství plniva

4.3.3 Tažnost

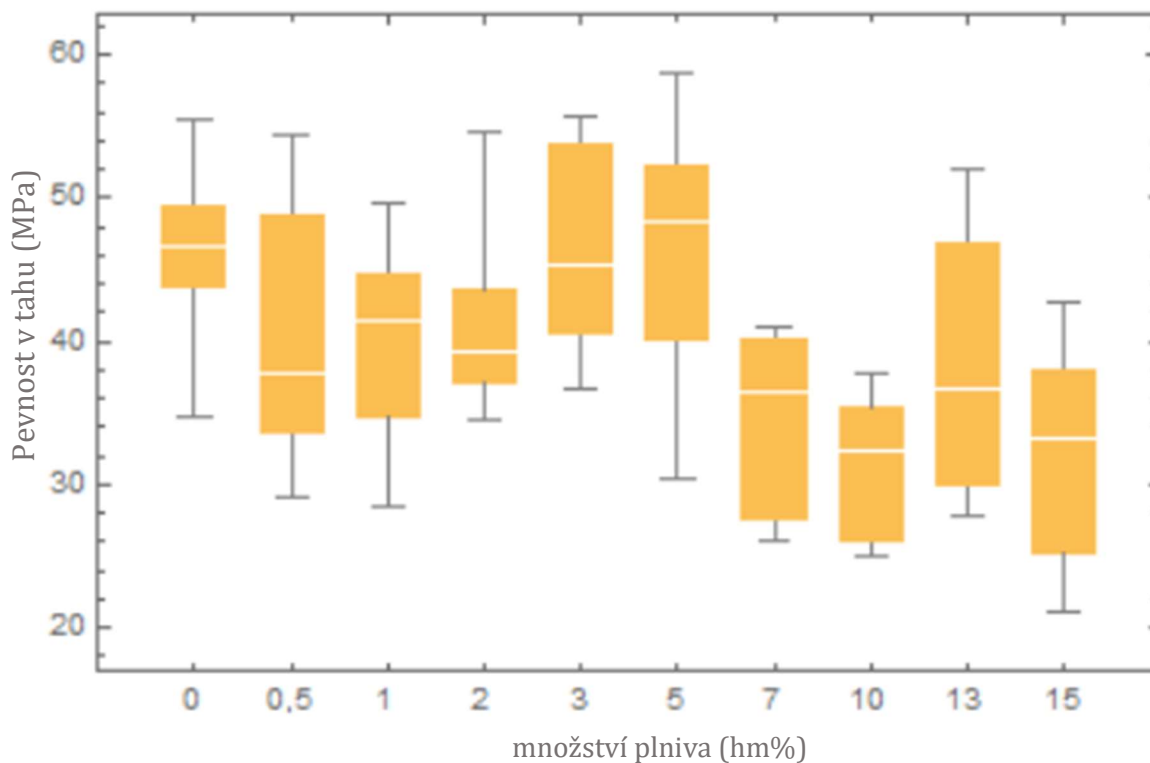
Z grafu na obr. 4-5 je vidět, že materiálu tažnost klesá přidáním hliníkových částic.



Obr. 4-5 Graf závislosti tažnosti na množství plniva

4.3.4 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu pozvolna klesá s přidáním hliníkových částic, jak je vidět na obr. 4-6.

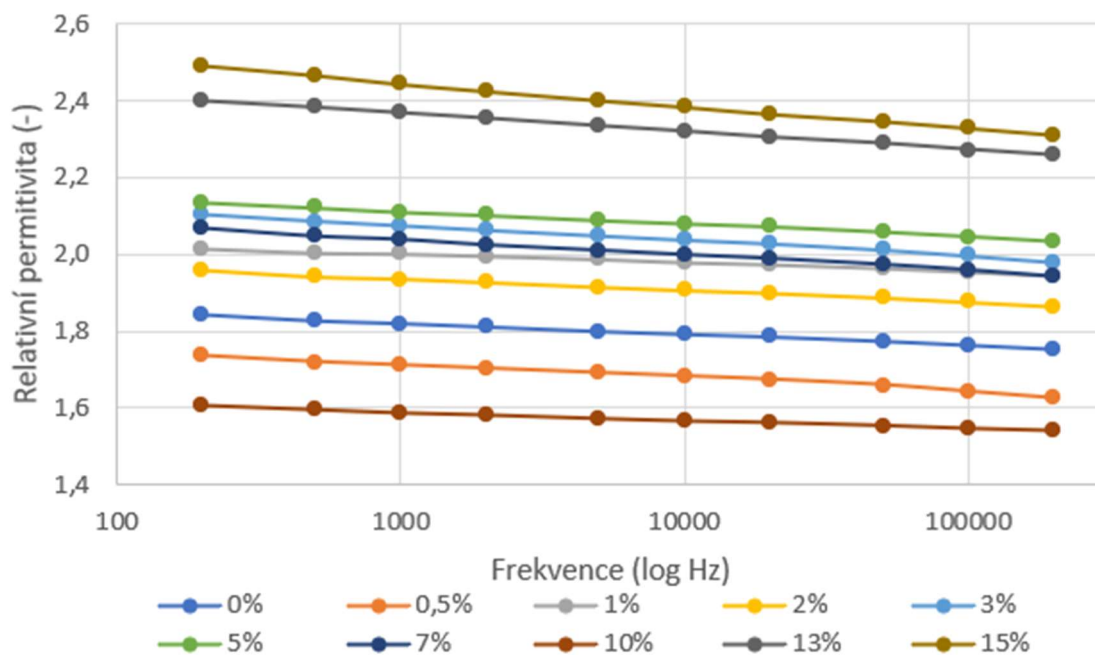


Obr. 4-6 Graf závislosti tažnosti na množství plniva

4.4 Dielektrické vlastnosti

4.4.1 Relativní permitivita

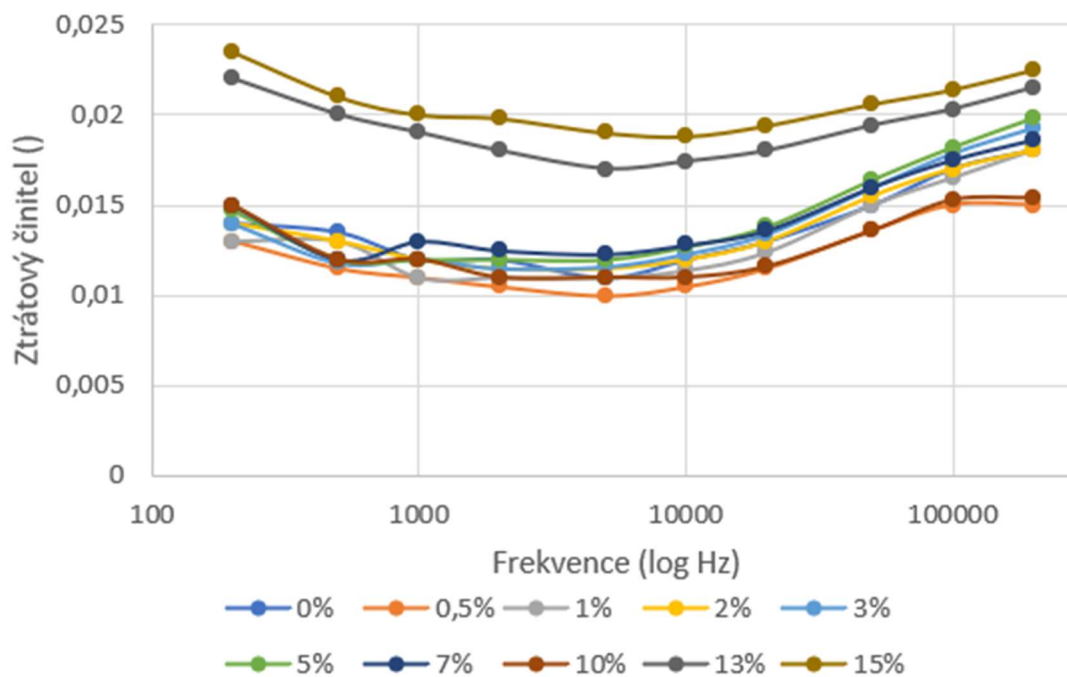
Relativní permitivita roste přidáním hliníkových částic do resinu. Výjimku tvoří vzorky se 0,5 a 10 hm% plniva. U vzorků s 13 a 15 hm% hliníku je relativní permitivita výrazně vyšší než u ostatních vzorků (obr. 4-7).



Obr. 4-7 Graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různá množství plniva

4.4.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel roste obdobně jako relativní permitivita. Výrazný rozdíl je mezi 13 a 15 hm% a zbytkem vzorků, u nichž je ztrátový činitel podobný (obr. 4-8).

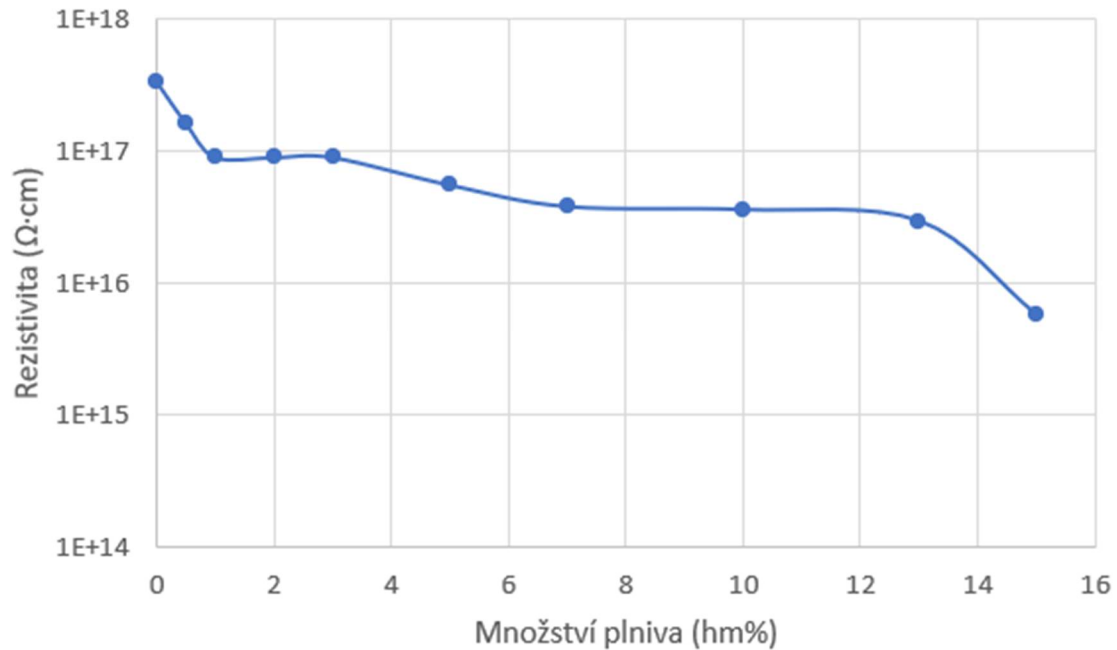


Obr. 4-8 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci pro různá množství plniva

4.5 Elektrické vlastnosti

4.5.1 Elektrická rezistivita

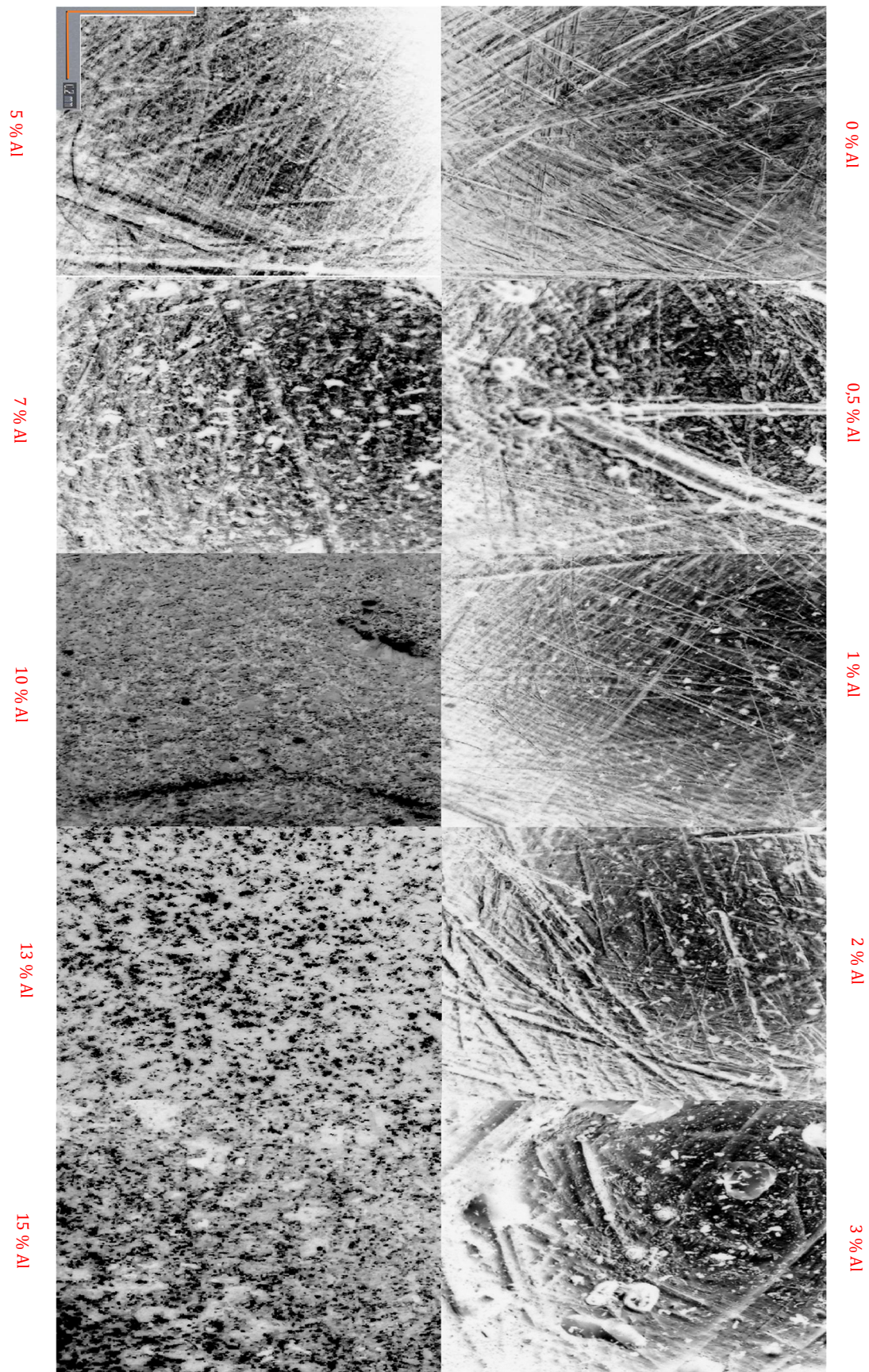
Z grafu na obr. 4-9 je vidět, že přidání hliníku snižuje rezistivitu (zvýšíme elektrickou vodivost). Toto zlepšení je ovšem pouze o 2 řády. Pro další zlepšení by bylo potřeba přidat více plniva pro překonání perkolačního prahu, který je očekáván dle směrnice v okolí 20 hm%.



Obr. 4-9 Graf závislosti rezistivity na množství plniva

4.6 Transmisní mikroskopie

Na obr. 4-10 jsou vidět snímky pořízené transmisním mikroskopem. Snímky ukazují, že se zvyšuje obsah hliníkových částic. Obrázky také ukazují homogenní rozprostření plniva ve vytisknutých vzorcích.



Obr. 4-10 Snímky pořízené transmisním mikroskopem

KAPITOLA 5: EKONOMICKÉ POROVNÁNÍ

5.1 Předmět porovnání

Pro ekonomické porovnání bude využito porovnání ročních ekvivalentních nákladů při 100% využití výrobní kapacity po dobu životnosti. Předpokládáme rozšíření výroby ve firmě s kladným daňovým základem. Bude počítáno s daňovou sazbou 19 % podle zákona č. 586/1992 Sb. a diskontní sazbou r_d pro příslušné odvětví podle [35] jako 13,83 %² (bezriziková úroková míra r_f 3,88 %, očekávaná výnosnost celého trhu r_m 11,33 % a faktor systémového rizika β 1,3354). Předmětem tohoto porovnání bude rozšíření výroby o výrobu elektrod pro elektrolýzu, které lze vyrábět dvěma různými technologickými procesy. Prvním technologickým procesem je kombinace 3D tisku a napaření hliníku. V průběhu 3D tisku je tisknuto 8 elektrod najednou a při napařování se napařuje jedna elektroda po druhé (je možné nechat běžet tisk a při tom obsluhovat napařovací komoru). Druhým je pak ohnutí hliníkového drátu do stejné podoby pomocí strojů na ohýbání hliníku. V rámci tohoto porovnání také bude provedena citlivostní analýza na jednotlivé vstupy. V obou případech je jednou za měsíc počítáno se dnem odstávky kvůli opravám, které provádí zaměstnanec a také je počítáno s 21 pracovními dny v měsíci.

5.2 Nákladové položky

5.2.1 3D tisk + napaření

Investiční výdaje pro technologii 3D tisku a napaření jsou v tab. 5-1.

Tab. 5-1. Investiční výdaje pro technologii 3D tisku

Předmět	Cena	Doba životnosti	Reference
3D tiskárna	47 995 Kč/ks	20 let	[21]
Mycí a vytvrzovací stanice	16 995 Kč/ks	20 let	[21]
Napařovací komora	100 000 Kč/ks	20 let	[22][29]

Všechna zařízení se odepisují rovnoměrně a spadají do druhé odpisové třídy podle zákona č. 586/1992 Sb.. U 3D tiskárny a mycí a vytvrzovací stanice byla využita sleva 3990 Kč a rozpočítána rovným dílem mezi obě zařízení. Doby životnosti u 3D tiskárny a mycí a vytvrzovací stanice byly odhadnuty vedoucím práce.

Provozní náklady se skládají z nákladů na materiál a na elektřinu. Náklady na materiál jsou uvedeny v tab. 5-2.

² $r = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f)$

Tab. 5-2. Materiálové provozní náklady 3D tisku

Předmět	Cena	Spotřeba	Reference
Flashforge resin	27,5 \$/kg	8,56 g/výr.	[23]
Hliníkový drátek	11,2 \$/kg	0,34 g/výr.	[24]
Izopropanol	179 Kč/l	0,005 l/výr.	[25][29]

Spotřeba určená měřením a na základě zkušenosti s procesem.

Cena elektřiny byla určena na základě ceníku PRE a.s. pro podnikatele (využívaný tarif C02d) [26], její spotřeba 0,0393 kWh/výrobek byla určena měřením. A na základě spotřeby elektrické energie bude počítáno do této technologie 15 % stálých plateb. Stálé platby za elektřinu jsou 902,43 Kč/měsíc (jistič 3x80 A) podle [26].

Náklady na drobný spotřební materiál jsou vyjádřeny v tab. 5-3.

Tab. 5-3. Výčet drobného spotřebního materiálu pro 3D tisk

Předmět	Cena	Spotřeba	Reference
Ochranné gumové rukavice	52 Kč/ks	1 ks/200 výrobků	[27]
Papírové utěrky	27,5 Kč/ks	2 ks/100 výrobků	[28]
Fólie na vaničku 3D tiskárny	39,8 Kč/ks	1 ks/200 výrobků	[29]
Houbičky	1,5 Kč/ks	1 ks/100 výrobků	[30]
Špachtle	35 Kč/ks	1 ks/rok	[31]
Nůžky na střihání drátků	399 Kč/ks	1 ks/20 let	[34]

Spotřeby určené na základě zkušenosti s 3D tiskem.

Opravy a revize budeme uvažovat na základě odhadu vedoucího práce jako 35 Kč/pracovní den a k tomu ještě výměnu LCD za 3000 Kč po 3000 hodinách tisku.

Zmetkovitost tohoto výrobního procesu byla odhadnuta na 1 % vedoucím práce.

5.2.2 Ohýbání hliníkového drátu

Jediným **investičním výdajem** je zařízení na ohýbání hliníku od čínské firmy. Cena tohoto zařízení je 10000 \$ a doba životnosti je 20 let podle informací získaných od anonymního výrobce zařízení prostřednictvím online komunikace. Zařízení se odepisuje rovnoměrně a spadá do druhé odpisové třídy podle zákona č. 586/1992 Sb.

Do **provozních nákladů** jsou opět zahrnuty náklady na materiál a cena elektřiny. Jediným používaným materiálem je hliníkový drát, jehož cena je 3,5 \$/kg [33] při objednávání většího množství než 1 t, což naše varianta splňuje s ročním odběrem, který byl z předpokládaných rozměrů a počtu kusů spočítán jako 2,1 t (předpokládaná spotřeba na jeden kus je 0,099 kg

hliníku). Cena elektřiny byla určena na základě ceníku PRE a.s. pro podnikatele (využívaný tarif C02d) [26], její spotřeba byla určena výpočtem na základě informací získaných od anonymního výrobce zařízení prostřednictvím online komunikace. Zároveň na základě spotřeby elektrické energie bude počítáno do této technologie 25 % stálých plateb. Stálé platby za elektřinu jsou 902,43 Kč/měsíc (jistič 3x80 A) podle [26].

Jediným **spotřebním materiálem** jsou nůžky na stříhání drátků za 399 Kč [34]. Jejich spotřeba je odhadována na 1 ks/rok.

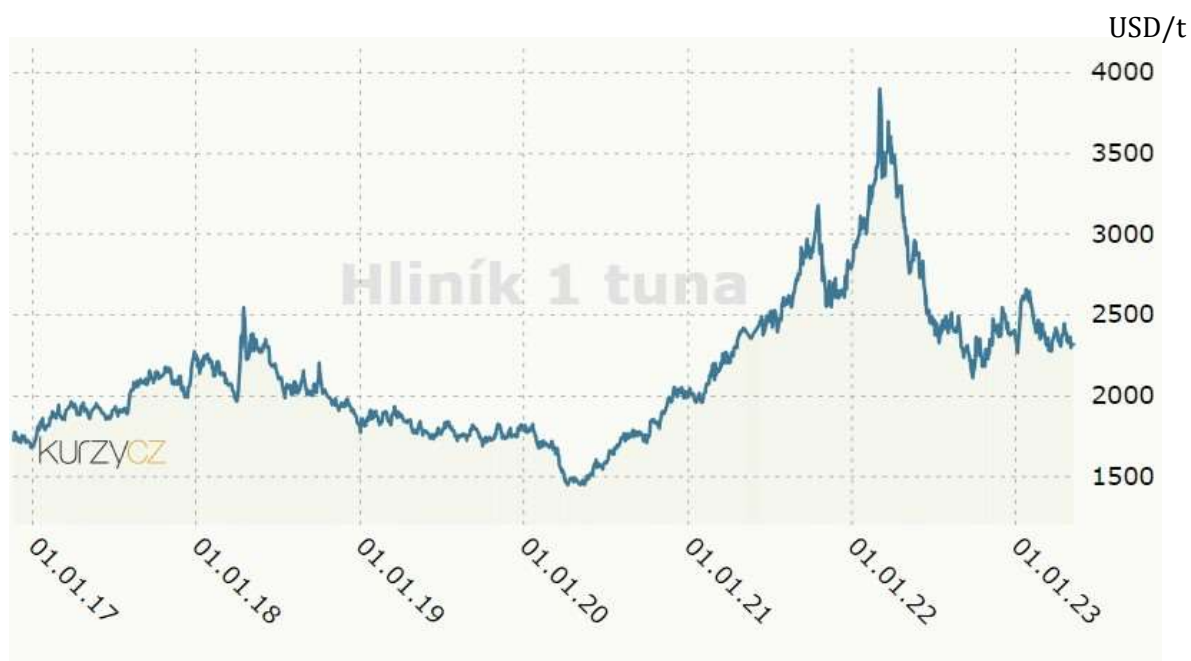
Opravy a revize jsou odhadovány podle anonymního výrobce na 7,5 \$/den, a to včetně doplňování oleje.

Zmetkovitost tohoto výrobního postupu je odhadována na 2 % vedoucím práce.

5.2.3 Společné nákladové položky

Pro oba výrobní procesy bude počítáno s jedním zaměstnancem. Jedná se o pracovníka v oboru výroba elektrických zařízení, a proto bude uvažováno průměrný plat pro pracovníka v tomto oboru tedy 42 615 Kč/měsíc podle [32].

V rámci porovnání je také počítáno s růstem mzdy 2 % založené na statistikách [32], 5% růstem cen hliníku na základě vývoje cen v posledních 7 letech (obr. 5-1), růstem cen ostatního materiálu 3 %, jakožto odhadovaný průměr v průběhu dalších 20 let (kombinace současné inflace po další 3 roky a inflačního cíle ČNB 2 %) a růst ceny elektřiny 1,5 % (odhadovaný průměr na dalších 20 let, z počátku mírný pokles a poté nárůst podle inflačního cíle ČNB).



Obr. 5-1 Vývoj ceny hliníku [36]

Pro výpočet je z důvodu nákupu v zahraničí nutný kurz amerického dolaru vůči české koruně, který je stanoven na 21,31 Kč/\$, což je kurz k datu 10.5.2023.

5.3 Způsob výpočtu

5.3.1 Výpočty výdajů

Prvním krokem výpočtu je vytvoření tabulky pro výdaje v jednotlivých letech. **Investiční výdaje** se vyskytují pouze v roce $t = 0$ a jsou dány součtem jednotlivých položek. Zároveň investiční výdaje jsou jedinými výdaji v roce $t = 0$.

Výpočet **provozních výdajů** pro roky $t > 0$ byl proveden podle rovnice (5-1) pro technologii 3D tisku a napaření a podle rovnice (5-2) pro technologii ohýbání hliníku.

$$V_{prov3Dt} = (V_{resin} \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} + V_{Al3Dn} \cdot (1 + g_{Al})^{t-1} + V_{IPA} \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} + V_{elv3Dn} \cdot (1 + g_{el})^{t-1} + V_{els3Dn} \cdot (1 + g_{el})^{t-1}) \cdot q_{3Dn} \quad (5-1)$$

, kde $V_{prov3Dt}$ (Kč) jsou provozní výdaje pro technologii využívající 3D tisk a napaření v roce t , V_{resin} (Kč/výrobek) jsou výdaje na resin na jeden výrobek, g_{ost} růst cen ostatních materiálů, t je rok, pro nějž jsou počítány provozní výdaje, V_{Al3Dn} (Kč/výrobek) jsou výdaje na hliník pro napaření na jeden výrobek, g_{Al} je růst cen hliníku, V_{IPA} (Kč/výrobek) jsou výdaje na izopropylalkohol na jeden výrobek, V_{elv3Dn} (Kč/výrobek) jsou výdaje na množství elektřiny pro 3D tisk a napaření na jeden výrobek, g_{el} růst cen elektřiny, V_{els3Dn} (Kč) jsou roční výdaje na stálou složku ceny elektřiny pro technologii 3D tisku a q_{3Dn} je počet výrobků za rok vyrobených pomocí 3D tisku a napaření.

$$V_{provOHt} = (V_{AlOH} \cdot (1 + g_{Al})^{t-1} + V_{elvOH} \cdot (1 + g_{el})^{t-1} + V_{elsOH} \cdot (1 + g_{el})^{t-1}) \cdot q_{OH} \quad (5-2)$$

, kde $V_{provOHt}$ (Kč) jsou provozní výdaje pro technologii využívající ohýbání hliníku v roce t , V_{AlOH} (Kč/výrobek) jsou výdaje na hliník pro ohýbání na jeden výrobek, V_{elvOH} (Kč/výrobek) jsou výdaje na množství elektřiny pro ohýbání hliníku na jeden výrobek, V_{elsOH} (Kč) jsou výdaje na stálou složku ceny elektřiny pro technologii využívající ohýbání hliníku a q_{OH} je počet výrobků za rok pomocí ohýbání hliníku.

Výdaje na **drobný spotřební materiál pro technologii 3D tisku a napaření** byly vypočítány podle rovnice (5-3) pro první rok a podle rovnice (5-4) pro roky 2–20.

$$V_{dsm3Dn1} = (V_{ruk} + V_{ut} + V_{hou} + V_{fól}) \cdot q_{3Dn} + V_{šp} + V_{nů} \quad (5-3)$$

, kde V_{dsm3D1} (Kč) jsou výdaje na drobný spotřební materiál pro technologii využívající 3D tisk a napaření v roce $t = 1$, V_{ruk} (Kč/výrobek) jsou výdaje na ochranné rukavice na jeden výrobek, V_{ut} (Kč/výrobek) jsou výdaje na papírové utěrky na jeden výrobek, V_{hou} (Kč/výrobek) jsou výdaje na houbičky na jeden výrobek, $V_{fól}$ (Kč/výrobek) jsou výdaje na fólie na jeden výrobek, $V_{šp}$ (Kč) jsou výdaje na špachtli, $V_{nů}$ (Kč) jsou výdaje na nůžky pro stříhání hliníkového drátu.

$$V_{dsm3Dnt} = ((V_{ruk} + V_{ut} + V_{hou} + V_{fól}) \cdot q_{3Dn} + V_{šp}) \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} \quad (5-4)$$

, kde V_{dsm3Dt} (Kč) jsou výdaje na drobný spotřební materiál pro technologii využívající 3D tisk a napaření v roce t .

Výdaje na **drobný spotřební materiál pro technologii ohýbání hliníku** byly vypočítány podle rovnice (5-5) pro roky $t > 0$.

$$V_{dsmOHt} = V_{nů} \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} \quad (5-5)$$

, kde V_{dsmOHt} (Kč) jsou výdaje na drobný spotřební materiál pro technologii využívající ohýbání hliníku v roce t .

Mzdy zaměstnanci byly počítány v obou variantách počítány stejně podle vztahu (5-6).

$$V_{mzdyt} = V_{mzdy} \cdot (1 + g_{mzdy})^{t-1} \quad (5-6)$$

, kde V_{mzdyt} (Kč) jsou výdaje na mzdy v roce t , V_{mzdy} (Kč) jsou roční výdaje na mzdy a g_{mzdy} je roční růst mezd.

Opravy pro 3D tisk a napaření pro roky $t > 0$ byly vypočítány podle rovnice (5-7)

$$V_{op3Dnt} = (V_{op3Dn} + V_{LCD} \cdot q_{3Dn}) \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} \quad (5-7)$$

, kde V_{op3Dt} (Kč) jsou výdaje na opravy pro technologii 3D tisku a napaření v roce t , V_{op3D} (Kč) jsou roční výdaje na opravy pro technologii 3D tisku a napaření mimo výměnu LCD a V_{LCD} (Kč/výrobek) jsou výdaje za výměnu LCD.

Opravy pro ohýbání hliníku pro roky $t > 0$ byly vypočítány podle rovnice (5-8)

$$V_{opOHt} = V_{opOH} \cdot (1 + g_{ost})^{t-1} \quad (5-8)$$

, kde V_{opOHt} (Kč) jsou výdaje na opravy pro technologii ohýbání hliníku v roce t , V_{opOH} (Kč) jsou roční výdaje na opravy pro technologii ohýbání hliníku.

5.3.2 Výpočet odpisů

Technologické zařízení bylo zařazeno podle zákona č. 586/1992 Sb. do II. odpisové skupiny, doba odepisování bude činit 5 let. Způsob odepisování byl zvolen rovnoměrný. Odpisy byly počítány pro všechna zařízení podle vzorce (5-9) pro 1. rok a podle vzorce (5-10) pro roky 2-5. Celková hodnota odpisů O_t v roce t je pak dána prostým součtem odpisů všech zařízení dané varianty v roce t .

$$o_1 = \frac{11 \cdot \text{cena zařízení}}{100} \quad (5-9)$$

, kde o_1 (Kč) je hodnota odpisů v prvním roce.

$$o_t = \frac{22,25 \cdot \text{cena zařízení}}{100} \quad (5-10)$$

, kde o_t (Kč) je hodnota odpisů v roce t .

5.3.3 Výpočet cash flow

Dalším krokem ve výpočtu je výpočet **cash flow před zdaněním** $CFBT_t$ v roce t . Tento výpočet je proveden podle rovnice (5-11) pro 3D tisk a napaření a obdobně pro druhou technologii.

$$CFBT_t = -V_{prov3Dnt} - V_{dms3Dnt} - V_{mzdyt} - V_{op3Dnt} - V_{invt} \quad (5-11)$$

, kde $CFBT_t$ (Kč) je cash flow před zdaněním v roce t a V_{invt} jsou investiční výdaje v roce t .

Následuje výpočet **daně z příjmu** podle rovnice (5-12).

$$Daň_t = -(CFBT_t - O_t) \cdot \text{daňová sazba} \quad (5-12)$$

, kde $Daň_t$ (Kč) je daň z příjmu v roce t a O_t je hodnota veškerých odpisů v roce t .

Z předchozích dvou hodnot bylo vypočteno **cash flow po zdanění**, podle rovnice (5-13).

$$CF_t = CFBT_t + Daň_t \quad (5-13)$$

, kde CF_t (Kč) je cash flow v roce t .

Dalším krokem ve výpočtu je **diskontování**. To bylo provedeno podle rovnice (5-14).

$$DCF_t = CF_t \cdot (1 + r_d)^{-t} \quad (5-14)$$

, kde DCF_t (Kč) je diskontovaný cash flow z roku t a r_d je diskontní sazba.

5.3.4 Výpočet nákladů na výrobek

Dále byla vypočítána **čistá současná hodnota nákladů NPV** podle vzorce (5-15). Rovnice byla vytvořena na základě .

$$NPV = \sum_{t=0}^T DCF_t \quad (5-15)$$

, kde NPV (Kč) je čistá současná hodnota a T je doba trvání projektu.

NPV byla dále pomocí anuitního faktoru rozpočítána na **roční ekvivalentní náklady REN**. Výpočet je ukázán v rovnici (5-16).

$$REN = -NPV \cdot a = -NPV \cdot \frac{(1 + r_d)^T \cdot r_d}{(1 + r_d)^T - 1} \quad (5-16)$$

, kde REN (Kč) jsou roční ekvivalentní náklady a a je anuitní faktor.

Posledním krokem je **rozpočítání ročních ekvivalentních nákladů na počet výrobků**. Tento výpočet popisuje rovnice (5-17)

$$N_{nv} = \frac{REN}{q \cdot (1 - z)} \quad (5-17)$$

, kde N_{nv} (Kč/výrobek) jsou náklady na výrobek, q je počet výrobků vyrobených za rok příslušnou technologií a z je zmetkovitost příslušné technologie.

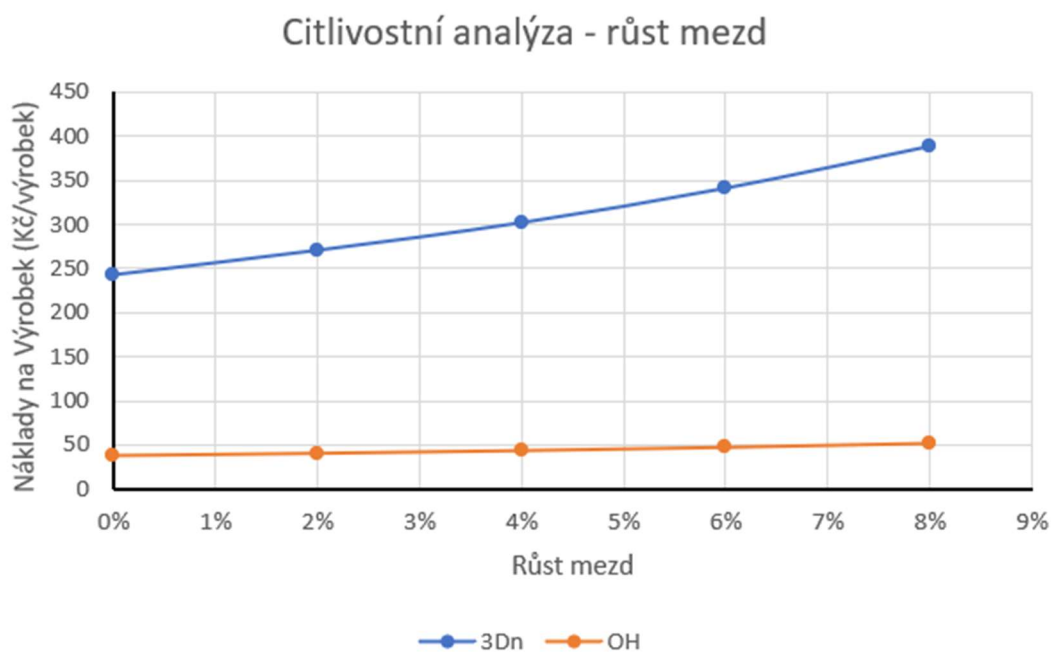
Rozhodovacím kritériem z ekonomického hlediska je varianta s nižšími náklady na výrobek.

5.4 Výsledek výpočtu

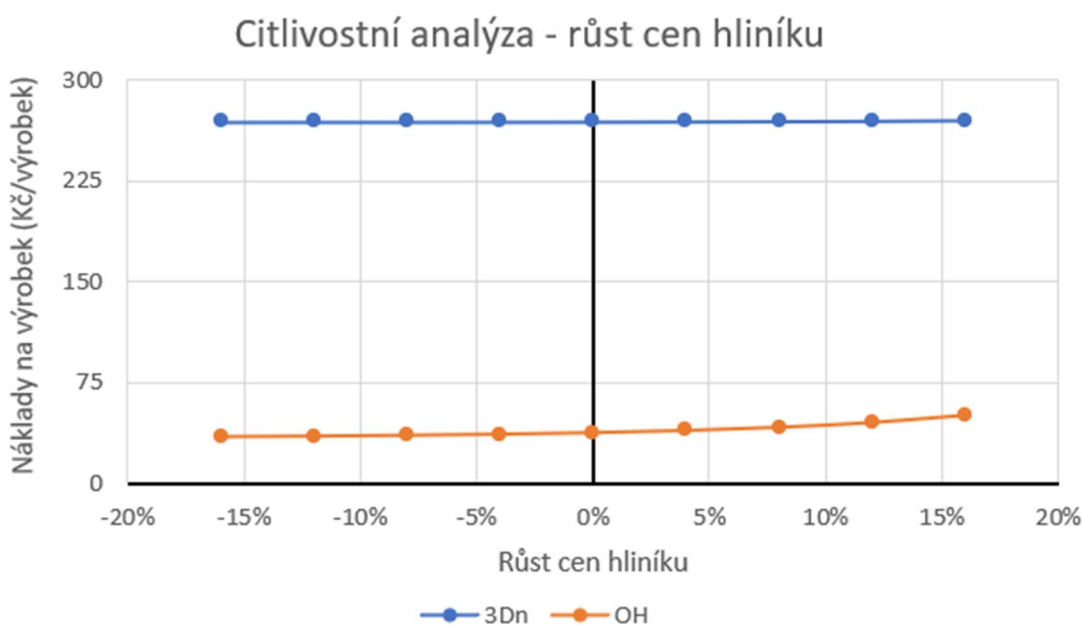
Roční ekvivalentní náklady vyšly 269,40 Kč/výrobek pro technologii 3D tisku a napaření a 40,18 Kč/výrobek pro technologii využívající ohýbání hliníku. Z tohoto hlediska je technologie ohýbání hliníku výhodnější.

5.5 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza byla provedena pro následující parametry: Investiční výdaje, kurz české koruny oproti americkému dolaru, růsty cen jednotlivých položek a diskont. V žádném případě nedochází ke změně výhodnosti variant. Příklady, kdy docházelo k největším změnám jsou vidět na obrázcích 5-2 a 5-3. Ostatní grafy je možno najít v příloze A.



Obr. 5-2 Citlivostní analýza – růst mezd



Obr. 5-3 Citlivostní analýza – růst cen hliníku

ZÁVĚR

Práce je rozdělena do tří částí. V první části je cílem seznámit čtenáře s technologií stereolitografického 3D tisku a dosavadním výzkumem v oblasti vodivých materiálů pro tuto technologii. Zároveň jsou zde uvedeny hodnoty elektrické rezistivity (vodivosti), s nimiž můžeme porovnávat námi připravené vzorky.

Druhá část práce se zabývá metodami výběru vhodného plniva, přípravou vzorků a použitými metodami pro zkoumání elektrických, dielektrických a mechanických vlastností materiálu. Dále jsou zde uvedeny výsledky získané těmito metodami.

Ve třetí části je uvedeno ekonomické porovnání mezi technologií 3D tisku a následného napaření a technologií ohýbání hliníku. Porovnání je provedeno pomocí předpokládaného rozšíření výroby o elektrody pro elektrolýzu vody a výpočet je proveden pomocí ročních ekvivalentních nákladů na výrobek za dobu životnosti.

Z prvních dvou částí vyplývá, že přidáním hliníkového prášku, který byl na základě rychlosti sedimentace vybrán jako vhodnější, do resinu určeného pro stereolitografii dochází ke snížení rezistivity vytisklého materiálu o dva řády na hodnotu $5,73 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, což je pořád velmi vysoká hodnota, která je také mnohem vyšší (min o 6 řádů) než u zkoumaných materiálů uvedených v první kapitole. Relativní permitivita se zvyšuje s přidáním hliníku až o 30 % u vzorku s 15 hm%, což byl vzorek s nejvyšším obsahem hliníkového prášku, který se podařilo vytisknout (u vzorků s vyšším obsahem hliníkového prášku nebyla dostatečná adheze k tiskové podložce). Na druhou stranu s rostoucím množstvím hliníku roste také ztrátový činitel obdobně jako u relativní permitivity. U Youngova modulu došlo k mírnému nárůstu přidáním hliníkového prášku, zatímco u pevnosti v tahu a tažnosti došlo k mírnému poklesu.

Ze třetí části vyplývá, že z ekonomického hlediska je výhodnější varianta využívající technologii ohýbání hliníku, protože její náklady na výrobek jsou 40,18 Kč/výrobek, zatímco u varianty využívající technologii 3D tisku a napaření byly náklady na výrobek 269,40 Kč/výrobek. Rozdíl ve výsledných hodnotách je způsoben zejména rozdílným počtem výrobků vyrobených za stejnou dobu, mezi které jsou roční ekvivalentní náklady rozpočítávány. Technologie 3D tisku by mohla mít roční ekvivalentní náklady na výrobek nižší, pokud by se použila jiná tiskárna, která je schopna tisknout více výrobků zároveň, nebo která tiskne rychleji. Další možností je výzkum nového vodivého materiálu pro stereolitografii, čímž by odpadla nutnost provádět napařování hliníkem a s tím spojené náklady. Pro variantu ohýbání hliníku je méně důvěryhodný dodavatel zařízení, který dodává i materiál nutný pro opravy. U zařízení od důvěryhodnějších dodavatelů

bohužel není známa jejich cena, proto není v současné chvíli možnost říci, jak by se změnila cena, kdyby byl využitý více důvěryhodný dodavatel. Další fakt hovořící ve prospěch 3D tisku a napaření je možnost jednoduché změny vytvářeného objektu, která ve výpočtu není zahrnuta. I přes tato fakta je však varianta využití technologie ohýbání hliníku v současné době výhodnější. Citlivostní analýza prokázala, že změny uvažovaných vstupů nevedou ke změně pořadí výhodnosti variant.

Tato práce může sloužit jako část výzkumu vodivých materiálů pro stereolitografii. Dále také jako podklad pro potenciálního investora při rozhodování, jakým způsobem vyrábět elektrody pro elektrolýzu.

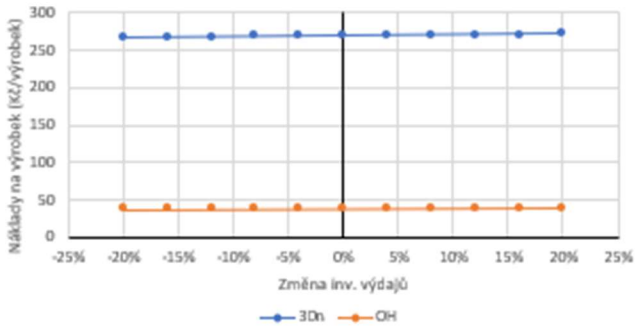
LITERATURA

- [1] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [2] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, [2017]. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [3] DODZIUK, Helena. Applications of 3D printing in healthcare. *Polish Journal of Cardio-Thoracic Surgery* [online]. 2016, **3**, 283-293 [cit. 2022-11-15]. ISSN 1731-5530. Dostupné z: <https://doi.org/10.5114/kitp.2016.62625>
- [4] BROWNE, Michelle P., Edurne REDONDO a Martin PUMERA. 3D Printing for Electrochemical Energy Applications. *Chemical Reviews* [online]. 2020, **120**(5), 2783-2810 [cit. 2022-11-15]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.9b00783>
- [5] BAGHERI, Ali a Jianyong JIN. Photopolymerization in 3D Printing. 1. In: ACS Applied Polymer Materials [online]. 2019, s. 593-611 [cit. 2022-11-26]. ISSN 2637-6105. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.8b00165>
- [6] Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology. The Ortho Cosmos [online]. [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>
- [7] Josef. 3D printing handbook: User manual for the original prusa SL1S SPEED [online]. Prusa Research, 2021 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://cdn.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_sl1s_en.pdf#_ga=2.4980851.1383983617.1682166981-1266262219.1682166981
- [8] FAKIROV, Stoyko. Composite materials – is the use of proper definitions important?. *Materials Today* [online]. 2015, **18**(10), 528-529 [cit. 2022-11-27]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2015.10.001
- [9] DANIEL, Isaac M. a Ori ISHAI. *Engineering mechanics of composite materials*. 2. vyd. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 01-950-9738-6.
- [10] CHAWLA, Krishan Kumar. *Composite materials: science and engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [12] UŘIČÁŘ, Jonáš a Jaroslav MINÁŘ. Stereolithography Resins with Conductive Fillers: An Effective Way to Enhance their Electrical Properties. 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) [online]. IEEE, 2021-5-5 [cit. 2022-11-27]. ISBN 978-1-6654-1477-7. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9467669>
- [13] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [14] RYAN, Kirstie R., Michael P. DOWN, Nicholas J. HURST, Edmund M. KEEFE a Craig E. BANKS. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. *EScience* [online]. 2022, **2**(4), 365-381 [cit. 2023-03-28]. ISSN 2667-1417. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.esci.2022.07.003>
- [15] SCORDO, Giorgo, et al. A novel highly electrically conductive composite resin for stereolithography. *Materials Today Communications* [online]. 2019, **19**, 12-17 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.12.017>
- [16] Han, H.; Cho, S. Fabrication of Conducting Polyacrylate Resin Solution with Polyaniline Nanofiber and Graphene for Conductive 3D Printing Application. *Polymers* [online]. 2018, **10**, 1003. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.3390/polym10091003>
- [17] GOZALEZ, Gustavo, et al. Development of 3D printable formulations containing CNT with enhanced electrical properties. *Polymer* [online]. 2017, **109**, 246-253 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.12.051>
- [18] FANTINO, Erika, Annalisa CHIAPPONE, Ignazio ROPPOLO, Diego MANFREDI, Roberta BONGIOVANNI, Candido Fabrizio PIRRI a Flaviana CALIGNANO. 3D Printing of Conductive Complex Structures with In Situ Generation of Silver Nanoparticles. *Adv. Mater.* [online]. 2016, **28**, 3712-3717 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201505109>
- [19] MU, Quanyi, et al. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **18**, 74-83 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.011>
- [20] LI, Yuemeng. Incorporating Metal Precursors towards a Library of High-resolution Metal Parts by Stereolithography. *Applied materials today* [online]. 2022, **29**(101553) [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101553>
- [21] Original Prusa SL1S SPEED + CW1S. *3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši:* [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-sl1s-speed-3d-tiskarna-cw1s/>

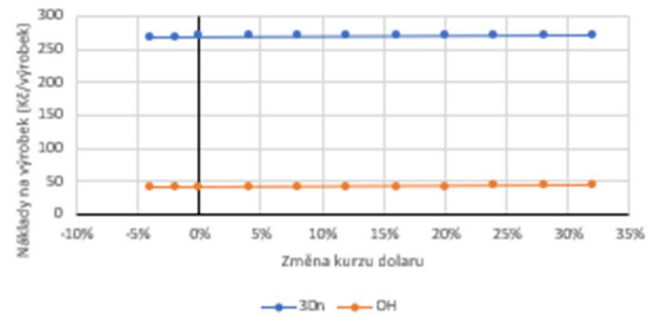
- [22] BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ, Ivana, odborný asistent keatedra Elektrotechnologie FEL ČVUT [ústní sdělení]. Praha, 30.3.2023
- [23] Flashforge LCD Resin 1KG Bottle 4PCS Bundle. *Flashforgeshop* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.flashforgeshop.com/product/flashforge-lcd-resin-1kg-bottle-4pcs-bundle?cid=37>
- [24] High Purity Good Electrical Conductivity 99,999% Aluminium wire. *Alibaba* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Purity-Good-Electrical-Conductivity-99-60812892194.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.201f60c9YZhGns
- [25] Isopropanol, 1 l. *OBI* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.ob.cz/cistici-prostredky/isopropanol-1-l/p/5523089>
- [26] *PRE Proud Nefix: Ceník pro podnikatele platný od 1.1.2023* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/cs/firmy/elektrina/archiv-produktu/>
- [27] VILEDA Gumové Rukavice Supergrip L za 52 Kč - Gumové Rukavice. *Alza.cz* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/maxi/vileda-rukavice-supergrip-l-d5359376.htm>
- [28] Utěrky kuchyňské TENTO Extra Strong 3vrstvé, 2 role, 34 m 55 Kč. *Eva* [online]. Dostupné z: <https://www.eva.cz/zbozi/DR042081/uterky-kuchynske-tento-extra-strong-3vrstve-2-role-34-m/>
- [29] NFEP folie pro 3D tiskárnu - 0,15 tloušťka. *3DJK* [online]. Dostupné z: <https://3djk.eu/cs/domu/580-229-fep-folie-pro-3d-tiskarnu-015-tloustka.html#/51-fep-folie-rozmy-140x200mm>
- [30] Houbičky na nádobí KALUKA 10 ks/bal. *JYSK* [online]. Dostupné z: https://jysk.cz/domacnost/domacnost/uterky/houby/houbicky-na-nadobi-kaluka-10-ks/bal?gclid=Cj0KCQjw3a2iBhCFARIsAD4jQB3OigGjtMSbhm-5EyGULoGDONIEz0IOFMRY31RpEgdwA90Tq35D59AaAIVGEALw_wcB&gclid=aw.ds
- [31] Špachtle ocel PROFI, 30 mm, FESTA - Zednická špachtle. *Alza.cz* [online]. Dostupné z: https://www.alza.cz/hobby/spachtle-ocel-profi-30-mm-festa-d7110857.htm?kampan=adwho_hobby-a-zahrada-pla_all_hobby-a-zahrada-css_dropshipment_c_9062886_587873802123~135101234592~&gclid=Cj0KCQjw3a2iBhCFARIsAD4jQB0us8GDGjK00FR1mGn8a4-HSYrBCp68vv5qlOAKV9JS7xkRUSTa5kaAhGdEALw_wcB
- [32] *Počet zaměstnanců a průměrné hrubé měsíční mzdy podle odvětví ve 4. čtvrtletí 2022* (absolutně, meziroční změny). In: *ČSÚ* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/crj/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2022>
- [33] Rivet Nail Alloy Wire Er5052 Aluminum Wire Brand. *Alibaba* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/RIVET-NAIL-ALLOY-WIRE-ER5052-ALUMINUM-1600206087938.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.201f60c9YZhGns
- [34] Kleště na lanka a bowdeny. *Decathlon* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://www.decathlon.cz/p/kleste-na-lanka-a-bowdeny/_/R-p-120528?mc=8352340&gclid=Cj0KCQjwmN2iBhCrARIsAG_G2i7ZNpd7QShipetoyVU0sEUcW4fqIwUmBe3zm2pmjC9BlT_Pf0Gq3rwaAl44EALw_wcB
- [35] Useful data sets. *Damodaran Online* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datacurrent.html#returns
- [36] Hliník - ceny a grafy hliníku, vývoj ceny hliníku 1 tuna - 7 let - měna USD. *Kurzy.cz* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/hlinik-graf-vyvoje-ceny/1tuna-usd-30-let>
- [37] STARÝ, OLDŘICH. *Rozhodovací metody pro výběr investic* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 23. března 2023

PŘÍLOHA A:

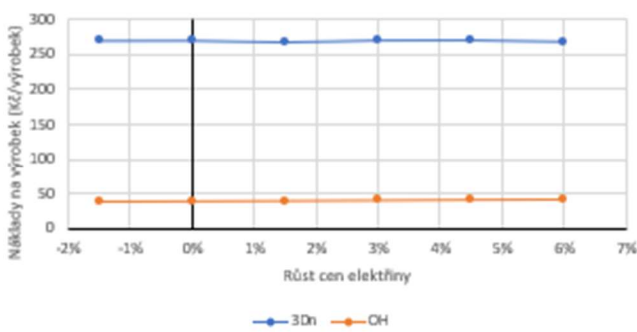
Citlivostní analýza - inv. výdaje



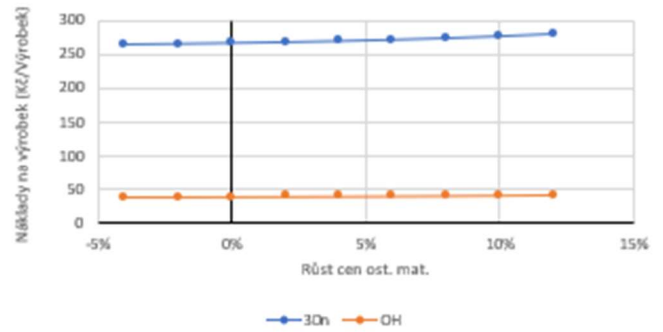
Citlivostní analýza - kurz dolaru



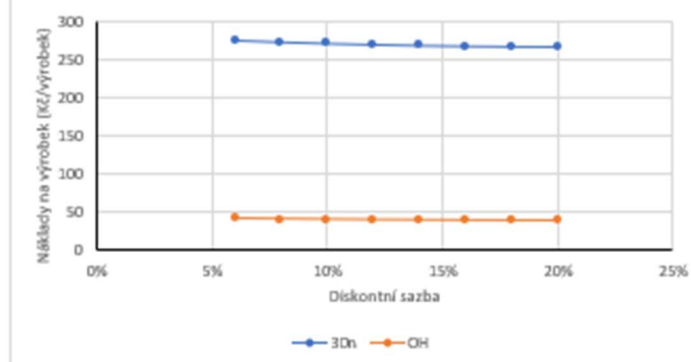
Citlivostní analýza - růst cen elektřiny



Citlivostní analýza - růst cen ost. mat.



Závislost nákladů na výrobek na diskontní sazbě



SEZNAM ZKRATEK

$3Dn$	3D tisk + napaření
a	anuitní faktor
b	šířka vzorku
C	měřená kapacita při testu dielektrických vlastností
$CFBT_t$	cash flow před zdaněním v roce t
CF_t	cash flow v roce t
d	průměr menší napařené části hliníku
$Daň_t$	daň z příjmu v roce t
DCF_t	diskontovaný cash flow z roku t
E	měřená energie při testu vrubové houževnatosti
g_{AI}	růst cen hliníku
g_{mzdy}	roční růst mezd
g_{ost}	růst cen ostatních materiálů
h	tloušťka vzorku
LCD	display z tekutých krystalů
$MSLA$	stereolitografie s maskou
NPV	čistá současná hodnota
N_{vn}	náklady na výrobek
o_1	hodnota odpisů v prvním roce
OH	ohýbání hliníkového drátu
o_t	hodnota odpisů v roce t
O_t	hodnota veškerých odpisů v roce t
$PANI$	polyanilín
$PEDOT:PSS$	poly(3,4-ethyldioxythiofen)-poly(styrensulfát)
$PEGDA$	polyethylenglykoldiakrylát
$PEGMEMMA$	polyethylenglykolmethylethermethakrylát
q	počet výrobků vyrobených za rok příslušnou technologií
q_{3D}	počet výrobků za rok vyrobených pomocí 3D tisku a napaření
q_{OH}	q_{OH} je počet výrobků za rok pomocí ohýbání hliníku
r	poloměr vzorku
R	odpor vzorku
r_d	diskontní sazba
REN	roční ekvivalentní náklady
r_f	bezriziková úroková míra
r_m	očekávaná výnosnost celého trhu
SLA	stereolitografie
t	rok pro nějž jsou počítány provozní výdaje
T	doba trvání projektu
V_{AI3Dn}	výdaje na hliník pro napaření na jeden výrobek
V_{AI0H}	výdaje na hliník pro ohýbání na jeden výrobek
$V_{dsm3Dnt}$	výdaje na drobný spotřební materiál pro technologii využívající 3D tisk a napaření v roce t
V_{dsm0Ht}	výdaje na drobný spotřební materiál pro technologii využívající ohýbání hliníku v roce t
V_{els3Dn}	roční výdaje na stálou složku ceny elektřiny pro technologii 3D tisku
V_{els0H}	výdaje na stálou složku ceny elektřiny pro technologii ohýbání hliníku
V_{elv3Dn}	výdaje na množství elektřiny pro 3D tisk a napaření na jeden výrobek
V_{elv0H}	výdaje na množství elektřiny pro ohýbání hliníku na jeden výrobek
$V_{fól}$	výdaje na fólie na jeden výrobek
V_{hou}	výdaje na houbičky na jeden výrobek
V_{inv_t}	investiční výdaje v roce t
V_{IPA}	výdaje na izopropylalkohol na jeden výrobek
V_{LCD}	jsou výdaje za výměnu LCD
V_{mzdy}	roční výdaje na mzdy
V_{mzdy_t}	výdaje na mzdy v roce t
$V_{nů}$	výdaje na nůžky pro střihání hliníkového drátu
V_{op3Dn}	roční výdaje na opravy pro technologii 3D tisku a napaření mimo výměnu LCD
V_{op3Dnt}	výdaje na opravy pro technologii 3D tisku a napaření v roce t
V_{op0H}	jsou roční výdaje na opravy pro technologii ohýbání hliníku

V_{opOHt}	výdaje na opravy pro technologii ohýbání hliníku v roce t
$V_{prov3Dnt}$	provozní výdaje pro technologii využívající 3D tisk a napaření v roce t
$V_{provOHt}$	provozní výdaje pro technologii využívající ohýbání hliníku v roce t
V_{resin}	jsou výdaje na resin na jeden výrobek
V_{ruk}	výdaje na ochranné rukavice na jeden výrobek
$V_{šp}$	výdaje na špachtli
V_{ut}	výdaje na papírové utěrky na jeden výrobek
z	zmetkovitost příslušné technologie
α	vrubová houževnatost
β	faktor systémového rizika
ε_0	permitivita vakua
ε_r	relativní permitivita
ρ	rezistivita materiálu