

Příprava kompozitního filamentu s magnetickými vlastnostmi pro 3D tisk

Bc. Martin Možíš

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Možíš**
Osobní číslo: **T22659**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Příprava kompozitního filamentu s magnetickými vlastnostmi pro 3D tisk**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
2. Zhodnoťte dosavadní stav v oblasti 3D tisku a kompozitních filamentů.
3. Připravte menší množství materiálu s magnetickými vlastnostmi, které bude použito na charakterizaci vybraných vlastností kompozitního materiálu.
4. Pomocí zjištěných vlastností určete vhodné podmínky vytlačování materiálu.
5. Připravte kompozitní materiál v podobě filamentu vhodného pro 3D tiskárnu.
6. Vyhodnoťte tiskové podmínky a vlastnosti.
7. Uveďte možnosti aplikace tohoto materiálu.
8. Vzniklé závěry dostatečně popište a diskutujte.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 1493921126.
- [2] 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.
- [3] SADASIVUNI, Kishor Kumar, Kalim DESHMUKH a Mariam Ali S A AL-MADEED. *3d and 4d printing of polymer nanocomposite materials: processes, applications, and challenges*. 1. San Diego: Elsevier, 2019. ISBN 9780128168059.
- [4] ROSATO, D.V, 2013. *Extruding Plastics*. B.m.: Springer Science & Business Media. ISBN 9781461557937.
- [5] ARBAOUI, Younès, Philippe AGACIAK, Alexis CHEVALIER, et al. 3D printed ferromagnetic composites for microwave applications. *Journal of Materials Science* [online]. 2017, 52(9), 4988-4996 [cit. 2023-05-02]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-016-0737-3

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Matyáš, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá výrobou dvou filamentů z termoplastického elastomeru a termoplastu, jenž jsou obohaceny o kovové plnivo, díky kterému získají tyto kompozitní materiály magnetické vlastnosti. V rámci teoretické části práce jsou rozebrány různé technologie 3D tisku, možnosti výroby filamentu a v poslední řadě základní teoretické poznatky o magnetismu. Praktická část se věnuje samotné výrobě filamentu, zkoušení tisknutelnosti a charakterizaci získaných filamentů. Krátká část je věnována potenciální aplikaci filamentů podle vlastností, které byly získány při testování materiálu.

Klíčová slova: 3D tisk, výroba filamentu, magnetické vlastnosti, karbonylové železo, TPE filament, PLA filament

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the production of two filaments from thermoplastic elastomer and thermoplastic, which are enriched with a metal filler, thanks to which these composite materials acquire magnetic properties. As part of the theoretical part of the thesis, various 3D printing technologies, filament production options and lastly basic theoretical knowledge about magnetism are discussed. The practical part is devoted to the production of the filament itself, testing of printability and characterization of the obtained filaments. A short section is dedicated to the potential application of filaments according to the properties obtained during material testing.

Keywords: 3D printing, filament production, magnetic properties, carbonyl iron, TPE filament, PLA filament

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Matyášovi Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu při konzultacích a vypracování diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 3D TISK.....	11
1.1 HISTORIE 3D TISKU	11
1.2 TECHNOLOGIE 3D TISKU	14
1.2.1 Binder Jetting	14
1.2.2 Directed Energy Deposition	16
1.2.3 Material Extrusion.....	17
1.2.4 Material Jetting.....	20
1.2.5 Powder Bed Infusion.....	22
1.2.6 Sheet Lamination	24
1.2.7 Vat Photopolymerization	25
1.3 MATERIÁLY PRO FDM TISK	26
1.3.1 PLA	26
1.3.2 PETG.....	27
1.3.3 ABS/ASA.....	28
1.3.4 PC.....	28
1.3.5 Flexibilní materiály	29
2 KOMPOZITNÍ FILAMENT A JEHO VÝROBA	30
2.1 VÝROBA.....	30
2.1.1 Impregnace v trysce	31
2.1.2 Zamíchání plniva při pokojové nebo zvýšené teplotě.....	31
2.1.3 S využitím rozpouštědla.....	32
2.2 KOMPOZITNÍ FILAMENTY S UHLÍKOVÝM PLNIVEM.....	33
2.3 KOMPOZITNÍ FILAMENTY S KERAMICKÝM PLNIVEM	34
2.4 KOMPOZITNÍ FILAMENTY S KOVOVÝM PLNIVEM.....	34
2.5 KOMPOZITNÍ FILAMENTY SE SKLENĚNÝM PLNIVEM.....	35
2.6 KOMPOZITNÍ FILAMENTY S DŘEVĚNÝM PLNIVEM	35
3 MAGNETISMUS	36
3.1 PRINCIP	36
3.2 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ DLE REAKCE NA MAGNETICKÉ POLE	37
3.2.1 Diamagnetické materiály	37
3.2.2 Paramagnetické látky	37
3.2.3 Feromagnetické látky	38
3.3 MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY	38
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	40
4 PŘÍPRAVA KOMPOZITNÍHO FILAMENTU S MAGNETICKÝMI VLASTNOSTMI	41

4.1	FILAMENT Z TERMOPLASTICKÉHO ELASTOMERU	41
4.1.1	Výběr matrice a plniva	41
4.1.2	Výroba granulátu	43
4.1.3	Výroba filamentu	47
4.1.4	Tisk	49
4.1.5	Tahová zkouška	55
4.1.6	Zkouška tvrdosti Shore A	64
4.1.7	SEM	67
4.1.8	Magnetoreologie	76
4.1.9	Diferenciální skenovací kalorimetrie	79
4.1.10	Zhodnocení materiál a možná aplikace	80
4.2	FILAMENT Z TERMOPLASTU	82
4.2.1	Výběr matrice a plniva	82
4.2.2	Výroba granulátu	83
4.2.3	Výroba filamentu	85
4.2.4	Tisk	91
4.2.5	Tahová zkouška	92
4.2.6	Zkouška tvrdosti Shore D	96
4.2.7	Magnetizační křivka	97
4.2.8	Stínění elektromagnetického záření	100
4.2.9	Měření tepelné vodivosti	103
4.2.10	SEM	105
4.2.11	Diferenciální skenovací kalorimetrie	108
4.2.12	Zhodnocení materiálu a potenciální aplikace	110
	ZÁVĚR	112
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	115
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	125
	SEZNAM OBRÁZKŮ	127
	SEZNAM TABULEK	131
	SEZNAM PŘÍLOH	132

ÚVOD

V současné době je 3D tisk rychle se rozvíjející odvětví aditivního způsobu výroby, které se dělí na několik různých technologií, jež se odlišují nejen využitým druhem materiálu, ale například i způsobem depozice tohoto materiálu či procesem, kterým dojde k vytvrzení nanesené vrstvy. Tyto technologie zpočátku nacházely uplatnění exkluzivně v průmyslovém prostředí, a to zejména v rámci takzvaného „Rapid Prototyping“, což umožňuje rychlou kontrolu rozměrů a tolerancí součástí a následné úpravy na finálním výrobku. Z průmyslového prostředí se 3D tisk přesunul i k obyčejným spotřebitelům, a to především technologie FDM (FFF), která si získala velkou oblibu zejména relativně nízkou cenou, jednoduchostí používání a nízkou náročností údržby. Z tohoto důvodu a dalších, zejména FDM 3D tisk prochází rychlým vývojem, kdy společnosti a jednotlivci, zaměřeni na výrobu tiskáren, se v průběhu let snažili přinést kvalitnější a rychlejší tisk oproti konkurenci a nyní již není využití omezeno pouze na „Rapid Prototyping“ nebo dekorační výtisky, jak tomu bylo z počátku u tiskáren pro obyčejné spotřebitele. Čemuž dopomohlo i rozšiřující se spektrum tisknutelných materiálů, které umožňují použití 3D tisku i na mechanicky zatížené součásti. Nyní, opět v souvislosti s rozšiřující se nabídkou materiálů, není nutnost omezovat výtisky na aplikace, které vyžadují pouze lepší mechanické vlastnosti, a to díky kompozitním filamentům.

Kompozitní filament se skládá z polymerní matrice a aditiva, které vylepšuje stávající vlastnosti materiálu, nejčastěji se takto vylepšují mechanické vlastnosti nebo tepelná vodivost materiálu. Vhodné aditivum může však kromě zlepšení stávajících vlastností propůjčit materiálu i vlastnosti zcela nové. Obohacení polymerní matrice takovým aditivem nám umožňuje tisk materiálů elektricky vodivých nebo s magnetickými vlastnostmi, což v kombinaci s možností výroby komplexních tvarů pomocí technologie 3D tisku „otevřít dveře“ k novým a z technického hlediska velmi zajímavým aplikacím.

Tato práce se proto bude věnovat výrobě kompozitního filamentu pro FDM tiskárny s feromagnetickými vlastnostmi s využitím karbonylového železa (CIP) v podobě plniva a různých polymerních matic.

I. TEORETICKÁ ČÁST

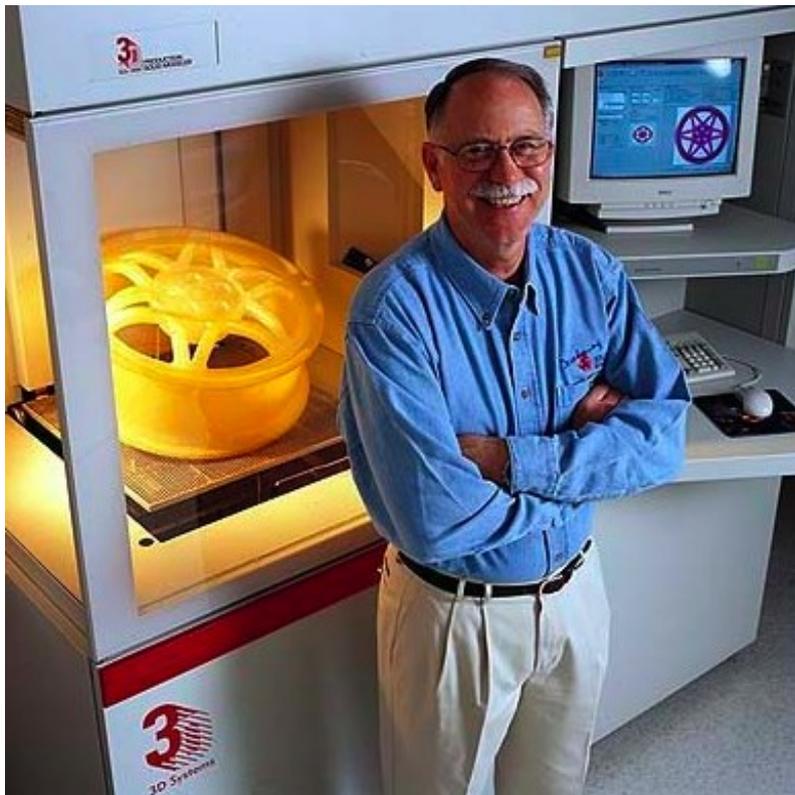
1 3D TISK

Technologie 3D tisku se řadí do aditivních způsobů výroby, a jejíž popularita neustále roste. Oproti subtraktivním metodám výroby, do kterých spadá například soustružení, frézování, nebo vrtání, se liší aditivní technologie tím, že při výrobě součásti se materiál přidává, a to nejčastěji po vrstvách. Oproti subtraktivním metodám výroby mají aditivní technologie několik zajímavých výhod, jako třeba absence většího množství nevyužitého materiálu. V současnosti je nejznámější technologií 3D tisku FDM, avšak 3D tisk obecně není pouze tato technologie, ale spadá sem velké množství druhů strojů, které se liší například použitým materiálem, způsobem depozice a vytvrzení vrstvy materiálu. Tyto různé druhy tiskáren budou rozebrány níže. Princip 3D tisku, jak již bylo řečeno, spočívá v „pokládání“ jedné vrstvy za druhou, čímž dochází ke tvorbě požadovaného objektu. Tento proces začíná však vytvořením modelu v jednom z používaných CAD programů, po němž následuje vyexportování souboru ve formátu, který obsahuje geometrii modelu v trojúhelnících. Zkratka takového souboru je STL neboli „Surface Tesselation Language“, a tento soubor se následně vkládá do „Sliceru“, což je program, který rozdělí geometrii na vrstvy a vytvoří seznam příkazů, takzvaný G-KÓD, které má tiskárna pro tisk výrobku vykonat. Poté je seznam příkazů vložen na vhodném nosiči, jako třeba SD karta nebo USB, do tiskárny a dojde ke spuštění tisku, a po dokončení je možné provést následnou úpravu výtisku. [1,3,4,5,7,8,10]

1.1 Historie 3D tisku

Historie 3D tisku začíná v 80. letech 20. století, a to patentováním první tiskárny Charlesem Hullem, který se později stal zakladatelem společnosti 3D Systems. Před tímto obdobím neměly jiné aditivní technologie tak široké spektrum aplikace jako nyní a v té době hlavní využití spadalo do elektronického průmyslu, a to konkrétně výroba mikročipů. Toto se mělo změnit již zmíněným patentováním první tiskárny, která pracovala na principu SLA (Stereolitography), k čemuž došlo v roce 1986. V tomto patentu Hull popisoval způsob, jakým dochází ke vzniku výrobku, tedy depozici materiálu po vrstvách a jejich vytvrzení. Jako první objekt, který vznikl pomocí této tiskárny, byl 5 cm vysoký hrnek, jehož tisk trval několik měsíců. Charles Hull však nebyl jediný, kdo pracoval na aditivní technologii 3D tisku. Další snahy o vytvoření 3D tiskáren probíhaly v té době i na Massachusettském Institutu Technologie a Texaské Univerzitě, kdy výsledkem výzkumu poslední zmíněné je první návrh tiskárny, jež operuje na principu technologie SLS (Selective Laser Sintering).

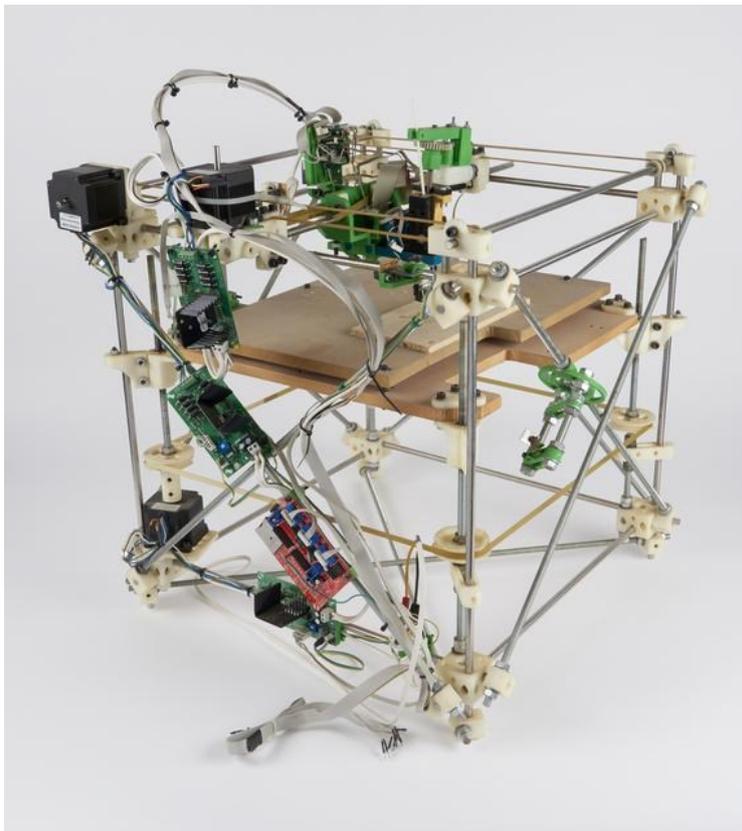
Ke konci 80. let byla vyvinuta technologie 3D tisku zvaná LOM (Laminated Object Manufacturing), jež spočívá v pokládání papírových vrstev, které byly vyříznuty pomocí laseru, avšak tato technologie nebyla příliš úspěšná z hlediska aplikace. Koncem 80. let také byla patentována tiskárna, operující na principu, který je nyní nejvíce rozšířený mezi 3D tiskárnami, a to FDM (Fused Deposition Modeling) neboli také zvaná FFF (Fused Filament Fabrication). Tento druh tiskárny patentovali manželé Steven a Lisa Crump konkrétně v roce 1989 a dále založili společnost Stratasys. V roce 2005 tento patent vypršel, což vedlo ke vzniku uskupení RepRap a následnému rozšíření této technologie. [2,3,4,6,9]



Obrázek 1 Charles Hull [12]

Přibližně po dobu dvou dekad po patentování první 3D tiskárny byla aplikace těchto v té době drahých strojů limitována pouze na průmyslové prostředí, kde se používaly na takzvaný „Rapid Prototyping“, avšak po zmíněném vypršení patentu manželů Crumpových se tato skutečnost měla změnit. V roce 2005 na Univerzitě v Bathu vzniká pod vedením Adriana Bowyeru projekt s názvem RepRap, což je zkratka pro „Replicating Rapid Prototyping“, jehož cíl bylo vytvoření cenově dostupné a patentově nechráněné tiskárny. Výsledkem tohoto projektu byla tiskárna, pojmenovaná Darwin, pracující na principu FDM, jejíž návrh nebyl nijak chráněn a veškeré výkresy a použité součásti byly Bowyerem zveřejněny, což umožňovalo komukoliv libovolně upravovat tuto tiskárnu, k čemuž dokonce samotný

Adrian Bowyer vyzýval. Další zajímavou myšlenkou tohoto projektu byla možnost výroby nových tiskáren na tiskárnách stávajících, tedy replikace, a to tak, že by se vhodné části stroje nahradili vytištěnými díly. V návaznosti na tento projekt byla v roce 2010 Josefem Průšou vydána první česká tiskárna Prusa Mendel, která se vyznačovala jednodušším návrhem. [2,3,4,6,9]



Obrázek 2 První tiskárna uskupení RepRap Darwin [11]

O rok dříve vznikla společnost MakerBot, která prodávala stavebnice, které umožňovali zákazníkům sestavit si svoji 3D tiskárnu. Následoval nárůst nových návrhů, jenž vycházeli z tiskárny RepRap uskupení, díky čemuž se tento projekt rozrostl na mezinárodní spolupráci, která doteď pracuje na 3D tiskárnách a jejich vylepšení. Díky uskupení RepRap se z drahých 3D tiskáren staly cenově dostupné stroje, které se přesunuly z čistě průmyslového využití ke spotřebitelům, což dále pomohlo k rychlému vývoji této technologie, využívání nových materiálů a v důsledku toho i použití výtisků v inovativních aplikacích. Výsledkem tohoto několikaletého vývoje jsou novodobé tiskárny, které se oproti jejím starším modelům liší nejen mnohem lepší kvalitou tisku, ale i mnohem vyšší rychlostí tisku, mnohem širším spektrem tisknutelných materiálů a jednodušším používáním a údržbou. [2,3,4,6,9]

1.2 Technologie 3D tisku

Jak již bylo řečeno, pod pojem 3D tisk spadá mnoho různých technologií, které se navzájem odlišují, mají své výhody i nevýhody, jiný tiskový materiál, proces depozice nebo vytvrzení vrstvy, a proto je Americká Společnost pro testování a materiály neboli ASTM, rozdělila do sedmi kategorií, konkrétně:

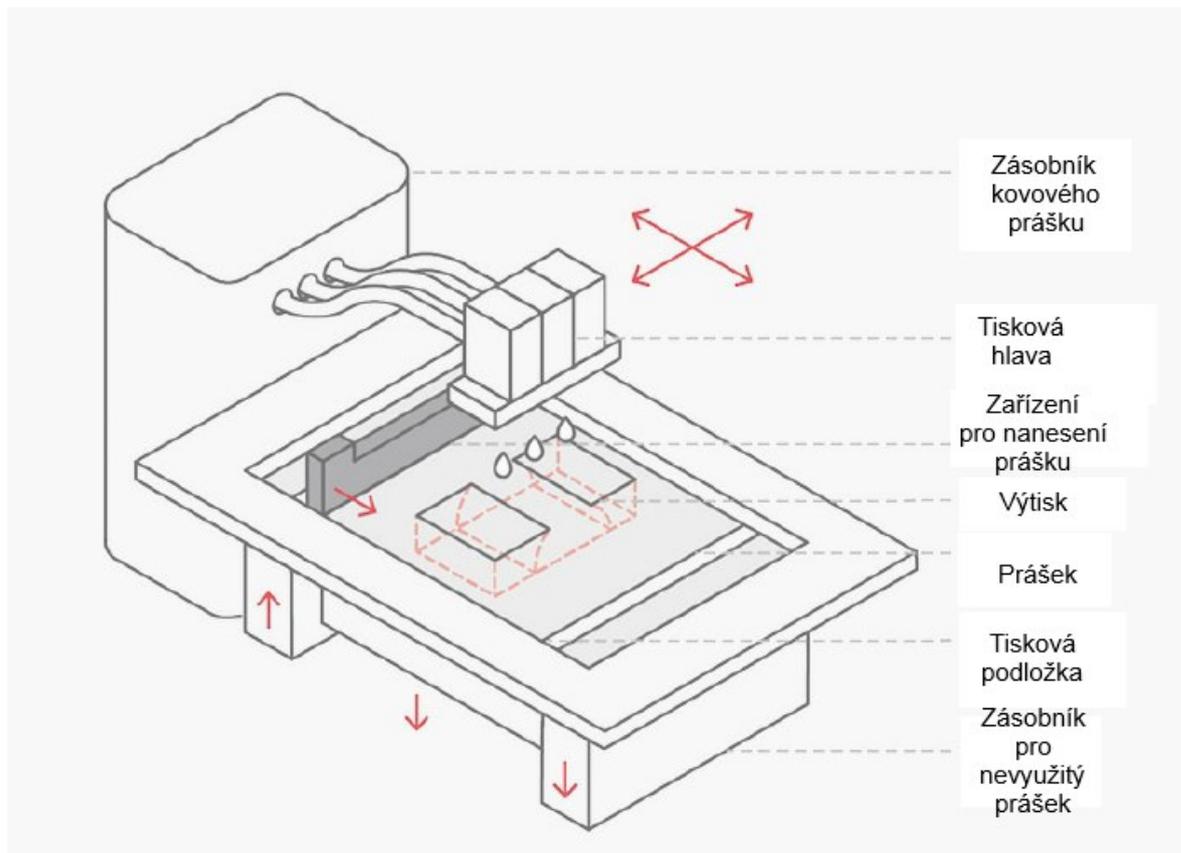
- Binder Jetting
- Directed Energy Deposition
- Material Extrusion
- Material Jetting
- Powder Bed Infusion
- Sheet Lamination
- Vat Photopolymerization

Následující kapitoly se budou zabývat popisem těchto skupin a technologií do nich spadající, které jsou nejvíce používané, zároveň však větší prostor zde bude věnován technologii FDM, která je dále využita při vypracování praktické části, a tudíž je i hlavním zaměřením této práce. [3,4,8,10]

1.2.1 Binder Jetting

Jedná se o univerzální technologii, která spočívá v nánosu tekutého pojiva na specifická místa práškové lože, která jsou daná geometrií řezu tisknutého objektu, a následnému vytvrzení pojiva, čímž dojde ke spojení práškové vrstvy v jeden celek. Jakmile je tento proces dokončen pro danou vrstvu, dojde k posunutí tiskové podložky o výšku vrstvy níže a proces se opakuje pro novou vrstvu a její geometrii. Po dokončení tisku je nevyužitý písek odstraněn stlačeným vzduchem a může být poté využit proces slinování pro lepší mechanické vlastnosti. Tato technologie se dělí podle využitého materiálu prášku na tisk s pískem a tisk s kovovým práškem. Tisk s pískem se využívá obzvláště pro slévárenské formy a jejich jádra, jelikož je možná výroba rozměrově velkých a tvarově komplexních geometrií, a to při nízké výrobní ceně a bez nutnosti rozsáhlých dokončovacích úprav, díly jsou tedy ihned po vytištění a odstranění přebytečného písku připraveny pro slévání. [8,10,13,14]

I tisk s kovovým práškem umožňuje tisk komplexních geometrií, které by se standartními výrobními metodami buď vůbec nepodařili vyrobit, nebo by jejich výroba byla příliš nákladná. Avšak špatné mechanické vlastnosti takového výtisku bezprostředně po tisku, tedy bez následného opracování, neumožňují prakticky žádnou aplikaci. Z tohoto důvodu se musí po dokončení tisku využít buď infiltrace, nebo slinování. První zmíněná dokončovací operace spočívá v tom, že pomocí tisku technologií Binder Jetting vytvoříme základní část, kterou po vytvrzení vložíme do pece, kde dojde k odstranění pojiva, čímž se sníží hustota na 60 % původní hodnoty. Následně dutiny vyplníme bronzem, což zlepší mechanické vlastnosti a zvýšení hustoty na 90 %. Během tohoto procesu však dochází k tepelnému smrštění, které nelze jednoduše předpokládat, proto se většinou spoléhá na praktické zkušenosti. Slinování probíhá opět tak, že se vytiskne základní model, který je následně na několik hodin vložen do pece, kde dojde k odstranění pojiva a následnému spečení prášku, čímž dojde opět ke zlepšení mechanických vlastností, avšak dojde k nestejnomyrnému smrštění výrobku, což však bývá řešeno při návrhu výrobku zvětšením jeho rozměrů o předpokládané zmenšení rozměrů. [8,10,13,14]



Obrázek 3 Binder Jetting [8]

Jednou z hlavních výhod této technologie je, že během procesu tisku nedochází k prudkému ohřevu ani ochlazení, a tudíž i vzniku s tím spojeného napětí. Dále lze dosáhnout přesných rozměrů při velkých rozměrech výtisků, energetická účinnost je vysoká a materiál pro tuto technologii je levnější než jiné technologie 3D tisku, které využívají kovové prášky. Podobně jako u jiných technologií využívající prášky není potřeba tisku podpůrných struktur a nevyužitý prášek lze opět použít. Výhodou je také možnost barevného tisku, a to s pomocí dvou tiskových hlav, kdy jedna standardně nanáší pojivo a druhá PMMA prášek s pigmentem. Podstatnou nevýhodou jsou však horší mechanické vlastnosti než u jiných práškových technologií 3D tisku. Toto lze částečně eliminovat slinováním nebo infiltrací, avšak stále nelze dosáhnout lepších mechanických vlastností jako u SLS a podobných technologií. [8,10,13,14]

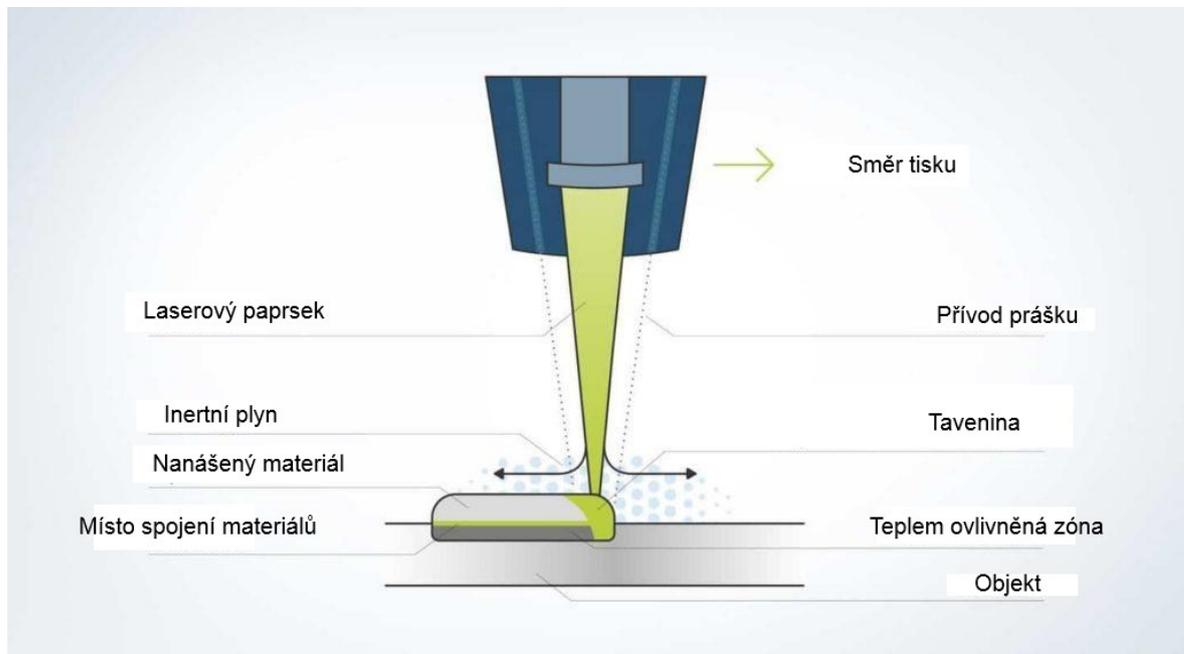
Aplikaci této technologie lze najít v již zmíněném slévárenství a dále také v leteckém průmyslu, nástrojích a šperkařství. [8,10,13,14]

1.2.2 Directed Energy Deposition

Je poměrně komplexní technologií, která spadá pod 3D tisk a je vhodná převážně pro opravu, nebo přidání materiálu ke stávajícímu objektu. Princip spočívá v přidávání materiálu v práškové podobě nebo ve formě drátu, který je pomocí tepelné energie, jež je zaměřena do specifického místa, taven a následně nanášen do určeného místa, přičemž poté dojde k ochlazení a ztuhnutí materiálu. Na rozdíl od jiných technologií 3D tisku není zde pohyb trysky, a tím i depozice materiálu, limitována osami, ale lze ji orientovat do vícero směrů. Lze také využít poměrně širokého spektra materiálu, konkrétně keramiky, polymerů, ale také i kovů. Tuto technologii lze dále dělit podle využitého typu energie na tavný systém, do něhož dále spadá tavení pomocí laseru, elektronového paprsku, plazmy a elektrického oblouku, a systém kinetické energie. Pro materiály ve práškové podobě se využívá exkluzivně tavení pomocí laseru, materiál ve formě drátu se taví pomocí zbývajících metod. Prášková metoda má lepší rozměrovou přesnost, avšak umožňují depozici většího množství materiálu a tisk rozměrnějších struktur. Systém založený na kinetické energii urychluje částice o velikosti jednoho mikrometru na nadzvukovou rychlost, která také překonává kritickou rychlost pro daný materiál, čímž při nárazu na substrát dojde k přilnutí a tím i k depozici materiálu. [8,15,16,17,18]

Mezi výhody této technologie patří především velmi dobré mechanické vlastnosti, široké spektrum materiálu a možnost tisku poměrně velkých objektů. Dále výtisky nemusí

podstupovat extenzivní post-processing. Hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena, nízké tiskové rozlišení a nemožnost tisku převyšů. [15,16,17,8,18]



Obrázek 4 Directed Energy Deposition [16]

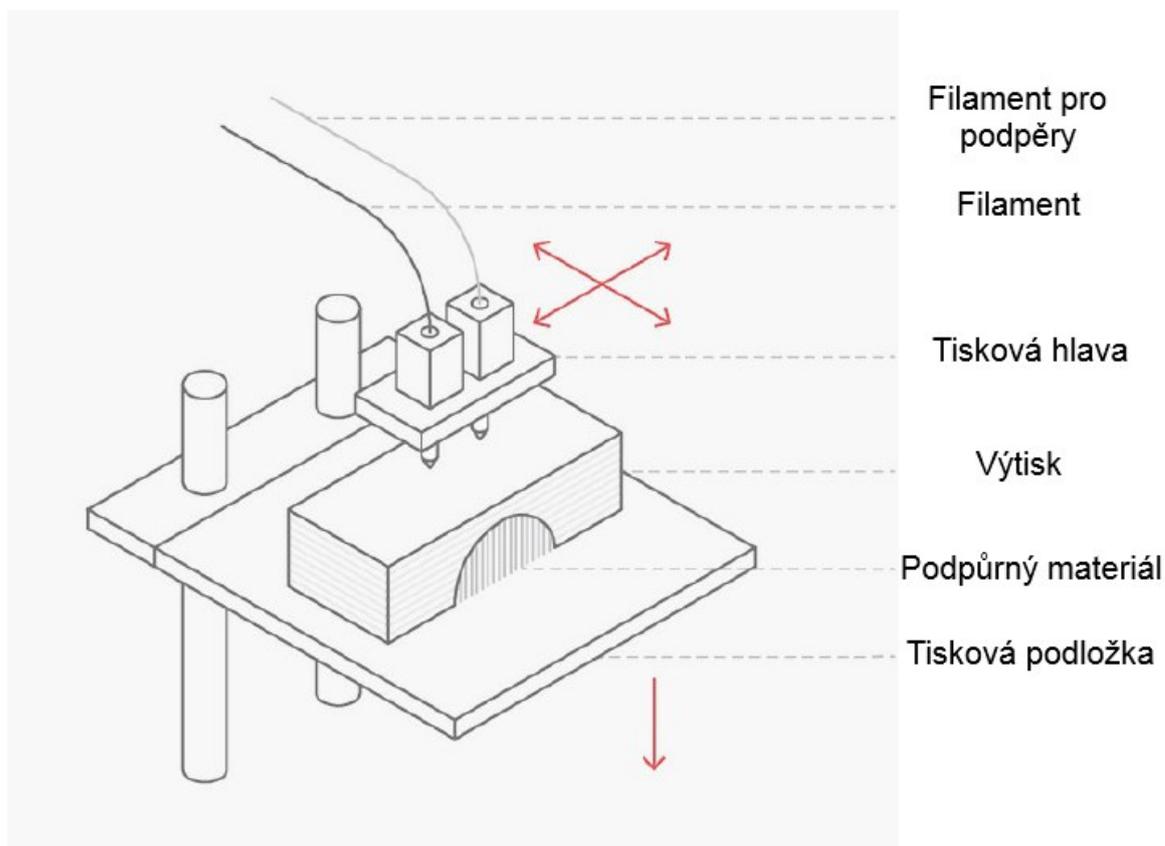
Tato technologie se nyní převážně využívá v leteckém a zbrojním průmyslu, a to například pro rámy letadel, kovové součásti, oprava poškozeného drahého materiálu, u kterého by byla taková oprava levnější než pořízení nového materiálu, a neovlivňovala by negativně funkčnost. [8,15,16,17,18]

1.2.3 Material Extrusion

V současné době se jedná o nejpoužívanější skupinu 3D tiskových technologií, do které spadá právě nejrozšířenější technologie FDM (FFF) za níž stojí zmínění manželé Crumpovi, kteří tuto tiskárnu patentovali v roce 1989. Základní princip této technologie spočívá ve vytlačení taveniny polymeru skrz trysku na tiskové hlavě a následnou depozici taveniny na určená místa na tiskové podložce, popřípadě na předešlé vrstvě polymeru, kde dojde ke ztuhnutí polymerní taveniny, čímž vzniká tisknutý objekt. Již v předešlých kapitolách byla tato technologie označována dvěma názvy, Fused Filament Fabrication (FFF) a Fused Deposition Modeling (FDM), což je z důvodu ochranné známky společnosti Stratasys na názvu FDM. [1,3,4,8,19]

Pokud bychom se podívali na obsáhlejší princip této technologie, tak prvotním krokem je vložení materiálu v podobě filamentu, který je namotán na cívce, do tiskové hlavy. Dále následuje zapnutí krokového motoru v tiskové hlavě, který otáčí podávacími kolečky, které

posouvají filament dál do tiskové hlavy, kde poté dochází pomocí topného tělesa k ohřevu polymeru a následnému tavení, čímž se i snižuje viskozita materiálu. Samotné tavení však ke spolehlivému vytlačení taveniny přes trysku nestačí, k tomu je potřeba generace tlaku, která je dále způsobena vstupem dalšího filamentu do tiskové hlavy, lze si tedy tiskovou hlavu představit jako pístový vytlačovací stroj, kde píst je nahrazen přísunem filamentu. Po vytlačení se tavenina nanese na tiskovou podložku, nebo předešlou vrstvu, kde, jak bylo zmíněno, dojde v důsledku chladnutí k ztuhnutí materiálu. [1,3,4,8,19]



Obrázek 5 FDM tiskárna [8]

Vzhledem k přesunu tiskové hlavy na další vrstvu existují dva druhy FDM tiskáren, konkrétně první druh, u kterého se tisková podložka pohybuje pouze v ose Y, v ose X a Z se pohybuje tisková hlava, a druhý typ, u něhož se tisková podložka pohybuje pouze v ose Z a tisková hlava ve dvou zbývajících osách X a Y. V případě prvního, kterému se v tiskařské komunitě říká „Bed Slinger“ a mezi jeho výhody patří jednoduché sestavení, fungování, údržba a také nízká cena. Avšak při urychlování a samotném pohybu motor pracuje s celou vahou tiskové podložky, což v tomto případě znamená nižší akceleraci a také i rychlost. V důsledku váhy podložky vznikají během rychlého tisku vibrace, které však lze snížit

využitím takzvaného „Input Shaping“ a i přesto, že se do nových tiskáren tato funkce implementuje, stále není součástí všech tiskáren. Další méně významnou nevýhodou je nutnost větších tiskových krytů pro tiskárny, kvůli pohybu podložky v ose Y. Druhá možnost, u které se podložka pohybuje pouze ve směru Z, se nazývá „CoreXY“. Vzhledem k tomu, že není potřeba hýbat během tisku vrstvy s celou podložkou, ale pouze s lehčí tiskovou hlavou, tak je celkové zrychlení a rychlost podstatně vyšší než u první varianty. Také vzhledem k nižší hmotnosti jsou nižší i vibrace způsobené rychlým pohybem tiskové hlavy a v poslední řadě jsou takové tiskárny kompaktnější. Nevýhodami na druhou stranu jsou sestavení a údržba zejména kvůli složitějšímu systému řemenů, a také v důsledku toho vyšší cena. [1,3,4,8,19,20]

Jednou z nejdůležitějších věcí, kterou můžeme upravovat na takové tiskárně, je velikost trysky, jelikož při větším průměru trysky se podstatně zrychlí tisk, avšak na úkor kvality výtisku. Kromě různých průměrů trysek lze tisk s touto technologií ladit mnoha dalšími parametry, jenž se promítají do G-kódu, a proto se tyto parametry nastavují v programu zvaný „Slicer“, zde pak lze nastavit například výplň výtisku, díky kterému můžeme ušetřit materiál, avšak na úkor mechanických vlastností. Dále můžeme nastavit výšku tiskové vrstvy, kterou při nižších hodnotách můžeme velmi zlepšit kvalitu povrchu, avšak při delší době tisku. Hodnota výšky vrstvy je však omezena průměrem trysky, trysky s větším průměrem tedy můžou tisknout vyšší vrstvy. Poté lze upravovat i počty perimetrů, zda se vytiskne obrys nebo límec, který zlepší adhezi výtisku k tiskové podložce, typy podpor nebo rychlost tisku, popřípadě parametry chlazení. Pro co nejlepší kvalitu tisku lze pak ladit násobič extruze, čímž se reguluje množství vytlačeného filamentu. Další parametrů, které lze upravit, je nespočetně, avšak tyto jsou ty základní. [1,3,4,8,19]

Tiskárny využívající této technologie můžou tisknout se širokým spektrem materiálů, jako třeba PLA, PETG, ABS, ASA, Nylon, TPE, TPU, různé kompozitní materiály atd. Materiálům bude věnována samostatná kapitola, kde budou podrobně rozebrány ty nejpoužívanější, avšak každý jednotlivý materiál má svoje výhody a nevýhody, vlastní procesní podmínky i vhodné aplikace. [1,3,4,8,19]

Nutnost post-processingu u FDM výtisku závisí na předpokládané aplikaci, pokud tedy je výtisk zamýšleno použít jako součást mechanismu, kde nezáleží na vizuálních vlastnostech, tak tiskárny jsou schopné vytvořit výtisk i s tolerancemi bez nutnosti složitějšího následného opracování. Takovým základním opracování je například odstranění podpěrných struktur. U objektů, ať už součástí mechanismů, jejichž jedna, nebo více stran bude pohledových, nebo

dekorativních objektů, je nutné použitím brusného papíru, laku, pryskyřice, lepidla a jiných prostředků provést post-processing, díky kterému můžeme dosáhnout vlastností, které požaduje aplikace. Některé materiály lze také naleptávat vhodnou chemikálií, čímž dojde k sjednocení povrchu bez viditelných tiskových vrstev. [1,3,4,8,19]

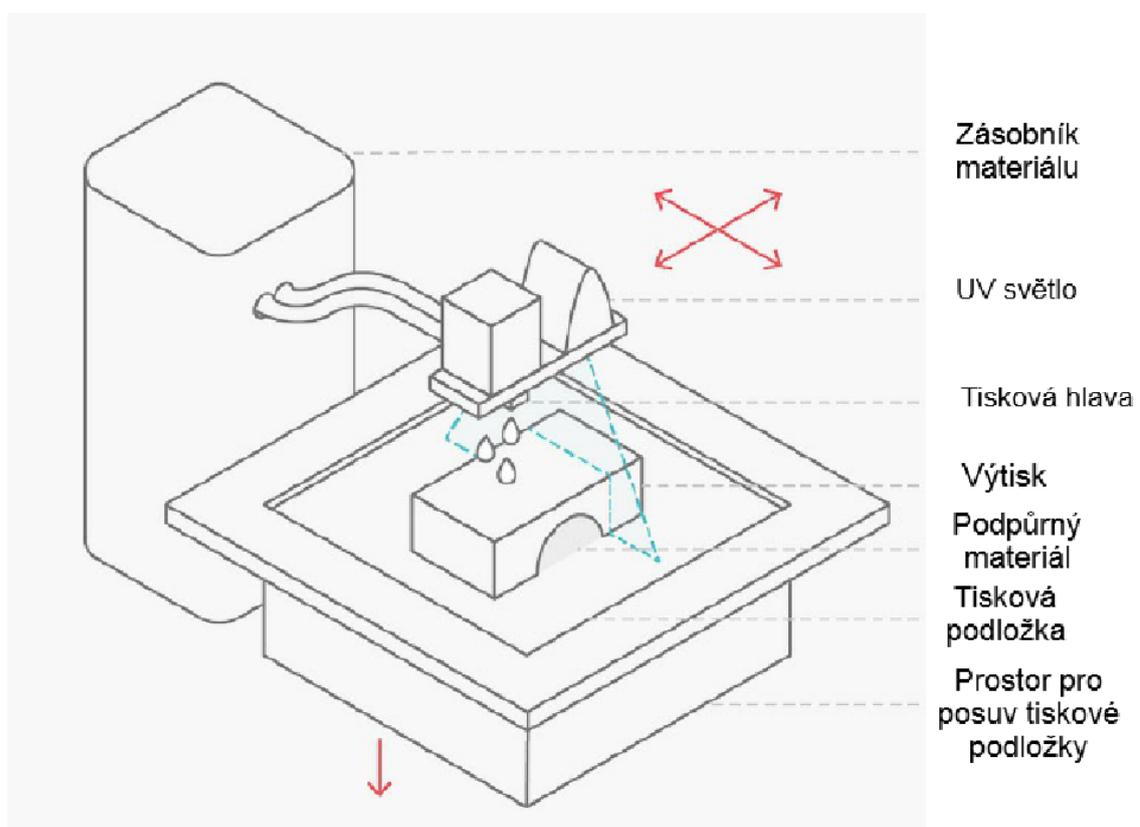
Podstatnou výhodou, která také vedla k rozšíření tohoto druhu tiskáren, je nízká cena a jednoduchá manipulace a údržba, a také tiskem lze získat objekty, které není nutné jako u jiných technologií složitě opracovávat. Dále mezi výhody lze zmínit i cenovou dostupnost materiálů vhodných pro tisk, samotné mechanické vlastnosti výtisků a komplexní geometrie, které touto technologií lze vytvořit. Mezi nevýhody patří zejména horší kvalita tisku než jaké lze dosáhnout například u SLA tiskáren, což je způsobeno větší viditelností jednotlivých vrstev. Samotné vrstvy poté vedou k anizotropii výtisku, jelikož mechanické vlastnosti závisí na orientaci výtisku, což je nutné vzít v potaz při nastavování tisku. [1,3,4,8,19]

Oblíbenými aplikacemi zejména u obyčejných spotřebitelů v domácnostech je nahrazování zničených součástí, tisk krytů elektroniky, dekorativních objektů a dalších předmětů, které lze využít pro každodenní život. V průmyslu se používá FDM tisk pro zkoušení rozměrů a tolerancí součástí, což podstatně snižuje náklady navrhování součástí. [1,3,4,8,19]

1.2.4 Material Jetting

V rámci tohoto tiskového procesu dochází k tryskání kapek materiálu, který se nanáší na specifická místa dané geometrii modelu. Princip je velice podobný obyčejné inkoustové tiskárně, avšak v tomto případě lze nanášet materiál ve třech dimenzích. Nanášené kapky jsou z materiálu, který je fotosenzitivní a tím pádem se pod UV světlem vytvrzuje. Tato technologie tedy umožňuje tisk velmi hladkých povrchů, ale také i velmi jednoduchý tisk objektů složených z vícero materiálů. Vzhledem k tomu, že tato technologie nanáší tisíce kapek materiálu v linii, na rozdíl od ostatních technologií, které nanáší materiál v jednom bodě, který se poté posunuje, je možné vytisknout vícero součástí bez vlivu na čas tisku, avšak objekty musí být optimálně umístěny. Další zajímavostí, která navazuje na jednoduchý tisk z vícero materiálů současně, je tisk podpor z materiálů, jenž lze rozpustit během opracování, které následuje po dokončení tisku. Díky těmto skutečnostem je tato technologie jednou z nejpřesnějších a nejrychlejších metod 3D tisku s nejnižší možnou výškou vrstvy, která se pohybuje kolem 16 mikrometrů. Nutné je však čistit trysky, aby nedošlo k ucpání, což by mohlo podstatně ovlivnit funkčnost tiskárny vzhledem k malému průměru kapek. Materiál, který většinou představují vhodné pryskyřice, se musí předeheat na teplotu mezi

30 až 60 °C, aby se vhodně snížila viskozita pro optimální tisk. Mnoho dalších technologií jsou omezeny na jeden typ povrchu, a to buď matný, nebo lesklý, zde však lze volit jeden z těchto dvou povrchů. Lesklý se tiskne pouze pomocí základního materiálu, v případě matného se ale na základní povrch nanese tenká vrstva podpurného materiálu, a to buď na všechny, nebo pouze na určité povrchy. Z hlediska rozměrové přesnosti je vhodné tisknout menší objekty, jelikož při vytvrzování se materiál smršťuje, což není u malých součástí tak výrazné jako u větších objektů. Vzhledem k již zmíněné relativně excelentní kvalitě povrchu není nutné z toho hlediska povrch opracovávat, proto se post-processing skládá především z nanášení laku pro zlepšenou odolnost. [8,10,21]



Obrázek 6 Material Jetting [8]

Nejvýraznější výhodou je velmi rychlý tisk, a to i s velmi kvalitním povrchem, kterého lze u ostatních technologií 3D tisku dosáhnout pouze po extenzivním opracování. Také rozměrová přesnost je velmi dobrá, avšak jak bylo zmíněno, klesá s velikostí tisknutého objektu. Nevýhodou jsou však špatné mechanické vlastnosti spojené s křehkostí výtisků, což může představovat problémy při jedné z nejdůležitějších aplikací, pro kterou je tato technologie využita, čímž je testování funkčnosti součástí. Mezi další nevýhody patří také

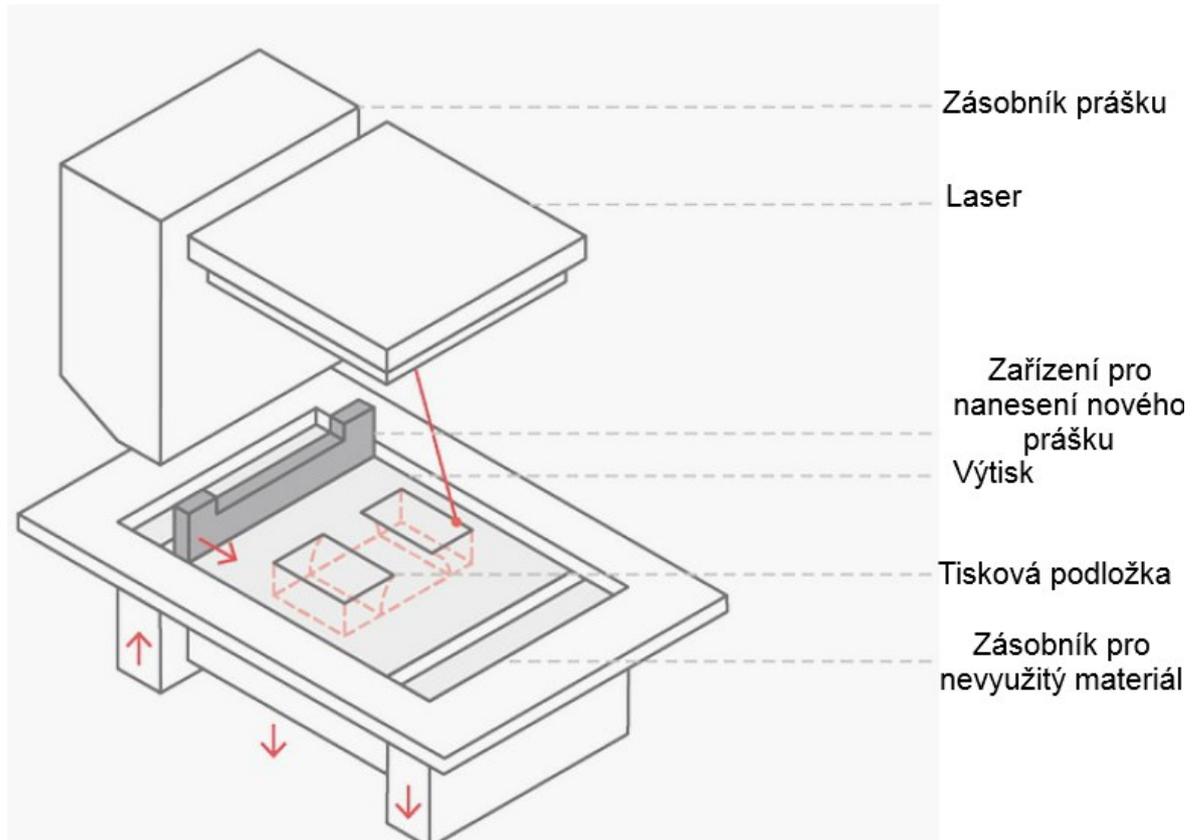
kromě velkého množství odpadu z důvodu nevyužitelných podpor velmi vysoká pořizovací cena takového zařízení a materiálu. [8,10,21]

Využití této technologie lze při zkoušení funkčnosti, jelikož je schopná vyprodukovat velmi realistické barevné prototypy, avšak je potřeba vzít v potaz horší mechanické vlastnosti a křehkost. Další aplikaci lze najít v medicíně jako možnost tisku částí anatomie lidského těla pro edukační využití. [8,10,21]

1.2.5 Powder Bed Infusion

Do této skupiny aditivních technologií 3D tisku spadá například Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM) a Selective Heat Sintering (SHS). Princip těchto technologií spočívá ve využití laseru, elektronového paprsku nebo topných těles ke spojení jemného práškového materiálu v jeden celek. Jako tiskový materiál lze využít kovy, polymery a keramiku. Takto se materiál nataví jen v určitých místech, které jsou opět dány geometrií tisknutého objektu, a po dokončení tisku vrstvy se posune tisková podložka o výšku vrstvy níže a nanese se nový prášek, na kterém se proces opět opakuje. Pro rychlejší tavení materiálu je práškový materiál v tiskové komoře již předem ohřát těsně pod teplotu tavení materiálu. Po dokončení tisku a ochlazení tiskové komory s práškem, což může trvat i hodiny, jsou výtisky vyjmuty a pomocí stlačeného vzduchu je z nich odstraněn přebytečný prášek, který lze opětovně použít při dalším tisku, avšak je potřeba přidat nový prášek, a to 10-70 % v závislosti na stroji a zamýšlené aplikaci. Obecně když se mluví o technologii SLS, tak se jedná o využití polymerního prášku, pro tisk s kovovým práškem je třeba zvolit DMLS nebo EBM, což jsou zařízení, jež umožňují dodání většího množství energie potřebného pro tavení kovového prášku, a také komory těchto strojů jsou naplněny inertním plynem, který zabrání hoření. Existuje také technologie Selective Laser Melting (SLM), která dodává takové množství energie, kdy nedojde pouze k sintrování, ale přímo k roztavení prášku. Tisknutím touto technologií lze standardně dosáhnout výšky vrstvy 100 mikrometrů. Dále velmi záleží na velikosti prášku, kdy výsledkem využití jemnějšího prášku je hladší povrch, ale takový prášek je spojen s několika problémy, které se týkají převážně manipulace. Výtisky jsou matné a na dotek mírně drsnější, povrch lze však zjemnit například pomocí honovacích tělísek. Podobně jako u SLA, počet tisknutých objektů prakticky neovlivní dobu tisku, která záleží primárně na maximální tisknutelné výšce zařízení. Z tohoto důvodu je nutné optimální umístění objektů na tiskové podložce, aby bylo využití tiskové komory co nejvyšší. Během návrhu objektů, které se budou tisknout touto technologií, je nutné vzít v potaz smrštění, kterému vrstvy

podléhají během tisku. Další skutečnost, kterou je nutné vzít v potaz, je zkroucení předešlé vrstvy, k čemuž dochází při nanášení nové vrstvy u velkých plochých objektů, jež se smrští a tím zkroučí předešlou vrstvu, což může způsobit kolizi tisknutého objektu s válečkem, jenž nanáší nový prášek. Z toho důvodu je nutné tyto objekty tisknout pod úhlem, aby se plocha jednotlivých vrstev snížila. Toto je možné omezit správně vyhřívanou komorou a zmíněným pomalým chlazením v komoře. [8,10,22]



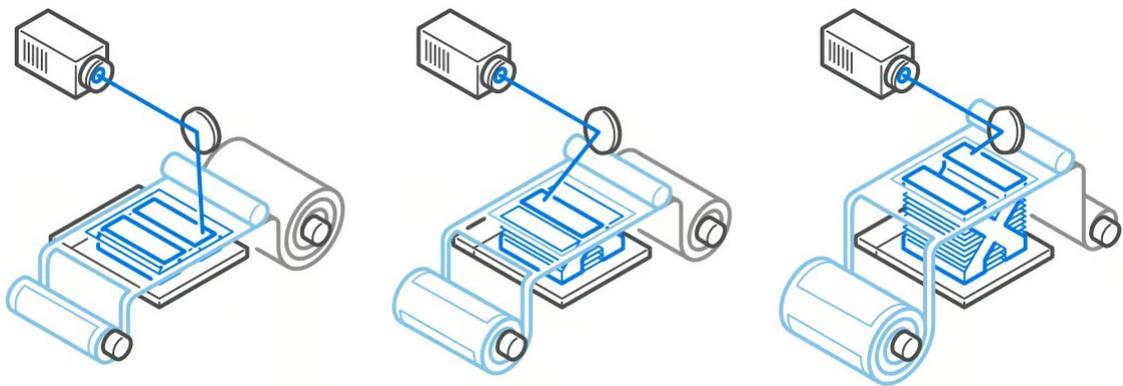
Obrázek 7 Powder Bed Infusion [8]

Výhodou této technologie je produkce výtisku s dobrými mechanickými vlastnostmi, které umožňují okamžitou aplikaci ihned po dokončení tisku a odstranění přebytečného prášku, který lze opětovně využít. Dále také není potřeba používat podpůrných struktur, jelikož samotný prášek zastává tuto funkci. Nevýhodou však je vysoká pořizovací cena, složitá manipulace s práškem, výměna materiálu, která vyžaduje kompletní vyčištění zařízení, a údržba. [8,10,22]

Díky dobrým mechanickým vlastnostem je lze použít například jako funkční součásti mechanismů. Tato technologie se především využívá v automobilovém, leteckém a zbrojním průmyslu, kde se tisknou prototypy, přípravky, vzduchové potrubí, náhradní díly a rukojeti. Dále se používá v medicíně pro tisk protéz. [8,10,22]

1.2.6 Sheet Lamination

Do této skupiny patří technologie Laminated Object Manufacturing (LOM) a Ultrasound Additive Manufacturing (UAM). Princip spočívá v nanášení materiálu v podobě listu na předešlé vrstvy, kdy po nanesení, je vrstva mechanicky nebo pomocí laseru oříznuta do požadovaného tvaru. K přilnutí nové vrstvy k předešlým vrstvám se používá buď tepla, nebo ultrazvuku. Jako materiál je možné využít listy z polymeru, kovu anebo nejčastěji papíru. V případě papíru a některých polymerů se používá pro spojení vrstev tepla a tlaku, kovové listy jsou spojovány ultrazvukovými vibracemi. Prvním krokem je odvinutí listu materiálu ze svitku a umístění na požadované místo, dále následuje oříznutí listu na požadovaný tvar a spojení nové vrstvy s předešlou vrstvou, poté se proces opakuje. Vzhledem k principu ořezání materiálu vzniká poměrně velké množství odpadu. Během tisku je možné materiál vyměnit, což umožňuje tisk kompozitních materiálů a barevných modelů. [23,24,25,26]



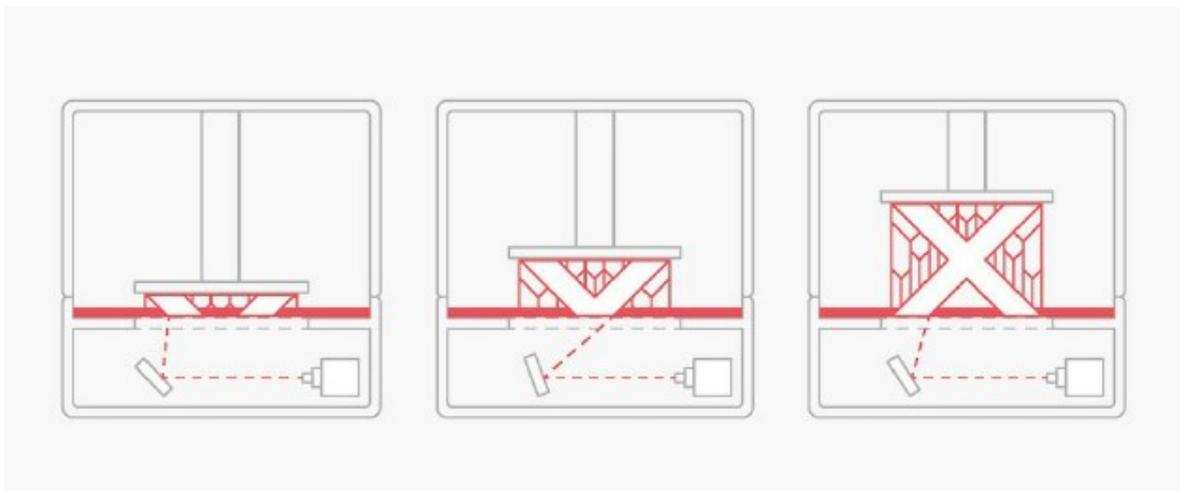
Obrázek 8 Sheet Lamination [46]

Mezi výhody této technologie patří zejména rychlost tisku, nízká cena a jednoduchost manipulace s materiálem. Výhodou je také jednoduchá možnost tisku barevných a kompozitních materiálů, a také není potřeba tvorby podpůrných struktur, což se však váže na větší množství vzniklého odpadu, který je možné recyklovat. Mezi nevýhody patří zejména větší množství odpadu, nutnost následného opracování a složitý tisk dutých částí. Dále lze zmínit i to, že změnu výšky vrstvy lze pouze výměnou materiálu a rozměrová přesnost výtisků není nejlepší. [23,24,25,26]

Aplikovat tuto technologii lze na tisk prototypů, které lze použít pouze na vizualizaci, topografických a architektonických modelů. [23,24,25,26]

1.2.7 Vat Photopolymerization

Do této skupiny spadá technologie Stereolithography (SLA), jenž se stala první technologií 3D tisku, která byla patentována, a to Charlesem Hullem. Kromě SLA sem patří také technologie Digital Light Processing (DLP). V této skupině 3D tiskových technologií se hlavně využívá fotopolymerizace, kdy dojde k vytvrzení materiálu, pokud je vystaven zdroji světla, čímž je nejčastěji UV záření. Technologie SLA a DLP se v základu liší tím, jak vytvrzují vrstvu materiálu, kdy SLA vytvrzuje bodově pomocí systému zrcadel, které zaměřují laser na požadovaná místa. Mezitím DLP dokáže vytvrdit celou vrstvu naráz, a to pomocí speciálního projektoru, který na materiál vysvítí tvar vrstvy, čímž dojde k vytvrzení. Díky tomu je také tisk s DLP mnohem rychlejší než SLA, avšak díky vysvěcování pomocí DLP je vrstva složena z malých voxelů. Po vytvrzení vrstvy se tisková podložka posune o výšku vrstvy a proces se opakuje. [3,4,8,10,27,28]



Obrázek 9 Vat Photopolymerization [8]

Na rozdíl od FDM tiskáren, zde je většina parametrů dána zařízením a nelze je měnit a při nastavování se volí pouze umístění a orientace objektu a podpor, výška vrstvy a materiál. Samotná výška vrstvy se obecně pohybuje od 25 do 100 mikrometrů. Existují také dva druhy tiskáren z hlediska směru posunu tiskové podložky, a to posun dolů a nahoru. Tiskárny, jejichž tisková podložka se posunuje během tisku nahoru, má zdroj světla umístěný ve spodní části tiskárny, kdy během tisku vrstvy musí pohyb tiskové podložky provést separaci vrstvy od spodní části tiskárny. Separace první vrstvy je nejdůležitějším krokem během tisku a vzhledem k vyvolanému napětí při tomto kroku, je na spodní část tiskárny aplikován nepřilnavý povlak, který je však třeba pravidelně měnit. Také je vhodné, aby první vrstvy měla co nejmenší kontaktní plochu, čehož můžeme docílit nakloněním tisknutého objektu. U druhého typu tiskárny se tisková podložka pohybuje směrem dolů, kdy po dokončení

vrstvy se tisková podložka posune a nanese se nová pryskyřice, dojde k vytvrzení a proces se opakuje. Aby bylo pokrytí pryskyřice rovnoměrné při tvorbě nové vrstvy je nutné zajistit vhodnou viskozitu materiálu. V rámci této technologie je nutný tisk podpor z důvodu udržení vrstev na místě. Podobně jako u SLS velké ploché objekty jsou náchylné na kroucení z důvodu smrštění nové vrstvy, čímž se zkroutí vrstva předešlá. Toto lze omezit také použitím vhodných podpůrných struktur, orientací a umístěním objektu. Obdobně je také vhodné umístit na tiskovou podložku co nejvíce objektů, jelikož doba tisku není podstatně ovlivněna. Po dokončení tisku následuje opracování, které se skládá z odstranění nevytvrzené pryskyřice pomocí izopropylalkoholu a následnému vystavení objektu UV záření, které zajistí, že výtisk je kompletně vytvrzen. Následovat může broušení pomocí brusného papíru a aplikace laku. [3,4,8,10,27,28]

Velkou výhodou této technologie je výsledná kvalita povrchu a rozměrová přesnost, které lze dosáhnout, a díky tomu ji lze použít na tisk prototypů, jenž se velmi podobají výrobkům vytvořeným pomocí vstřikování. Avšak mezi nevýhody patří poměrně zdlouhavé následné opracování a horší mechanické vlastnosti než u FDM výtisků. Také je nutné počítat s tím, že výtisky se můžou po určité době deformovat a při vystavení slunečnímu záření degradují.

Aplikovat je možné tuto technologii například na výrobu prototypů pro vstřikování. Dále se využívá také ve šperkařství a pro tisk dentálních modelů, zubních korunek a můstků. Také se pomocí této technologie tisknou části naslouchátek pro neslyšící a nyní je tímto způsobem vyrobeno 97 % těchto zařízení. [3,4,8,10,27,28]

1.3 Materiály pro FDM tisk

Jak již bylo zmíněno během kapitoly, která se věnovala rozboru FDM technologie, existuje široká řada tisknutelných materiálů. Pro tisk se využívá primárně termoplastických polymerů a termoplastických elastomerů. Materiál se vkládá do FDM tiskárny v podobě filamentu, což je velmi dlouhé vlákno polymerního materiálu, které je prodáváno ve dvou standardních průměrech, konkrétně 1,75 mm a 2,85 mm. V těchto následujících podkapitolách budou rozebrány základní materiály, které se používají pro tento druh tiskáren. Samotné kompozitní filamenty a jejich výroba jsou rozebrány v kapitole 2. [1,3,4,8]

1.3.1 PLA

PLA neboli kyselina polymléčná je nejrozšířenější materiál pro FDM tiskárny, a to zejména díky jednoduchému tisku a nízké tepelné roztažnosti, tudíž se velké výtisky nekroucí na

tiskové podložce. Kromě toho je také biodegradabilní a má relativně nízkou teplotu tavení, na 3D tiskárnách se obvykle tiskne při teplotě 210 °. Drtivá většina FDM tiskáren v této době již mají vyhřívanou podložku, avšak nebylo tomu tak vždy, a proto byl a stále je tento materiál tak oblíbený, jelikož nepotřebuje, aby byla tisková podložka vyhřívaná. Výtisky mají kvalitní povrch a jsou velmi tvrdé, nevýhodou je však křehkost a nízká teplotní odolnost. Tento materiál je také netoxický a během jeho tisku se nevypouští žádné zdraví škodlivé výpary. Post-processing je také poměrně složitý, jelikož PLA nelze rozpustit obvykle dostupným rozpouštědlem jako v případě ABS a jeho rozpouštědla acetonu. Kvůli nízké odolnosti vůči UV záření není vhodný pro venkovní použití. PLA se vyrábí tak, že například kukuřice se za vlhka namele, čímž se izoluje škrob, který se následně za tepla smíchá s enzymy a jinými chemikáliemi, což vede k vzniku speciálního cukru zvaného dextróza. Dextróza v dalším kroku podstupuje fermentaci, při které vznikají monomery budoucího polymeru, které se následně polymerizují. Využití může tento materiál najít například při tisku prototypů a v medicíně se z něj vyrábí částí zařízení pro fixaci kostí. Kromě toho samozřejmě tento materiál souží pro tisk hraček, figurek a dalších dekorativních objektů. [1,3,4,29,30]

1.3.2 PETG

Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem je velmi populárním materiálem při tisku mechanicky namáhaných částí a oproti základnímu polyethylentereftalátu je také méně křehký a jednodušší pro 3D tisk. Při srovnání s předešlým materiálem, PLA, zjistíme, že tento materiál má vyšší teplotní odolnost a lepší mechanické vlastnosti, tisk s tímto materiálem je skoro stejně jednoduchý jako s PLA. Jediné problémy, na které lze při tisku s tímto materiálem narazit je tahání struny neboli takzvaný „stringing“, a také horší tvorba přemostění, jelikož je tento materiál velmi lepivý. Je nutné také tento materiál skladovat v suchu z důvodu absorpce vzdušné vlhkosti. PETG je také bezpečný pro ukládání potravin, avšak je nutné vyplnit mezery mezi vrstvami například epoxidem, aby se zabránilo vzniku kolonií bakterií, které by mohly potraviny znehodnotit. Jak již bylo zmíněno, PETG má velmi dobré mechanické vlastnosti, což umožňuje tisk mechanicky namáhaných dílů, dále také má malou teplotní roztažnost, lesklý a hladký povrch. Nevýhodou je absorpce vzdušné vlhkosti a problematické přemostování. Při tisknutí tohoto materiálu je také vhodnější tisk na podložku se zrnitou texturou, jelikož u normální hladké podložky má tento materiál tendenci k vysoké adhezi, což může vyvolat řadu problémů při odstraňování výtisku

z tiskové podložky. Podobně jako PLA, nelze tento materiál vyhladit běžně dostupným rozpouštědlem jako u ABS a acetonu. [1,3,4,29,31]

1.3.3 ABS/ASA

Akrylonitrilbutadienstyren je jedním z nejběžnějších materiálů využívaných ve 3D tisku, jelikož se jedná o plast s dobrými mechanickými vlastnostmi. V současnosti se využívá pro výrobu řady produktů, jako třeba LEGO stavebnice, kuchyňské příslušenství, tlačítka na klávesnicích, součásti pro automobilový průmysl atd. Během tisku je nutné mít vyhřívanou podložku, kterou je potřeba mít zahřátou na teplotu mezi 90 až 110 °C. Kromě toho také teplota trysky je poměrně vysoká a pohybuje se mezi 230 až 260 °C. Významnou nevýhodou tohoto materiálu je tendence k velkému kroucení, což se dá omezit využitím krytu tiskárny. Další vlastností, díky které je kryt tiskárny prakticky nutností jsou toxické výpary, které vznikají během tisku s tímto materiálem. Z hlediska následného opracování je tento materiál velmi vhodný, jelikož je možné dosáhnout velmi hladkého povrchu pomocí acetonových par, které vyhladí stopy po vrstvách na výtisku. [1,3,4,32,33,34]

Velmi podobným materiálem je akrylonitril-styren-akryl neboli ASA, který by se dal označit jako nástupce ABS, jelikož v některých ohledech tento materiál předčí jeho předchůdce ABS. Zejména má lepší odolnost vůči UV záření, také tisk je s tímto materiálem jednodušší, jelikož se méně smršťuje a tím i méně krouťí. Horší je však jeho rozpustnost v acetonu. Má také dobrou chemickou a teplotní odolnost, deformovat se v důsledku vyšší teploty začne až kolem 100 °C. Podobně jako u ABS je zde také vhodné mít umístěný na tiskárně kryt, který zamezí kroucení a šíření toxických výparů a zápachu, který vzniká během tisku tohoto materiálu. Teploty tisku se pohybují u ASA v podobných hodnotách jako u ABS, tedy kolem 250 °C pro trysku a 100 °C pro podložku. Při tisku s takovými teplotami je však nutné vzít v potaz teplotu degradace PTFE trubičky, která se nachází v některých tiskových hlavách, proto není vhodné při takových teplotách dlouho tisknout. Díky zmíněným vlastnostem nachází výtisky z ASA a ABS převážně využití kromě prototypů jako obaly, kryty a ochranná pouzdra. Také díky vyšší teplotní odolnosti, než které lze dosáhnout u PLA můžeme tisknout i náhradní díly do interiéru aut, které obzvláště v létě mohou dosahovat vysokých teplot. [1,3,4,33,35,36]

1.3.4 PC

Polykarbonát je velmi silný materiál, který se vyznačuje zejména průhledností, odolností vůči teplu, výbornými mechanickými vlastnostmi a rozměrovou stabilitě až do 110 °C.

Tiskové teploty se proto ale také pohybují v poměrně vysokých hodnotách, zejména teplota trysky se pohybuje mezi 250 až 310 °C, u podložky jsou nutné teploty od 80 až po 150 °C. Už jenom kvůli těmto teplotám je tisk s tímto materiálem velmi náročný. Během tisku také dochází k tvorbě zápachu a toxických výparů, proto je také nutné využití krytu tiskárny. Polykarbonát musí být skladován hlavně v suchém prostředí, jelikož je silně hygroskopický, tedy dokáže absorbovat vzdušnou vlhkost. U velkých modelů také může dojít k silnému kroucení. Využití tento materiál je možné pro tisk funkčních prototypů, těl dronů, pantů a dalších objektů, které vyžadují mechanickou odolnost. Na trhu není dostupný pouze čistý polykarbonát, ale i takzvané „blendy“, ve kterých je polykarbonát smíchaný s jiným materiálem. [1,37,38,39,40,41,42]

1.3.5 Flexibilní materiály

Jsou to materiály ze skupiny termoplastických elastomerů a jejich významnou vlastností je jejich flexibilita, která umožňuje zajímavé aplikace takových výtisků, avšak tisk s těmito materiály je složitější než u standartních termoplastů. Nejčastěji se využívá pro výrobu flexibilních filamentů materiály ze skupiny termoplastických elastomerů zvaných TPU, tedy termoplastické polyuretany, dále však je možné narazit například na TPA, TPC a TPS. Na trhu jsou flexibilní filamenty rozděleny podle tvrdosti Shore, jelikož nezávisí na geometrii výtisku. Tvrdost Shore A u flexibilních filamentů se pohybuje od 60A až po nejčastější 95A. Nižší hodnota u flexibilního filamentu poukazuje na vyšší flexibilitu, která je však spojena s horším tiskem. Jelikož princip FDM tiskových hlav lze přirovnat k pístovému vytlačovacímu stroji, kdy píst je v tomto případě tuhý filament vstupující do tiskové hlavy, který vytváří tlak, díky kterému je vytlačena tavenina z trysky, je proto nutné si uvědomit, že filament s vyšší flexibilitou nebudou schopné vytvořit tlak potřebný pro vytlačení a dojde ke vzpříčení filamentu, což vede k ucpání tiskové hlavy. Proto se nejčastěji také tiskne s flexibilními filamenty, jejichž hodnota tvrdosti se pohybuje kolem 90A. Během tisku je také nutné optimalizovat hodnoty parametry ve Sliceru, zejména retrakci. Jak bylo již zmíněno, tyto materiály jsou flexibilní, což umožňuje zajímavé aplikace, také během tisku dochází pouze k minimálnímu kroucení a tyto materiály mají dobrou adhezi mezi vrstvami. Nevýhodou je však složitý tisk a komplikovaná optimalizace tisku, je také nutné, aby rychlost tisku byla nízká. Flexibilní filamenty musí být kvůli jejich schopnosti absorbovat vlhkost skladovány v suchém prostředí. [1,3,4,43]

2 KOMPOZITNÍ FILAMENT A JEHO VÝROBA

Kompozitní materiály jsou využívány už od nepaměti, ale až během druhé světové války vznikl kompozitní průmysl, který měl zaručit výrobu lehkých a odolných materiálů pro letecký, vojenský a lodní průmysl. Technologie kompozitních materiálů se od té doby posunula mílovými kroky vpřed a kompozitní výrobky jsou nyní využívány i v domácnostech a sportech. K průmyslu leteckému, vojenskému a lodnímu se přidal i průmysl automobilový a vesmírný, kde obzvláště v leteckém a vesmírném průmyslu využívají nízké hmotnosti těchto materiálů a jejich výborných mechanických vlastností. Kompozitní materiály se skládají ze dvou složek, a to matrice a výztuže. [44,45]

V posledních necelých dvou dekádách zažíváme rozšíření technologie 3D tisku do domácností a průmyslu. Díky možnosti tisku složitých geometrických tvarů a rychlému vytvoření výtisku našla tato technologie v průmyslu hlavně využití jako prostředek pro Rapid-Prototyping, což umožňuje předběžný náhled, testování a úpravu designu výrobku. Většinou ale nelze tyto výtisky, například z FDM tiskáren, použít při provozním zatížení. Existují sice tiskárny, jejichž výtisky méně rychle degradují nebo jsou více mechanicky odolnější, avšak tyto tiskárny mají řadu nevýhod jako vysoká pořizovací cena, složitá údržba a výměna materiálu a mnohdy nelze u nich dosáhnout komplexních tvarů jako u FDM tiskáren. Když ale aplikujeme znalosti kompozitních materiálů na výrobu filamentů do FDM tiskáren, můžeme získat mnohem odolnější výtisky, což umožní širší využití výtisků. Přidáním vhodného plniva můžeme získat magnetické nebo elektricky vodivé výrobky, dále můžeme vylepšit stávající vlastnosti, například můžeme zvýšit tepelnou vodivost nebo zlepšit mechanické vlastnosti, popřípadě lze přidat plnivo jen pro změnu vizuálních vlastností. [44,45]

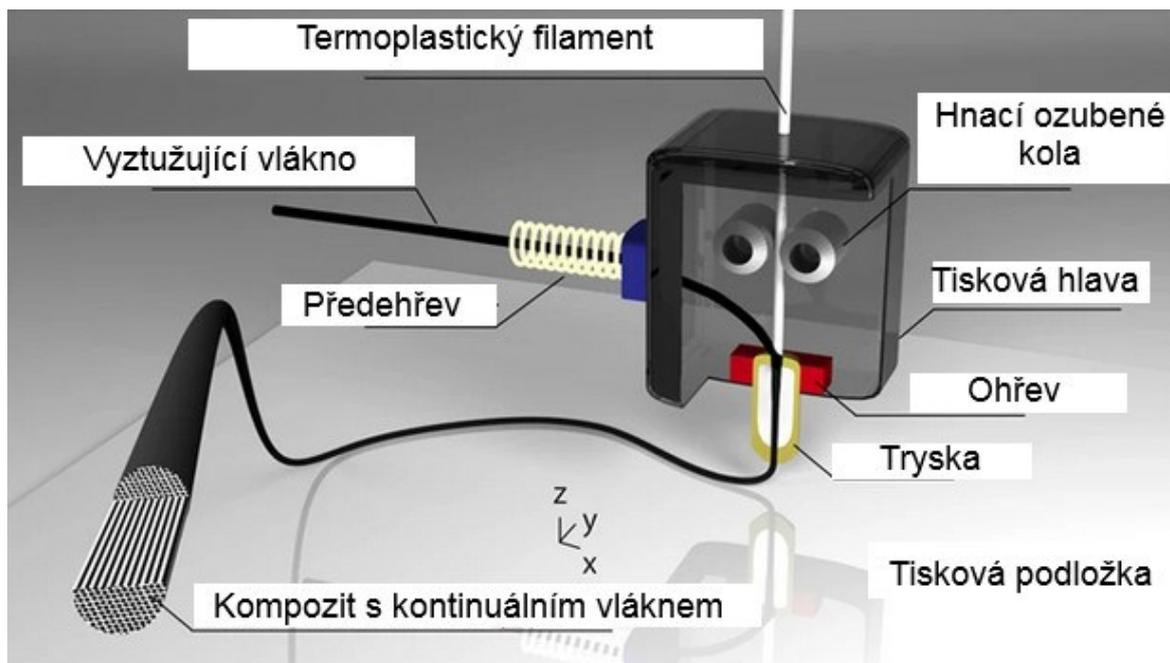
2.1 Výroba

Využívají se tři základní procesy přípravy homogenního materiálu z polymerní matrice a vhodného plniva, a to:

1. Impregnací v trysce
2. Zamíchání plniva při pokojové nebo zvýšené teplotě
3. S využitím rozpouštědla

2.1.1 Impregnace v trysce

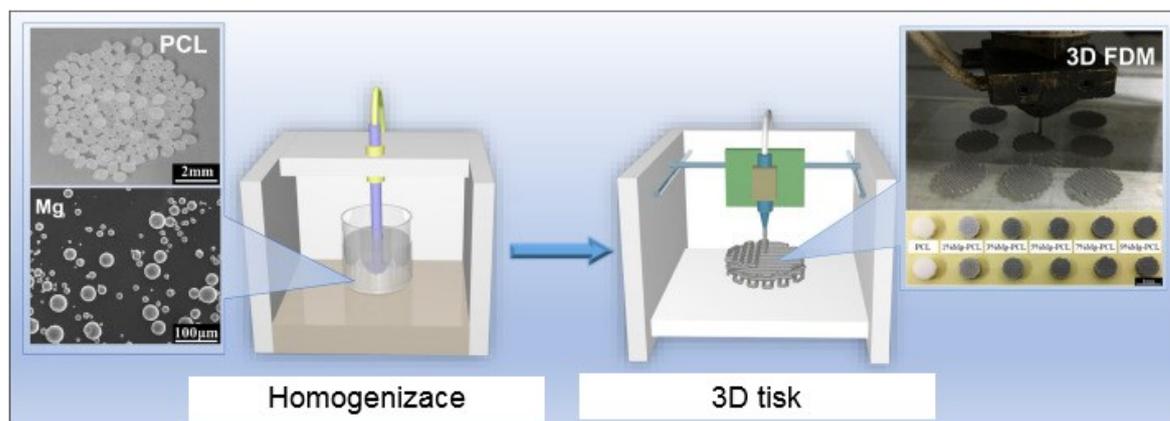
K přidání výztuže v podobě kontinuálního vlákna dochází přímo v trysce 3D tiskárny, není tedy třeba složité přípravy homogenního materiálu k výrobě granulátu a následného vytlačování filamentu, avšak je nutné upravit tiskovou hlavu tak, aby umožňovala přidávání vlákna do matrice v trysce, což může být u některých tiskáren problém, kvůli kompaktnímu řešení tiskové hlavy. [47]



Obrázek 10 Upravená tisková hlava pro impregnaci v trysce [47]

2.1.2 Zamíchání plniva při pokojové nebo zvýšené teplotě

Při tomto procesu dochází k zahřátí polymerní matrice nad teplotu tavení, následnému přidání požadovaného množství výztuže a homogenizaci materiálu mícháním. Poté je materiál buď v pevném stavu vložen do speciální tiskárny, která kompozit rozpustí a provede

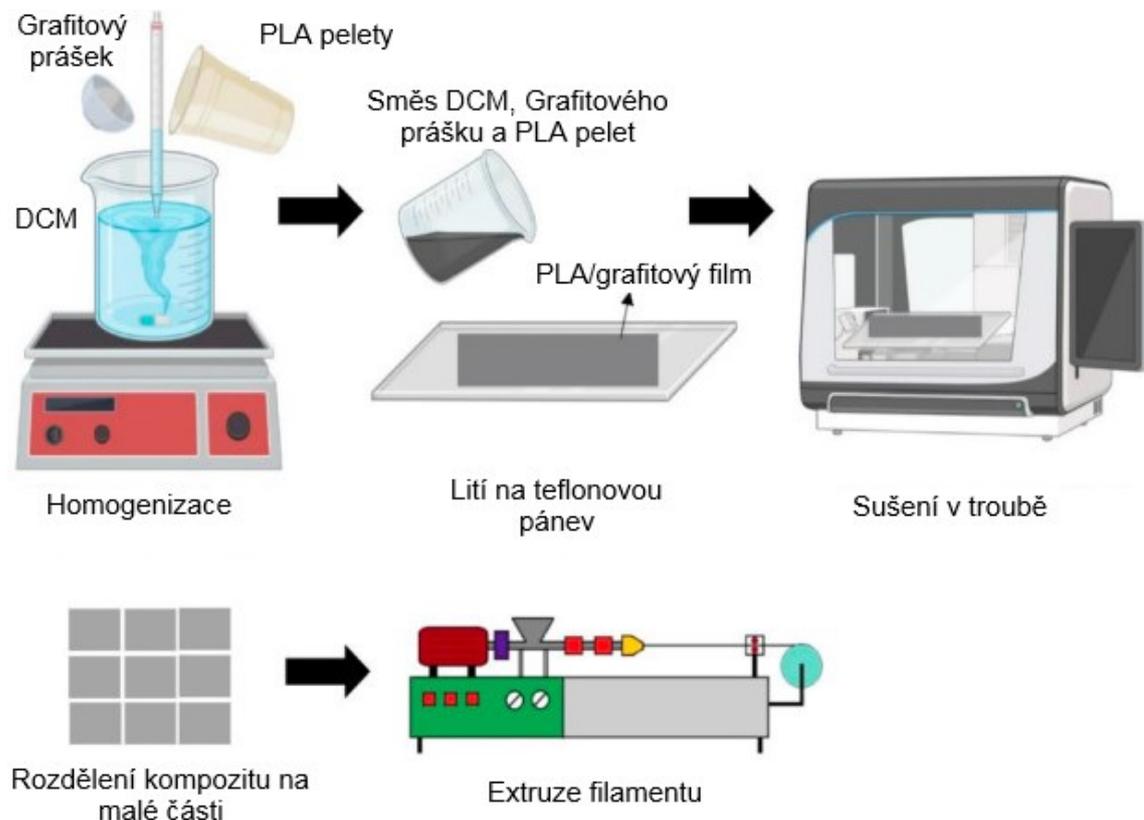


Obrázek 11 Proces zamíchání plniva při pokojové nebo zvýšené teplotě [48]

extruzi na tiskovou podložku, nebo je rozdrčen a použit na výrobu granulátu, z něhož je možné vyrobit filament do standartních FDM tiskáren. [48]

2.1.3 S využitím rozpouštědla

Využitím rozpouštědla lze do polymerní matrice vmíchat plnivo při pokojové teplotě jednoduchým mícháním, poté je však nutné rozpouštědlo z kompozitu odstranit, tudíž je potřeba po homogenizaci vložit materiál do horkovzdušné trouby i na několik hodin, kdy během tohoto času je rozpouštědlo z materiálu odpařováno. Někdy i 24 hodin tohoto procesu nemusí stačit a při vytlačování struny si lze na povrchu všimnout bublin, kde došlo k úniku zbývajícího rozpouštědla a je tedy nutné kompozit znovu nechat projít vytlačovacím strojem, dokud nedojde k úplnému odpaření rozpouštědla. Například u ABS se využívá acetonu a u PLA dichlormethanu (DCM). Z rozdrčeného materiálu lze přímo tisknout filament, ovšem, na rozdíl od granulátu, takový tvarově nerovnoměrný materiál obtížně prochází násypkou a může dojít k tomu, že se k vytlačovací hlavě nedostane dostatek materiálu, tudíž je vhodnější prvotně převést rozdrčený materiál na granulát a potom vytlačovat strunu, nebo vložit do násypky vibrační zařízení, které zaručí průchod nerovnoměrného materiálu z násypky do pracovního válce. [49,50,51]

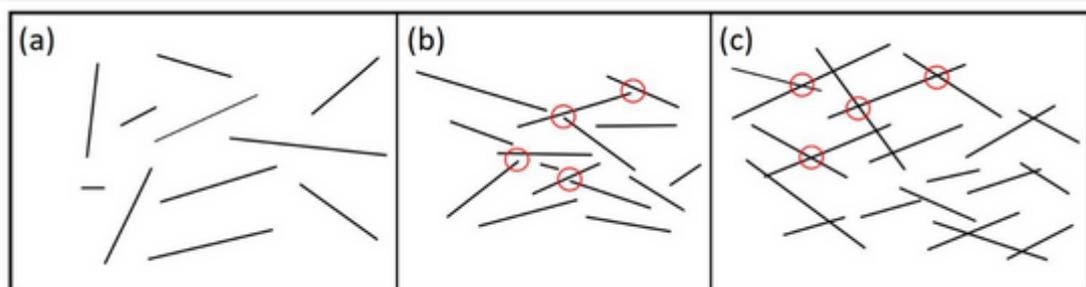


Obrázek 12 Proces výroby kompozitního filamentu s použitím rozpouštědla [51]

2.2 Kompozitní filamenty s uhlíkovým plnivem

Do polymerní matrice lze vkládat hned několik uhlíkových strukturních variant, jako třeba grafen, grafit, saze, uhlíkové vlákno a uhlíkové nanotrubic. Přidáním dostatečného množství takové výztuže můžeme získat kompozit s výbornými mechanickými i elektricky nebo tepelně vodivými vlastnostmi, například přidáním 10 hm. % uhlíkových vláken do ABS se zvedla pevnost v tahu o 60 % oproti čistému ABS. Dále pokud bychom vložili do matrice určité množství uhlíkového aditiva, při kterém by došlo k překročení perkolačního prahu (koncentrace, při které se stává izolant vodivým materiálem), získali bychom výtisky, které by vedly elektrický proud. Při zvyšujícím se obsahu uhlíkových nanotrubic v polymerní matrici dochází k častějším místům dotyku trubic, kde dochází k vedení elektrického proudu. Jsou-li trubice v menší vzdálenosti, může dojít k tunelovému jevu, což je kvantový jev, který umožňuje částici (v tomto případě elektronu) projít skrz bariéru (v tomto případě polymer), a v důsledku toho může materiál vést elektrický proud. Koncentrace, při které se stává materiál vodivým, ale jednotlivé trubice se nedotýkají (dochází k tunelovému jevu) překročila tzv. elektrickou perkolační mez. [44,49,51,52,53,54,55,56]

Saze jsou dalším vhodným plnivem pro získání elektrických vlastností, existuje ovšem několik druhů sazí, a pouze ty s nejmenším průměrem jsou vhodné jako plnivo do filamentu,



Obrázek 13 Obsah uhlíkových nanotrubic v polymerní matrici a) pod perkolační mezí, b) nad elektrickou perkolační mezí, ale pod mechanickou perkolační mezí c) nad mechanickou perkolační mezí [55]

u kterého požadujeme elektrické vlastnosti. Aby kompozitní filament s aditivem ze sazí dosáhl podobných výsledků jako filament s uhlíkovými nanotrubicemi, musí se jeho hm. % pohybovat v desítkách procent, samozřejmě závisí u těchto hodnot na kvalitě sazí. Takové zvyšování koncentrace sazí, ale i uhlíkových nanotrubic a jiných uhlíkových strukturních variant, vede k ucpávání trysky, problémům s extruzí a celkově složitějšímu tisku. [44,49,51,52,53,54,55,56]

Nevýhodou těchto uhlíkových aditiv, obzvláště u uhlíkových nanotrubic, je vysoká pořizovací cena, a tudíž i vysoká cena vyráběného filamentu. Uhlíkové nanotrubice je možné nahradit ekonomičtějším uhlíkovým vláknem, avšak dojde ke zhoršení vlastností ať už elektrických nebo mechanických. Objevují se také pokusy o využití recyklovaných uhlíkových vláken jako výztuže do kompozitních filamentů, jenž by vylepšili mechanické vlastnosti výtisků. [44,49,51,52,53,54,55,56]

2.3 Kompozitní filamenty s keramickým plnivem

Přidáním keramického prášku do polymerní matrice se primárně snažíme o zlepšení mechanických vlastností. Keramický prášek se do kompozitu nejčastěji zakomponuje při zvýšené teplotě nebo pomocí rozpouštědla. Samotný keramický prášek je drcen na $d < 10 \mu\text{m}$. [44,53]

2.4 Kompozitní filamenty s kovovým plnivem

Kovové prášky mají výbornou elektrickou vodivost, což by z nich dělalo vhodnou volbu pro roli vodivého plniva, avšak výroba vhodně malých ($d < 25 \mu\text{m}$) kovových prášků je složitá a tudíž i drahá, v důsledku toho jsou méně cenově dostupné než uhlíkové aditiva. Také je nutná vyšší koncentrace kovového aditiva v kompozitu než v případě uhlíkových plniv, avšak na druhou stranu, kompozit se stříbrným práškem je stále tisknutelný i při této koncentraci. V případě, že by uhlíkové nanotrubice byly obsaženy v podobné míře jako stříbrný prášek, by byl tisk složitější a docházelo by k ucpávání trysky. Zvyšováním koncentrace kovových prášků v těchto kompozitech zvyšuje elektrickou vodivost, avšak na úkor mechanických vlastností, které se při vyšších koncentracích prášků zhoršují, tento problém však lze vyřešit sintrováním výtisků. Přidáním vhodného aditiva do polymerní matrice, například magnetického železa, lze dosáhnout magnetických vlastností. Jedním z takových magnetických filamentů je Iron PLA od firmy ProtoPasta, jenž obsahuje 45 hm. % železa. Nevýhodou kompozitních filamentů, jejichž účelem je vedení elektrického proudu, je oxidace kovu, která po čase zvyšuje rezistivitu. Na trhu lze najít jen pár opravdu vodivých kompozitních filamentů s kovovým plnivem, jedním z nich je filament Electrifi od Multi3D. Zbývající filamenty na trhu nepřekračují koncentrací perkolační mez a nejsou tedy vodivé, využívají se obzvláště kvůli svým vizuálním vlastnostem, a to zejména v případě měděných filamentů, jejichž výtisky po určité době zoxidují a tím výtisky získají specifický zeleno-hnědý vzhled. [44,53,56]

2.5 Kompozitní filamenty se skleněným plnivem

Do polymerní matrice lze za účelem zlepšení mechanických vlastností zakomponovat sklo ve dvou podobách, jako kuličky nebo vlákna. Přidáním skleněných vláken lze tedy zlepšit mechanické vlastnosti, avšak při zavedení do extruderu 3D tiskárny může vést při vyšších koncentracích k lámání z důvodu křehkosti. Tento problém lze vyřešit přidáním nízkohustotního polyethylenu do kompozitu. Obecně lze tedy říct, že oproti skleněným kuličkám využití skleněných vláken zlepšuje mechanické vlastnosti mnohem lépe, bohužel zároveň s vyšší koncentrací vláken se stává polymer křehčím, což vytváří problém s lámáním filamentu při dopravě do tiskové hlavy, ale s využitím změkčovadla lze kompozit učinit lépe zpracovatelným. [44]

2.6 Kompozitní filamenty s dřevěným plnivem

Dřevěná výztuž se do polymerní matrice přidává v podobě rozdrceného dřeva, většinou odpadního materiálu jako kůra, piliny atd. Zakomponováním dřeva do polymeru se zvyšuje schopnost materiálu pohlcovat vodu, dále se snižuje jeho hustota a pevnost v tahu, pórovitost a drsnost výtisků je mnohem větší než u standartního výtisku z termoplastu. Kvůli těmto skutečnostem se dřevěné kompozitní filamenty využívají především z důvodu jejich vizuálních vlastností. Vzhledem k větší schopnosti absorbovat vodu, dřevěné kompozity by mohli být využity pro tisk 4D výtisků, které mění svůj tvar v závislosti na prostředí (teplota, vlhkost). Jedná se také o zajímavé využití odpadního materiálu, který vzniká v nábytkářském průmyslu. [44,73]

3 MAGNETISMUS

Magnetismus provází lidstvo již od starověku, kdy byl objeven minerál magnetit, kterému Řekové říkali magnes podle města Magnesia v Přední Asii, kde byl tento minerál objeven. Zpočátku samozřejmě lidé nechápali, proč se minerál chová, jak se chová, a kolovali o něm různé mýty. Fascinace s tímto minerálem v Číně vedla ke vzniku prvních kompasů, které se do Evropy dostali až na konci 12. století, což díky jednoduchému určení směru vedlo k revoluci v námořnictví. Novodobé chápání magnetismu vzniklo v Dánsku v roce 1820, kdy Hans-Christian Oersted objevil propojenost magnetismu a elektřiny. K tomuto objevu došlo náhodou, kdy Oersted přiložil drát, kterým procházel elektrický proud, ke střelce magnetu, která se vlivem elektrického pole začala pohybovat. Nedlouho poté André-Marie Ampère a Dominique-Francois Arago v Paříži nechali proudit drátem svinutým do cívky a ukázali, že se chová podobně jako magnet, čímž započali elektromagnetickou revoluci a Ampéremu se začalo říkat otec elektromagnetu. [57,58,59]

Opět nedlouho poté, konkrétně v roce 1821 Michael Faraday objevil magnetickou indukci a představil princip základního elektrického motoru. Kromě toho také objevil, jak je provázán magnetismus se světlem, což vedlo k jeho magnetooptickému Faradayovu efektu. Tento efekt popisuje chování polarizovaného světla pod vlivem magnetického pole ve vhodném prostředí. Rovina lineárně polarizovaného světla se pod vlivem magnetického pole stáčí. James Clerk Maxwell byl těmito objevy inspirován a v roce 1864 sestrojil sjednocenou teorii elektřiny, magnetismu a světla. Doposud však teorie stavěly magnetismus na stejnou úroveň jako elektřinu, což bylo uvedeno v omyl Albertem Einsteinem a jeho teorií relativity, která poukázala na původ magnetických sil a jejich závislost na silách elektrických. Nyní jsou magnety podstatnou součástí naší technologie. [57,58,59,60]

3.1 Princip

Vzhledem k tomu, že pomocí klasické fyziky nelze spolehlivě popsat magnetické chování látek, jako diamagnetismus a paramagnetismus, byl základní princip magnetismu popsán až s příchodem kvantové mechaniky. Pokud dochází k pohybu částic s elektrickým polem, tak v jejich okolí lze zaznamenat magnetické pole. V atomu jsou dvě částice, které mají náboj, protony a elektrony a jejich pohybem po dráze vzniká magnetické pole, a tím i dráhový magnetický moment těchto částic. Kromě pohybu po dráze se částice točí kolem své vlastní osy, čemuž se říká spin, a ten produkuje spinový magnetický moment. Je ale rozdíl mezi magnetickým momentem elektronu a protonu, jelikož elektron se pohybuje mnohem více

než proton, je jeho magnetický moment větší. Při vyhodnocení celkového magnetického momentu je třeba provést vektorový součin magnetických momentů všech nabitých částic, magnetický moment elektronů však bude tvořit většinový podíl. Jelikož všechny atomy mají proton i elektron, lze tedy říct, že každý materiál reaguje na magnetické pole. Podle reakce materiálu, která je vyvolána vystavením magnetickému poli, dělíme materiály na několik skupin. Tyto skupiny lze charakterizovat dvěma vlastnostmi, a to relativní permeabilitou μ_r a magnetickou susceptibilitou χ , kdy $\chi = \mu_r - 1$ [57,58,59]

3.2 Rozdělení materiálů dle reakce na magnetické pole

Jak již bylo zmíněno v minulé kapitole, každý materiál při vystavení magnetickému poli nějakým způsobem na toto pole reaguje, což je dáno celkovým magnetickým momentem atomu. V dalších podkapitolách jsou rozebrány jednotlivé skupiny materiálů. [57,58,59,61,62]

3.2.1 Diamagnetické materiály

Jsou to látky, jejichž výsledné magnetické momenty jsou nulové, tedy spiny a orbitální pohyby elektronů je naprosto v rovnováze, a u nichž při vystavení magnetickému poli se indukuje slabý magnetický moment, který působí proti magnetickému poli, tudíž vnější magnetické pole zeslabují. Do této skupiny patří především voda, dále všechny inertní plyny, jako třeba helium, neon a argon, organické sloučeniny a několik kovů, především měď, stříbro a zlato. Pokud bychom vystavili lehký materiál dostatečně silnému magnetu, došlo by k indukci magnetického pole opačného směru, který by mohl svou silou překonat i gravitační sílu, čímž by mohl tento lehký materiál levitovat. Tímto způsobem nechal tým z Univerzity Nijmegen v Nizozemsku levitovat žábu, díky magnetickému poli milionkrát silnějším, než je pole Země. U těchto látek je relativní permeabilita nižší než 1 a tím magnetická susceptibilita nižší než 0. Magnetické chování těchto látek není téměř ovlivněno teplotou nebo tlakem. [57,58,59,61,62,63,64,72]

3.2.2 Paramagnetické látky

U těchto látek jsou magnetické momenty orientované různými směry, a proto nejsou celkové magnetické momenty rovny nule. Důležitá vlastnost, díky které má materiál nenulový celkový magnetický moment, je počet elektronů, který musí být lichý. Avšak u sloučenin s těmito materiály paramagnetismus nemusí existovat, jelikož může dojít ke vzniku vazby mezi lichým elektronem a elektronem jiného atomu ve sloučenině, který má opačný směr

spinu, čímž se vyruší magnetické momenty. Po vložení takového materiálu do magnetického pole dojde k mírnému zesílení, jelikož se magnetické momenty atomů přizpůsobí směru vnějšího magnetického pole. Mezi tyto materiály patří mangan, chrom, platina, nebo hliník. Při působení vnějšího magnetického pole tyto materiály dokáží přitahovat kovové předměty, avšak po odstranění vnějšího magnetického pole se magnetické momenty vrátí do různých směrů, jelikož tyto materiály nelze trvale zmagnetovat. Paramagnetismus lze na rozdíl od diamagnetismu ovlivnit teplotou, a to tak, že se snižující se teplotou se efekt paramagnetismu zvyšuje. Relativní permeabilita je vyšší než 1, což díky rovnici z kapitoly 3.1 znamená, že magnetická susceptibilita musí být vyšší než 0. [57,58,59,61,62,63,64]

3.2.3 Feromagnetické látky

Obdobně jako u paramagnetických materiálů, je celkový magnetický moment nenulový, skládají se tedy z paramagnetických atomů, jejichž uspořádání je však takové, že výrazně zesilují magnetické pole. Za běžných teplot tuto reakci na vnější magnetické pole můžeme najít u železa, kobaltu, niklu a gadolinia. Už při působení slabého vnějšího magnetického pole dojde ke zesílení magnetického pole a zmagnetování látky. I při zániku externího magnetického pole zůstává magnetické pole ve feromagnetické látce. Tento jev je způsoben malými oblastmi v materiálu, kterým se říká domény, kde v těchto doménách je i bez působení magnetického pole stejný směr magnetických momentů. Působením vnějšího magnetického pole se tyto domény zvětšují a jakmile jsou všechny magnetické momenty souhlasné, dojde k zániku domén, látka je magneticky nasycena a získává vlastnosti magnetu. Tepelný pohyb při zahřátí na Curieovu teplotu by však způsobil rozpad domén na jednotlivé atomy, jejichž magnetický moment by nebyl souhlasný s jeho okolními atomy, čímž bychom ztratili také i feromagnetismus, látka by se tedy stala paramagnetická. [57,58,59,61,62,63,64]

3.3 Magnetoreologické elastomery

Magnetoreologické elastomery jsou velmi zajímavou skupinou materiálů, které se řadí do takzvaných chytrých materiálů. Tyto materiály se vyznačují zejména změnou vlastností při vystavení vnějším podnětům, v případě magnetoreologických elastomerů se konkrétně jedná o magnetické pole, jež při vystavení tomuto poli mění hlavně viskoelastické vlastnosti. Svým složením spadají do kategorie kompozitních materiálů, jelikož se skládají z polymerní matrice ze skupiny termoplastických elastomerů a magnetického aditiva, nejčastěji v podobě feromagnetického prášku. Volba vhodného kovového aditiva je stěžejní pro správně

fungující magnetoreologický systém, a proto je zde několik vlastností, které by takový materiál měl mít. Jedná se o vysokou permeabilitu, která zaručuje co nejvyšší magnetoreologický efekt, nízká zbytková magnetizace, jež je důležitá pro zabránění shlukování částic prášku po odstranění vnějšího magnetického pole, a vysoká magnetická saturace, která definuje horní hranici magnetizace materiálu. Nejčastěji se s ohledem na tyto podmínky volí karbonylové železo, které se dodatečně vyznačuje vynikající stabilitou. Kromě aditiva je důležitá také polymerní matrice, u které je podstatná hlavně tuhost a houževnatost, a intenzita působícího vnějšího magnetického pole. Kromě magnetoreologických elastomerů existují i magnetoreologické pěny a tekutiny. Magnetoreologické elastomery mohou mít dvě struktury, anizotropní a izotropní. Ke vzniku anizotropní struktury dojde, pokud při tuhnutí polymerní matrice s magnetickými částicemi působí na materiál magnetické pole, čímž vznikají řetězce ve sloupcovitých polohách. Tímto ovlivněním výrobního procesu můžeme dosáhnout zajímavých elektrických vlastností, jež jsou závislé na směru, ve kterém působilo magnetické pole, což umožňuje aplikaci takového materiálu v senzorech. Izotropní struktura vzniká bez působení magnetického pole, tudíž práškové aditivum je v polymerní matrici rozprostřeno homogenně. Vznik anizotropní struktury se však stává složitější při vyšší koncentraci práškového aditiva, kromě toho však dochází i k úbytku lineárních viskoelastických oblastí, což je jev, kterému se nazývá Paynův efekt. [65,66,67,68,69,70,71]

Tyto materiály lze například využít při výrobě vibračních absorbérů, izolátorů, silových senzorů anebo aktuátorů ventilů. Poměrně zajímavou vlastností karbonylového železa je schopnost absorpce mikrovln, což také umožňuje stínění citlivých zařízení. [66,67,68,71]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA KOMPOZITNÍHO FILAMENTU S MAGNETICKÝMI VLASTNOSTMI

Praktická část této práce, jak již bylo zmíněno v úvodu, je věnována výrobě kompozitního filamentu s magnetickými vlastnostmi pro FDM tiskárny. Tato část je také rozdělena do dvou hlavních kapitol, které se zabývají výrobou a charakterizací filamentu pro 3D tiskárny, avšak s rozdílem, že první kapitola popisuje filament, jejíž matrice je z termoplastického elastomeru, a v druhé kapitole z termoplastu. V prvním kroku byla zvolena matrice a vhodné aditivum. Následně z těchto materiálů byl připraven granulát, který bude použit na vytlačení filamentu. Po vytlačení filamentu byly popsány tiskové podmínky filamentu a vlastnosti samotného materiálu, ze kterého je filament připraven. V poslední řadě byla podle získaných dat týkajících se vlastností tiskového materiálu určena vhodná aplikace.

4.1 Filament z termoplastického elastomeru

V rámci této kapitoly je popisován postup výroby a následného zkoušení kompozitního filamentu pro FDM tiskárny, jehož matrice z termoplastického elastomeru byla doplněna o plnivo v podobě kovového prášku.

4.1.1 Výběr matrice a plniva

Materiál, jenž zastává funkci matrice, byl zvolen Vistamaxx 6202 od společnosti ExxonMobil. Tento termoplastický elastomer se podle materiálového listu skládá z opakujícího se izotaktického propylenu doplněného o etylén s náhodnou distribucí a vyrábí se pomocí metalocenového katalyzátoru. Materiál se vyznačuje velmi dobrou elasticitou a houževnatostí, dále má také velmi dobrou chemickou odolnost a odolává stárnutí. Také se velmi jednoduše zpracovává a je kompatibilní s různými plnivy. Zejména poslední dvě



Obrázek 14 Vistamaxx 6202

zmíněné vlastnosti byly stěžejní při volbě tohoto materiálu, jelikož umožňují snadnou výrobu kompozitního filamentu s vysokou koncentrací plniva.

Jako plnivo bylo vybráno karbonylové železo od společnosti BASF s označením CIP CN, jejichž medián průměru prášku se pohybuje mezi 6,5 až 8 μm . Katalog společnosti BASF rozděluje jejich práškové produkty do dvou kategorií, konkrétně tvrdé a měkké prášky, kdy měkké prášky, kam spadá i zvolený prášek CIP CN, se vyrábí žiháním tvrdých prášků s řízenou atmosférou z vodíku. Tento proces snižuje obsah uhlíku, dusíku a kyslíku, čímž se dosáhne vysoké čistoty prášku, kdy konkrétně železo tvoří až 99,8 % prášku. [83]



Obrázek 15 Prášek karbonylového železa [74]

Prášek karbonylového železa se kromě již zmíněné vysoké čistoty vyznačuje zejména schopností absorbovat mikrovlny a zajímavými magnetickými vlastnostmi. Z tohoto hlediska se jedná o materiál s vysokou permeabilitou, magnetickou saturací a nízkou zbytkovou magnetizací. Karbonylové železo se díky těmto vlastnostem používá zejména jako plnivo do magnetoreologických elastomerů. V rámci zpracování je CIP CN vhodný pro práškovou metalurgii (PM) a plastické vstřikování kovů (MIM). [83]

4.1.2 Výroba granulátu

V rámci této kapitoly je popsán způsob přípravy granulátu. V první řadě byly stanoveny koncentrace, které bylo nutné namíchat, konkrétně 50, 60, 70, 80, 90 hm.% prášku karbonylového železa. Koncentrace 50, 60, 70 hm.% se vyráběly na stroji Scientific Twin Screw Extruder ve větším množství, kdy pro tuto práci bylo z celkového množství odebráno pár stovek gramů z každé koncentrace a zbývající množství bylo využito v jiném projektu. Zbývající koncentrace, tedy 80 a 90 hm.%, byly připraveny v menším množství na hnětiči Brabender.



Obrázek 16 Scientific Twin Screw Extruder

Před samotnou přípravou bylo nutné stanovit navážku podle připravovaných koncentrací. Pro koncentrace připravované na Scientific Twin Screw Extruder se jednalo o přímočaré výpočty, u kterých se počítalo pouze s poměry obou složek, avšak u hnětiče Brabender je hnětací komůrka omezena objemem 50 cm³, tudíž bylo nutné počítat i s hustotami složek. V Tabulce 1 je zobrazena navážka pro první tři koncentrace, kdy bylo stanoveno, že se připraví 2 kg materiálu od každé koncentrace. Vzorový výpočet pro stanovení navážky koncentrace 60 hm. % v tomto případě byl:

$$m_{CIP} = \frac{M}{100} * hm\% = \frac{2}{100} * 60 = \mathbf{1,2\ kg}$$

Tabulka 1 Navážka pro koncentrace 50, 60, 70 hm. %

Hmotnost [kg]	Hm. %		
	50	60	70
CIP [kg]	1	1,2	1,4
Vistamaxx 6202 [kg]	1	0,8	0,6
Součet [kg]	2	2	2

Navážka pro koncentrace 80 a 90 hm. % je zobrazena v Tabulce 2, vzorový výpočet pro koncentraci 80 hm. %:

$$Obj\% = \frac{hm\% * \rho_{6202}}{hm\% * \rho_{6202} + (1 - hm\%) * \rho_{CIP}} = \frac{0,8 * 0,863}{0,8 * 0,863 + (1 - 0,8) * 7,59} = \mathbf{0,313}$$

$$V_{CIP} = Obj\% * Max.V = 0,313 * 50 = \mathbf{15,631 cm^3}$$

$$V_{6202} = (1 - Obj\%) * Max.V = (1 - 0,313) * 50 = \mathbf{34,369 cm^3}$$

$$m_{CIP} = V_{CIP} * \rho_{CIP} = 15,631 * 7,59 = \mathbf{118,641 g}$$

$$m_{6202} = V_{6202} * \rho_{6202} = 34,369 * 0,863 = \mathbf{29,660 g}$$

Tabulka 2 Navážka pro koncentrace 80 a 90 hm. %

Hm. % CIP [-]	0,8	0,9
Obj. % CIP [-]	0,313	0,506
V CIP [cm ³]	15,631	25,288
V Vistamaxx 6202 [cm ³]	34,369	24,712
m CIP [g]	118,641	191,937
m Vistamaxx 6202 [g]	29,660	21,326
M [g]	148,301	213,263
V [cm ³]	50	50
Max. V [cm ³]	50	50

Jak již bylo zmíněno, příprava prvních tří koncentrací byla provedena na stroji Scientific Twin Screw Extruder, kdy v první řadě se topné zóny vytopily na teploty uvedené na dalším tabulce. Během toho se připravila navážka všech tří koncentrací.

Tabulka 3 Teploty na zónách vytlačovacího stroje

Zóna	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Teplota [°C]	160	160	160	160	170	170	170	170	180	180	180	180

Jakmile se vytopily topné zóny, došlo k vložení Vistamaxx 6202 v podobě granulí a prášku karbonylového železa v množství stanoveném navážkou do vytlačovacího stroje. Otáčky šneku byly nastaveny během procesu míchání na 8,1 RPM. Po vytlačení byly struny vloženy do chladicí vany a následně do granulovacího zařízení, které strunu zpracovalo na granulát.



Obrázek 17 Hnětič Brabender

Při přípravě koncentrací 80 a 90 hm.% na hnětiči Brabender se v první řadě nastavily teploty zón, které lze vidět na další tabulce. a připravila navážka na laboratorních váhách. Jakmile byly zóny dostatečně vytopeny došlo k nastavení otáček hnětiče na 50 RPM a vložení naváženého granulátu a po chvíli i kovového prášku.

Tabulka 4 Teploty na hnětiči Brabender

Zóna	1.	2.	3.
Teplota [°C]	170	170	170



Obrázek 19 Navážka

Poté proběhl proces míchání po dobu 5 minut, během níž se připravila další navážka, a následně se vyjmula směs z komory hnětiče. Vzhledem k omezenému množství materiálu, které lze získat z hnětiče při jednom míchání, se obě koncentrace míchali dvakrát, aby se



Obrázek 18 Drtič

získalo dostatečné množství pro vytlačení a zkoušení filamentu. Získaný materiál, jenž se po vyjmutí z hnětiče ochladil, byl vložen do drtiče.



Obrázek 20 Nadrcený materiál

Po drcení jsme získali materiál vhodný pro vložení do násypky vytlačovacího stroje.

4.1.3 Výroba filamentu

Nyní, když byl získán materiál vhodný pro vytlačování filamentu pro všechny koncentrace, je možné přejít k procesu vytlačování filamentu. Před samotným vytlačováním byl granulát vysušen při 50 °C po dobu 6 hodin. Vytlačování všech koncentrací probíhalo na jednom zařízení, a to 3devo Composer 450.



Obrázek 21 Vytlačovací stroj na filament 3devo Composer 450 [75]

Procesní podmínky zůstali napříč všemi koncentracemi prakticky nepozměněné a jsou zobrazeny v Tabulce 5.

Tabulka 5 Procesní podmínky vytlačování filamentu

Zóna	1.	2.	3.	4.
Teplota [°C]	150	175	180	185
Otáčky [RPM]	5,5			

Vytlačovaný materiál je ihned po opuštění trysky chlazen dvěma ventilátory a následně prochází měřením průměru, které ovlivňuje rychlost odtahu. Pokud je tedy například průměr filamentu moc velký, dojde ke zrychlení odtahu, čímž dojde ke zmenšení průměru filamentu. Po měření průměru je filament naváděn a navíjen na cívku. Takto se nám podařilo získat filameny všech koncentrací, jejichž průměry se pohybují v rozmezí $1,75 \pm 0,1$ mm. Na Obrázku 22 lze vidět průběh průměru jednoho z filamentů, kdy kromě počátečního náběhu a pár míst se průměr filamentu pohybuje v zmíněném rozmezí.



Obrázek 22 Průběh průměru filamentu

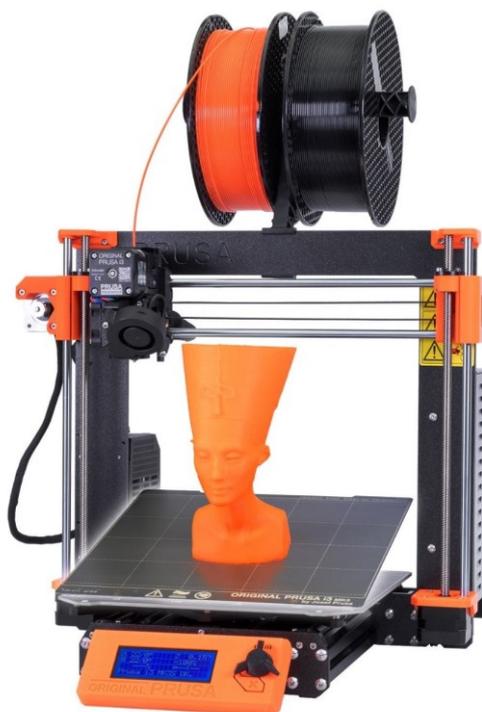
Některé z vytlačených filamentů lze vidět na Obrázku 23, konkrétně filament o koncentraci 80 a 90 hm.%.



Obrázek 23 Vytlačené filamenty o koncentraci 80 (vlevo) a 90 (vpravo) hm.%

4.1.4 Tisk

Filamenty, jejichž postup výroby byl rozebrán v minulé kapitole, byly dále zkoušeny přímo na FDM tiskárně, konkrétně Prusa i3 MK3S, aby se daly určit tiskové podmínky materiálu.



Obrázek 24 Prusa i3 MK3S [76]

Vzhledem k tomu, že teplotní podmínky se při vytlačování různých koncentrací měnili velmi málo, byla teplota trysky nastavena pro všechny koncentrace na stejnou hodnotu, a to 195 °C. Teplota podložky byla nastavena na 50 °C. Jako první se na tisk testovala koncentrace 50 hm.%, avšak již během vkládání filamentu do hlavy extruderu se vyskytly dva problémy týkající se elastické povahy materiálu. Při vložení filamentu do hlavy extruderu projde filament přes dvě ozubená kolečka, kdy jedno z nich je poháněno krokovým motorem. Tyto kolečka posouvají filament dál do extruderu směrem ke trysce, kde se materiál taví. První problém se týkal toho, že za ozubenými kolečky by měl filament vejít do PTFE trubičky, avšak mezi kolečky a trubičkou je poměrně malý prostor, který je však dostačující pro to, aby se elastický filament zkroutil a tím i nevešel do PTFE trubičky a dále k trysce, což vedlo k rozebrání a vyčištění extruderu.



Obrázek 25 Ucpáný extruder

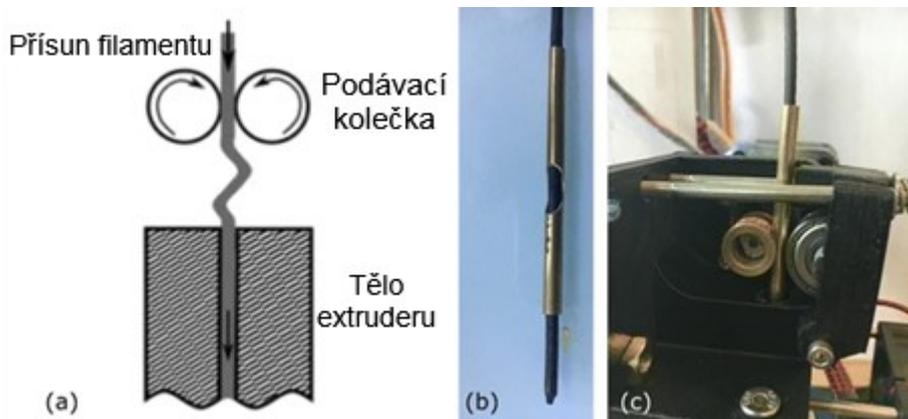
Kromě toho se také stalo, že filament se namotal na ozubená kolečka, což poté také vedlo k rozebrání extruderu, avšak toto bylo možné vyřešit rozšířením mezery mezi kolečky. Jakmile se podařilo vyřešit první problém, tedy navést filament do PTFE trubičky, nastal druhý problém, jenž se týká vzpříčení filamentu. Extruder FDM tiskárny lze přirovnat k pístovému vytlačovacímu stroji, kdy filament, ještě než je roztaven, zastává roli pístu, jelikož tím, že vstupuje do komory, kde se nachází roztavený polymer, působí tlakem na taveninu a nutí ji opustit extruder tryskou a zároveň sám se taví, čímž se proces opakuje. Elastický filament se tedy nyní podařilo dostat až do extruderu, kde se začal tavit, avšak při fázi, kdy by měl filament začít tláčit na taveninu, aby došlo k vytlačení skrz trysku, se filament vzpříčí ve zmíněném malém prostoru mezi ozubenými kolečky a PTFE trubičkou, což vede k ucpání extruderu. První a druhý problém se vyskytoval zejména u prvních dvou

koncentrací, tedy 50 a 60 hm.%, u dalších koncentrací se v případě prvního problému jednalo o ojedinělé záležitosti, zejména při méně rovném začátku filamentu.



Obrázek 26 Filament po vytažení z extruderu

Druhý problém se vyskytoval napříč všemi koncentracemi, avšak se zvyšující koncentrací se jeho výskyt snížil. Nejnižší relativně tisknutelnou koncentrací je tedy 70 hm.%, avšak za cenu velmi nízké rychlosti, díky které se četnost tohoto problému snížila, avšak stále nebyl tento problém kompletně eliminován. O tisknutelné koncentraci lze mluvit až v souvislosti s koncentrací 90 hm.%, avšak zde také dochází ke vzpříčení filamentu v extruderu, i když v mnohem menším množství, což stále dokáže narušit delší tisky. Řešením prvního i druhého



Obrázek 27 Kovová vložka pro zabránění vzpříčení filamentu [77]

problému by mohla být konstrukční úprava trysky, která by více zmenšila mezeru mezi

ozubenými kolečky a PTFE trubičkou. Alternativním řešením by mohla být speciální kovová vložka, která zabrání vzpříčení filamentu.

Obě možné řešení však vyžadují zásah do konstrukce extruderu, což je z hlediska návrhu časově náročné a samo o sobě vhodné jako téma pro samostatnou práci. Vzhledem k těmto problémům se spolehlivostí tisku, byl pro tisk zkušebních těles nutných pro charakterizaci materiálu tedy zvolen tisk z granulátu, a to na tiskárně od společnosti Everplast, kdy možnost tisku na tomto stroji byla poskytnuta Plastikářským klastrem.



Obrázek 28 Tiskárna Everplast

Jedná se o jeden z prvních modelů, které tisknou nikoliv z filamentu ale z granulí, tudíž se jedná o relativně starší zařízení. Tiskárna je typu BedSlinger a vyhřívání lze nastavit na 3 zónách a podložce. Tiskárna se ovládá dotykový panel, ve kterém lze nastavit zmíněné

vyhřívání, posun v různých osách, rychlost otáček šneku, chlazení dvěma ventilátory. Ve druhém panelu lze také kontrolovat zatížení šneku a v posledním panelu lze vyvolat záznam s poruchami. Do stroje lze vložit pouze jeden G-KÓD z USB flash disku, který musí být pojmenován ABC001.gco, stroji totiž chybí menu pro volbu tiskového modelu, což poukazuje na fakt, že stroj je pravděpodobně prototyp. Pro slicování modelů bylo nutné využít programu Slic3r, kde se poté nastavovali důležité parametry, jako teplota trysky, rychlost ventilátorů, extrúzní násobič, tloušťka extruze, atd. Zejména u prvních výtisků na této tiskárně byla viditelná podextruze (Obrázek 29). Nakonec se po kontrole dráh G-KÓDU podařilo však podařilo zjistit příčinu a to již zmíněné nastavení tloušťky extruze, které se pozměnilo z původních 100 % na 210 % pro první vrstvu a 205 % pro zbývající vrstvy.



Obrázek 29 Podextruze

Dalším nastavením, které bylo nutné upravit, hlavně u koncentrací 80 a 90 hm.% byl extrúzní násobič, a to kvůli nestejně velké velikosti granulí, které byly zpracovány v drtičce. Původního nastavení, konkrétně 1,0, bylo po zkoušení pozměněno na 1,35. Tisk zkušebních těles probíhal s tryskou 0,6 mm, což je obecně doporučovaný průměr trysky pro tisk plněných materiálů.



Obrázek 31 Vytištěné zkušební těleso pro tahovou zkoušku

Tisk všech zkušebních těles probíhal tak, že se model, který byl připraven v programu Autodesk Fusion, vložil do Slic3ru, kde se nastavili potřebné parametry a nechal se vygenerovat G-KÓD, který byl následně vložen na USB Flash disk a ten poté do tiskárny. Před samotným spuštěním tisku bylo nutné nastavit teploty zón a podložky a nechat je



Obrázek 30 Tiskové teploty

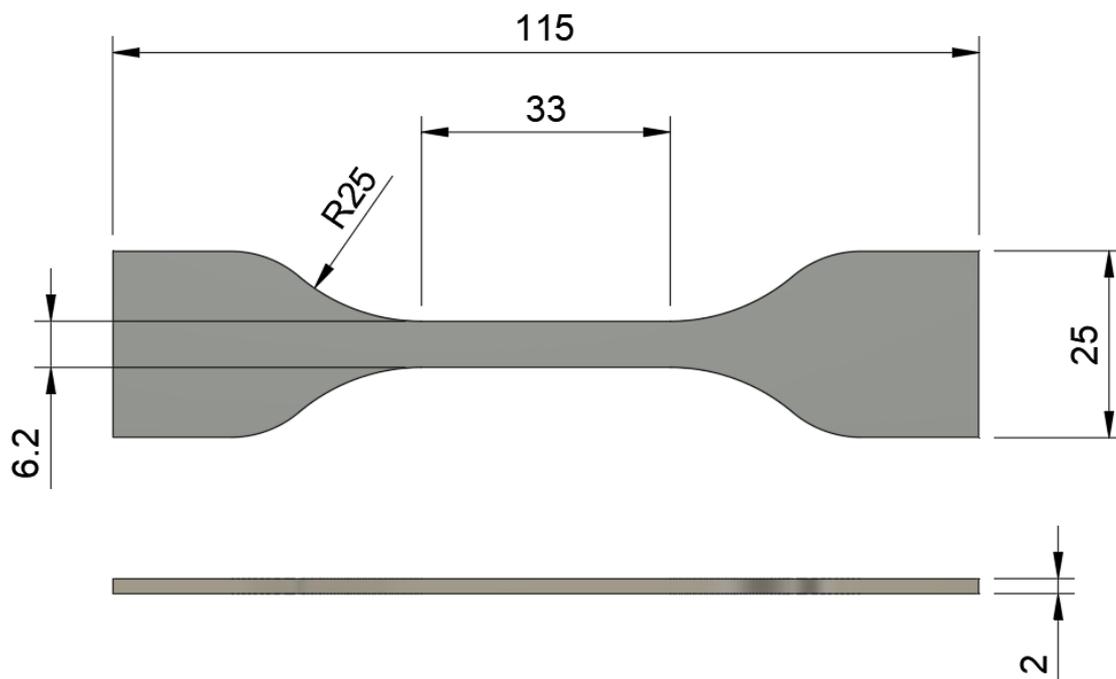
vytopit vytlačovací hlavu. Teploty tiskárny, které lze také vidět na Obrázku 31, byly nastaveny následovně: na první zóně 185 °C, na druhé zóně 187 °C a na poslední třetí zóně 205 °C. Jak lze vidět na Obrázku 31, tak teplota podložky je nastavená na 20 °C, avšak reálná a také zamýšlená teplota je 48 °C, což je tím, že podložka tiskárny v době tisku přetápěla

kvůli vadnému čidlu. Z tohoto důvodu bylo nutné kompenzovat toto přetápění, a to tím, že se sníží teplota přibližně o 30 °C, aby se dosáhlo požadované teploty podložky. Kromě toho lze z Obrázku 31 vidět, že teplota na druhé zóně je nastavená na 187 °C, avšak reálná je 199 °C, což je pouze způsobeno tím, že před tiskem se vytlačel odlišný materiál s vyšší teplotou tavení a teplota zóny se nestihla schladit na požadovanou teplotu.

Jakmile byly dosaženy požadované teploty, spustilo se otáčení šneku na 6 RPM aby se vytlačil jiný materiál, který mohl zůstat ve vytlačovacím stroji. Tento krok je nutné provést pouze, pokud chceme vyměnit tiskový materiál. Po vytlačení nežádoucího materiálu se vypne otáčení šneku a může se spustit tisk. Ukončení tisku je doprovázeno hlasitým zvukovým signálem, po kterém lze opatrně odebrat výtisk z tiskové podložky.

4.1.5 Tahová zkouška

Pro tahovou zkoušku byl připraven model zkušebního tělesa podle normy ČSN ISO 37, jehož rozměry lze vidět na Obrázku 32. Tisk probíhal na již zmíněné tiskárně Everplast a



Obrázek 32 Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [mm]

pro každou koncentraci a čistý Vistamaxx 6202 bylo vytištěno 5 kusů zkušebních těles, kdy každé mělo nastavenou výplň na 100 %. Výsledky tahových zkoušek lze najít v nadcházejících kapitolách, kdy každá z nich se bude věnovat jedné koncentraci. Celkovému vyhodnocení tahových zkoušek je poté věnována samostatná kapitola. Tahové

zkoušky probíhaly na zařízení Testometric MT350-5CT bez extenzometru a použitá zátěžová buňka byla 500 kg.



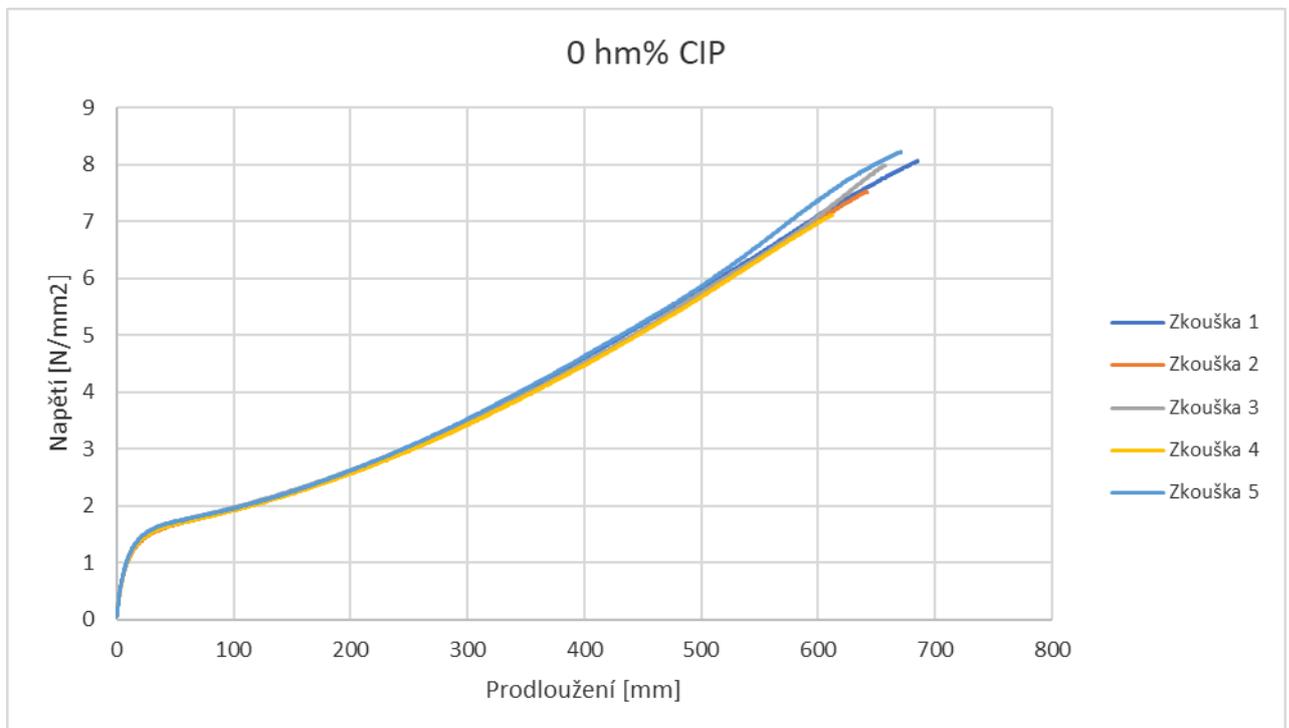
Obrázek 33 Testometric MT350-5CT

4.1.5.1 Tahová zkouška – Vistamaxx 6202

Vytištěné zkušební tělesa lze vidět na Obrázku 33. Výsledky tahové zkoušky pak na dalším grafu.



Obrázek 34 Zkušební tělesa tahové zkoušky – čistý Vistamaxx 6202

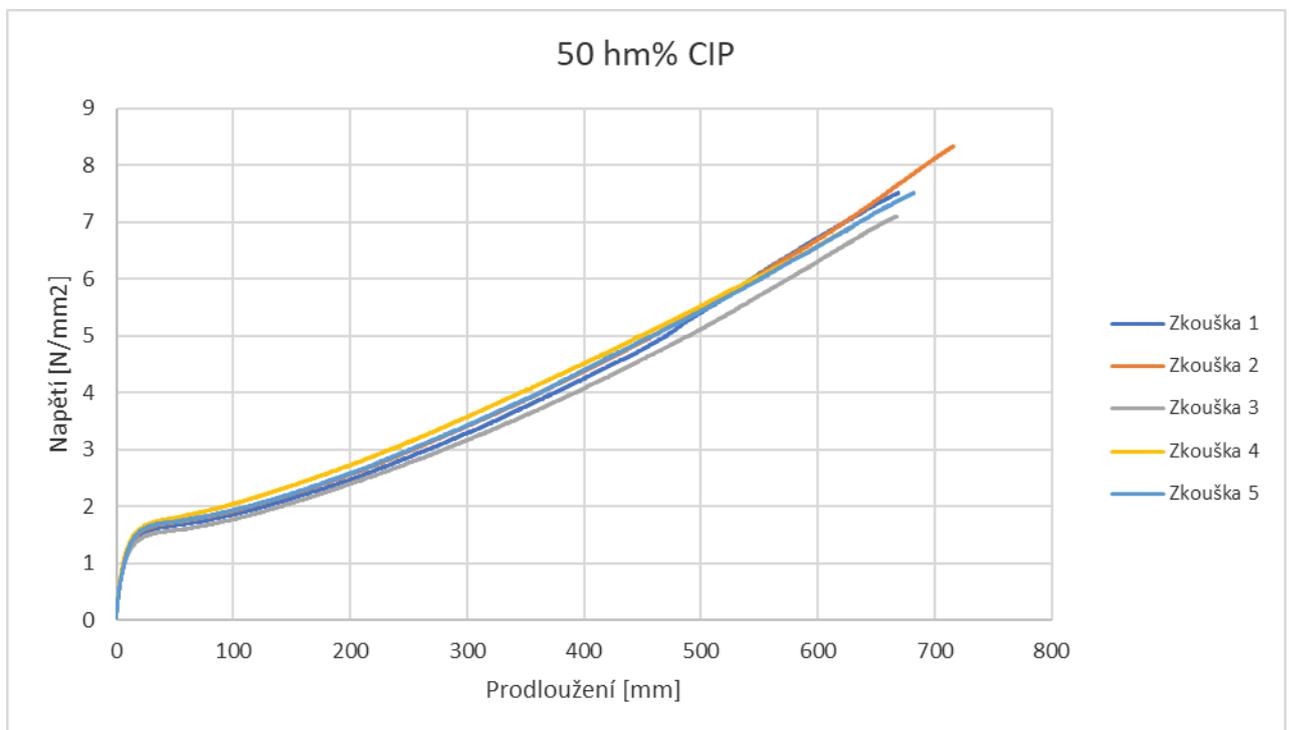


Obrázek 35 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro čistý Vistamaxx 6202

4.1.5.2 Tahová zkouška – 50 hm.% CIP



Obrázek 36 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 50 hm.% CIP

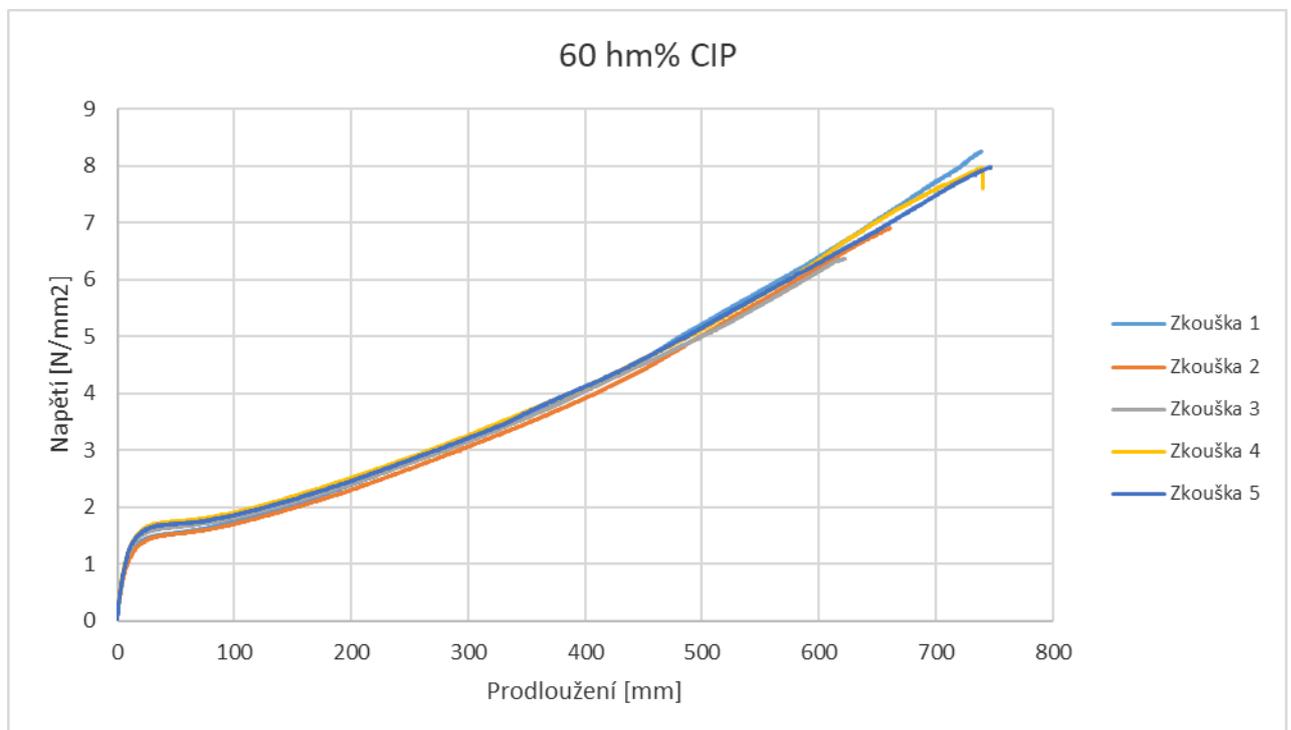


Obrázek 37 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 50 hm.% CIP

4.1.5.3 Tahová zkouška – 60 hm.% CIP



Obrázek 38 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 60 hm.% CIP

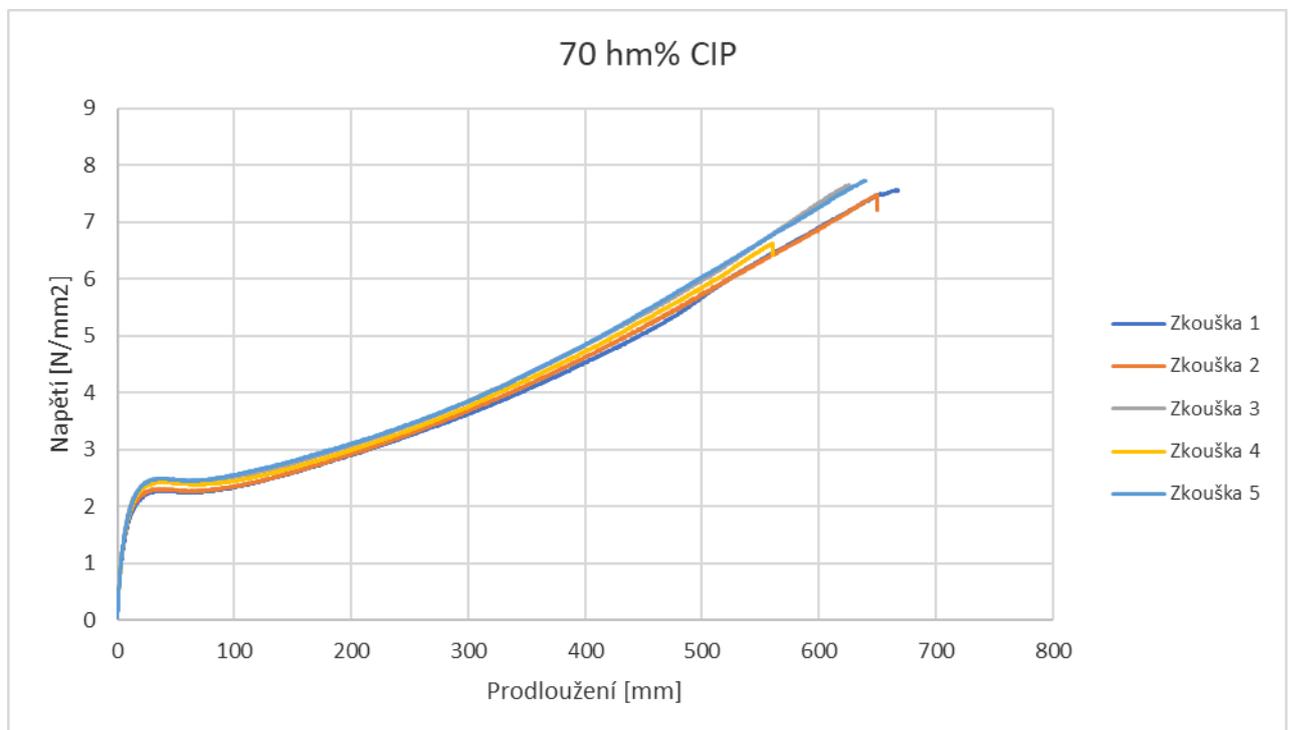


Obrázek 39 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 60 hm.% CIP

4.1.5.4 Tahová zkouška – 70 hm.% CIP



Obrázek 40 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 70 hm.% CIP

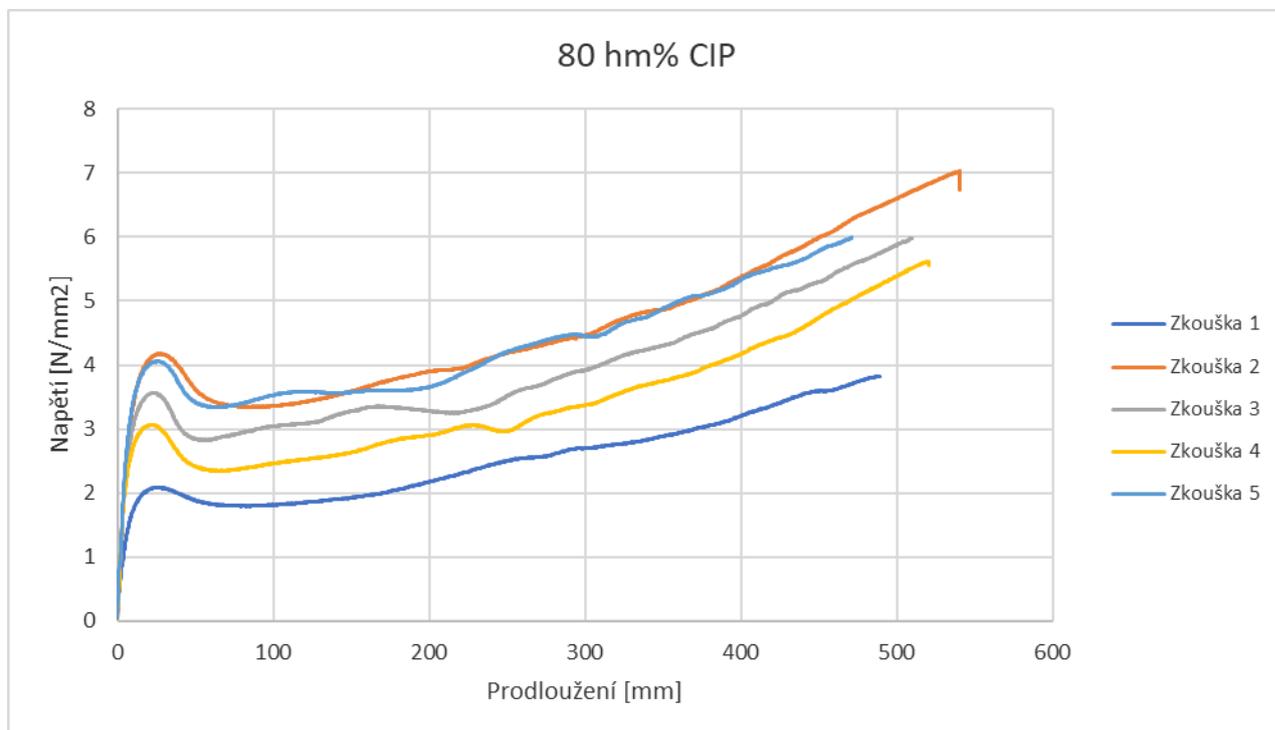


Obrázek 41 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 70 hm.% CIP

4.1.5.5 Tahová zkouška – 80 hm.% CIP

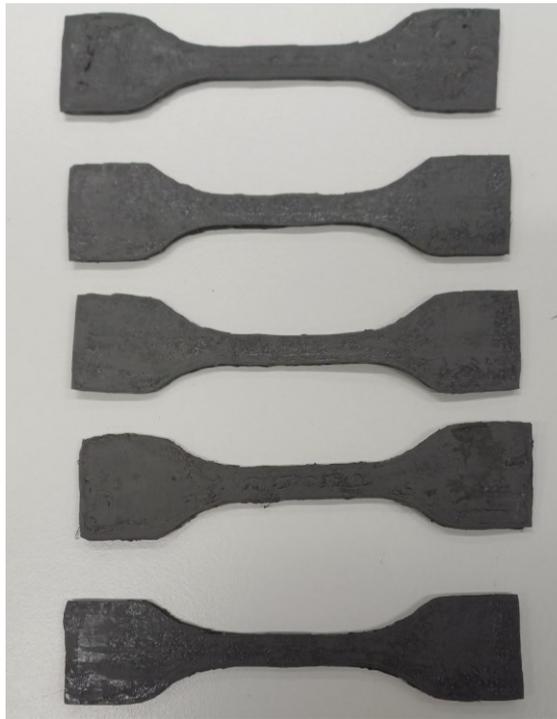


Obrázek 42 Zkušební tělesa tahové zkoušky
– 80 hm.% CIP

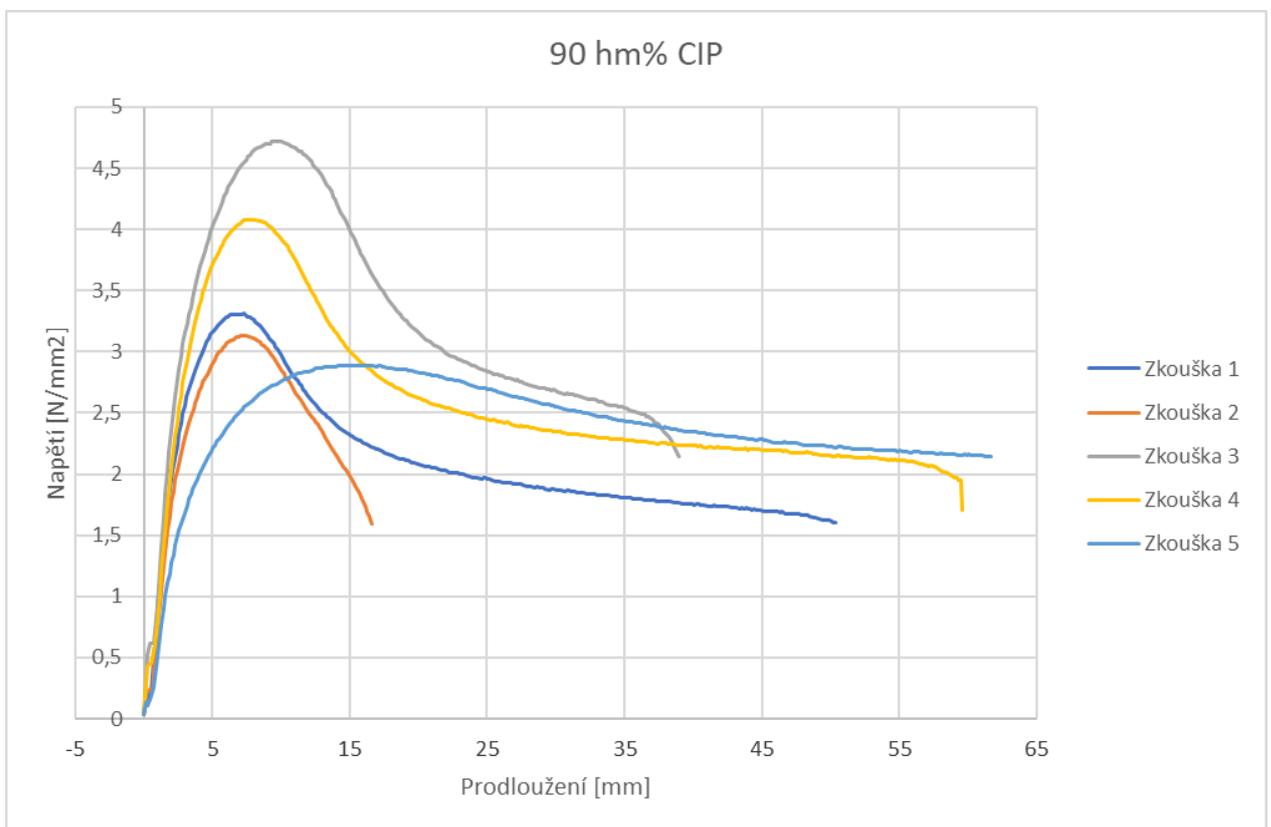


Obrázek 43 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 80 hm.% CIP

4.1.5.6 Tahová zkouška – 90 hm.% CIP



Obrázek 44 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 90 hm.% CIP



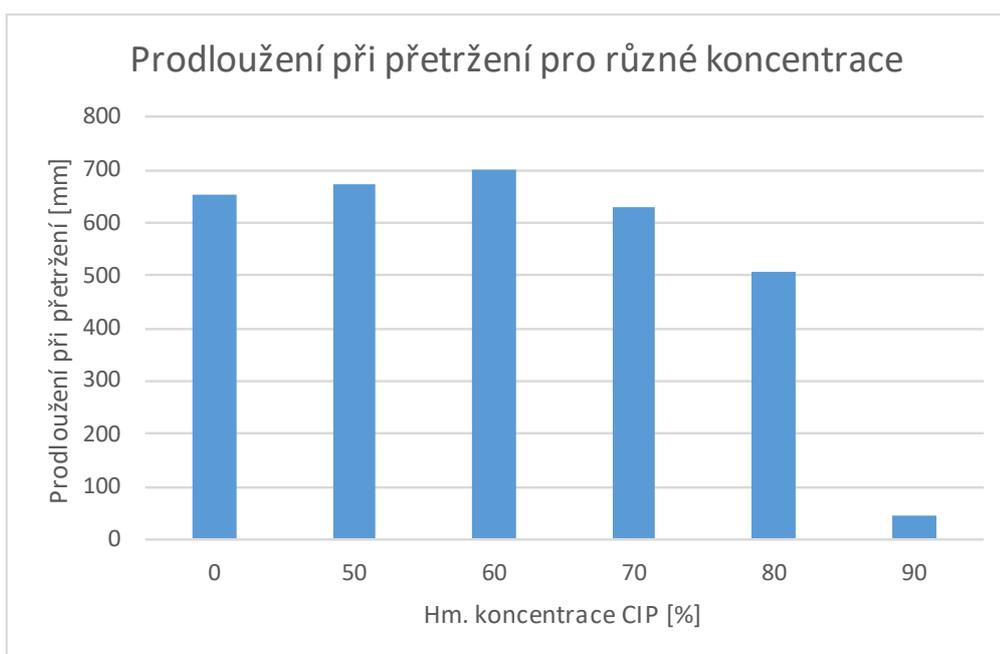
Obrázek 45 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 90 hm.% CIP

4.1.5.7 Vyhodnocení tahových zkoušek

Pro lepší představu byly výsledky zpracovány do následující tabulky a grafu, které zobrazují závislost prodloužení při přetržení se zvyšující koncentrací CIP.

Tabulka 6 Změna prodloužení při přetržení v závislosti na koncentraci CIP

Prodloužení při přetržení [mm]						
Konc. [hm% CIP]	0	50	60	70	80	90
1	685,151	668,469	738,743	667,812	488,951	50,372
2	641,406	715,648	660,491	649,86	540,331	16,567
3	657,122	667,787	622,679	625,711	509,972	38,921
4	612,028	629,651	740,181	561,076	520,882	59,626
5	671,095	682,168	746,62	640,286	471,184	61,6456
Průměr	653,36	672,74	701,74	628,95	506,26	45,43

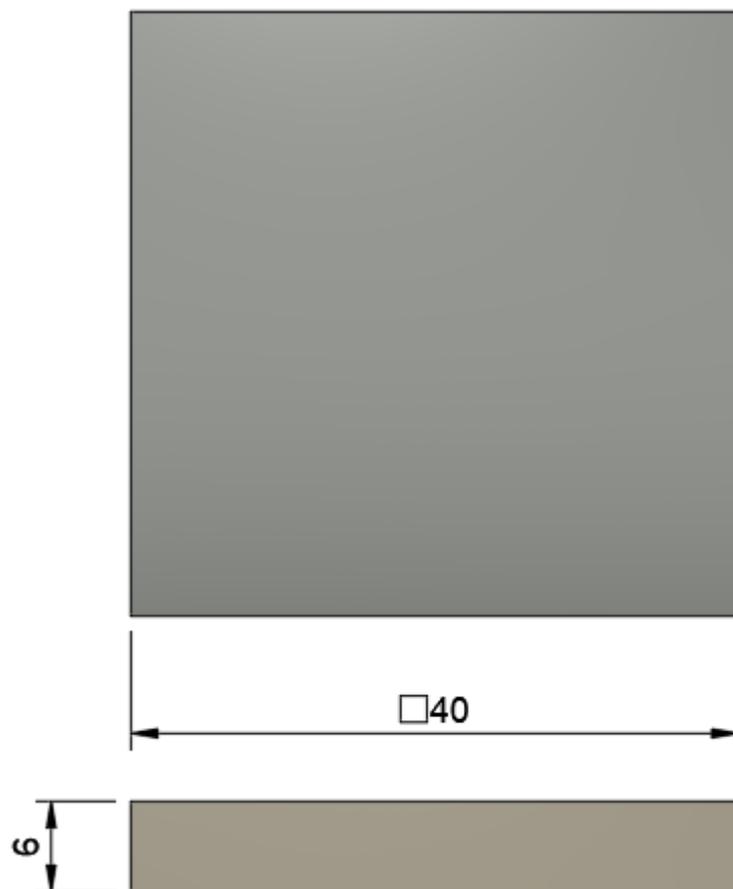


Obrázek 46 Závislost prodloužení při přetržení na rostoucí koncentraci CIP

Z Tabulky 6 a Obrázku 46 lze vidět, že zpočátku se zvětšuje prodloužení při přetržení, avšak při koncentraci 70 a 80 hm.% CIP již dojde ke zhoršení vlastností, po kterém následuje prudký pokles tažnosti materiálu při 90 hm.% CIP. Tyto výsledky tedy odpovídají teorii, a to tak, že při přidání práškového plniva dojde ke zlepšení mechanických vlastností materiálu, avšak při překročení určité koncentrace dojde ke značnému zhoršení mechanických vlastností.

4.1.6 Zkouška tvrdosti Shore A

Další zkouškou, jež byla provedena je zkouška tvrdosti Shore A. Opět byly vytištěny zkušební tělesa, a to podle normy ČSN ISO 48-4. Tato norma nedefinuje přesné rozměry zkoušeného tělesa, ale popisuje minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky, která je podle normy 6 mm, a minimální vzdálenost mezi vtiskem a okrajem, jež norma definuje jako 12 mm. Kromě těchto dvou podmínek norma také definuje minimální tloušťku vzorku, která je 6 mm. Podle těchto podmínek byl připraven model zkušebního tělesa o rozměrech, jenž jsou uvedeny na dalším obrázku.



Obrázek 47 Rozměry zkušebního tělesa

Zkouška tvrdosti probíhala na tvrdoměru od společnosti Polymertest. V první řadě se zapnul přístroj a otevřel přívod vzduchu, poté se vložil pod hlavičku tvrdoměru zkoušený vzorek a stiskne se tlačítko pro zvednutí stolu nahoru. Následně se začne odpočítávat 15 vteřin po jejichž uplynutí lze odečíst z pozice ručičky na hlavičce tvrdoměru tvrdost. Tento proces se následně zopakuje ještě 4krát, abychom získali potřebných 5 měření, ze kterých poté získáme medián, který lze porovnávat v rámci dalších měřených koncentrací.



Obrázek 49 Zkušební těleso pro zkoušku tvrdosti

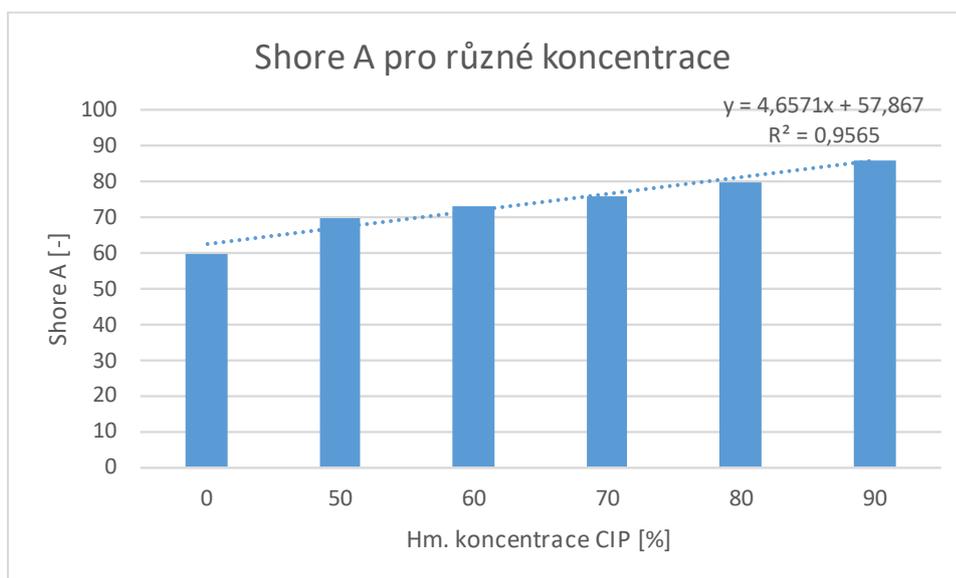


Obrázek 48 Tvrdoměr Polymertest

Výsledky zkoušky tvrdosti jsou zobrazeny v Tabulce 7 a Obrázku 49.

Tabulka 7 Výsledky zkoušky tvrdosti Shore A

Shore A						
Č. měř.	Koncentrace CIP [%]					
	0	50	60	70	80	90
1	62	71	74	74	80	86
2	62	68	73	76	81	83
3	60	70	72	76	82	86
4	59	68	74	78	80	87
5	59	71	72	77	77	88
Medián	60	70	73	76	80	86



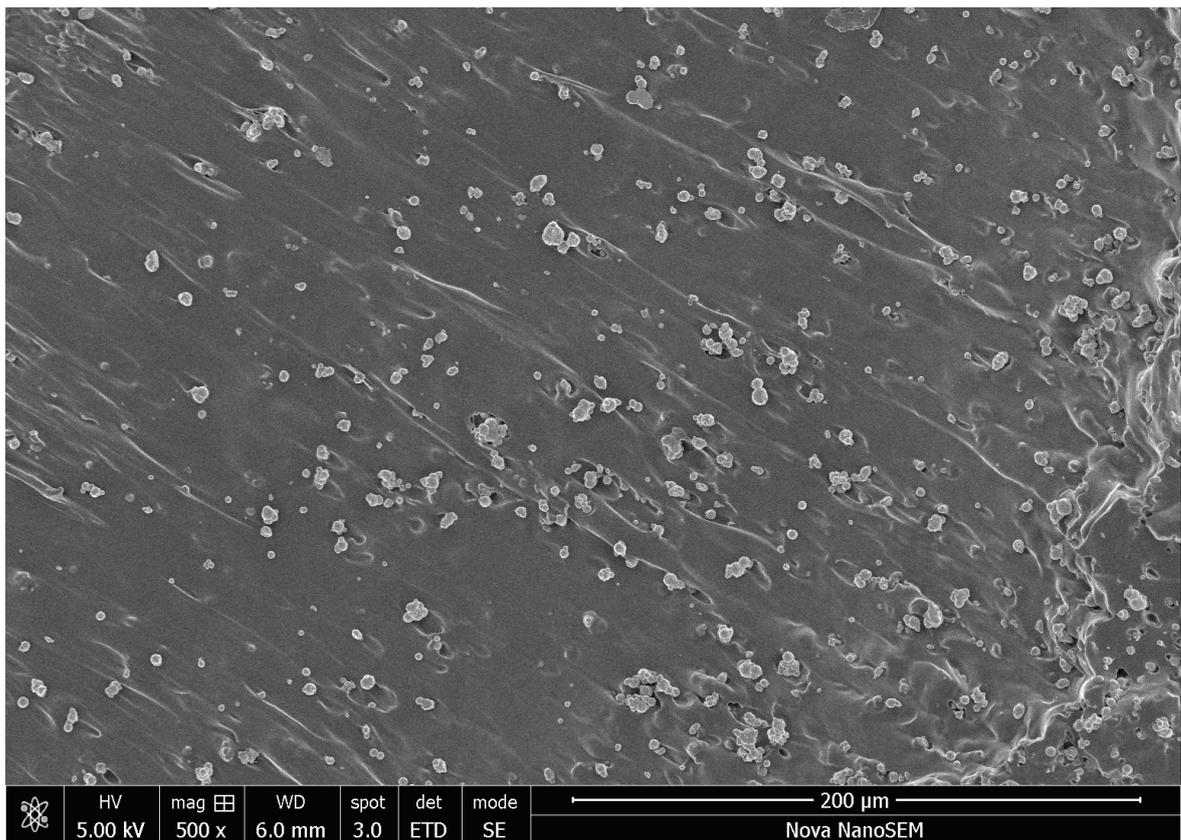
Obrázek 50 Graf závislosti tvrdosti Shore A na koncentraci CIP

Z výsledků lze vidět, že čistý Vistamaxx 6202 má tvrdost 60 Shore A a se zvyšující koncentrací kovového prášku se tvrdost zvyšuje. Z Tabulky 7 lze vyčíst, že koncentrace 50hm.% má tvrdost **70 Shore A**, 60 hm.% **73 Shore A**, 76 hm.% **80 Shore A**, 80 hm.% **80 Shore A** a koncentrace 90 hm.% s nejvyšší tvrdostí až **86 Shore A**. Grafické znázornění tohoto růstu je na Obrázku 49, kde si lze všimnout lineární závislosti tvrdosti na rostoucí koncentraci karbonylového železa.

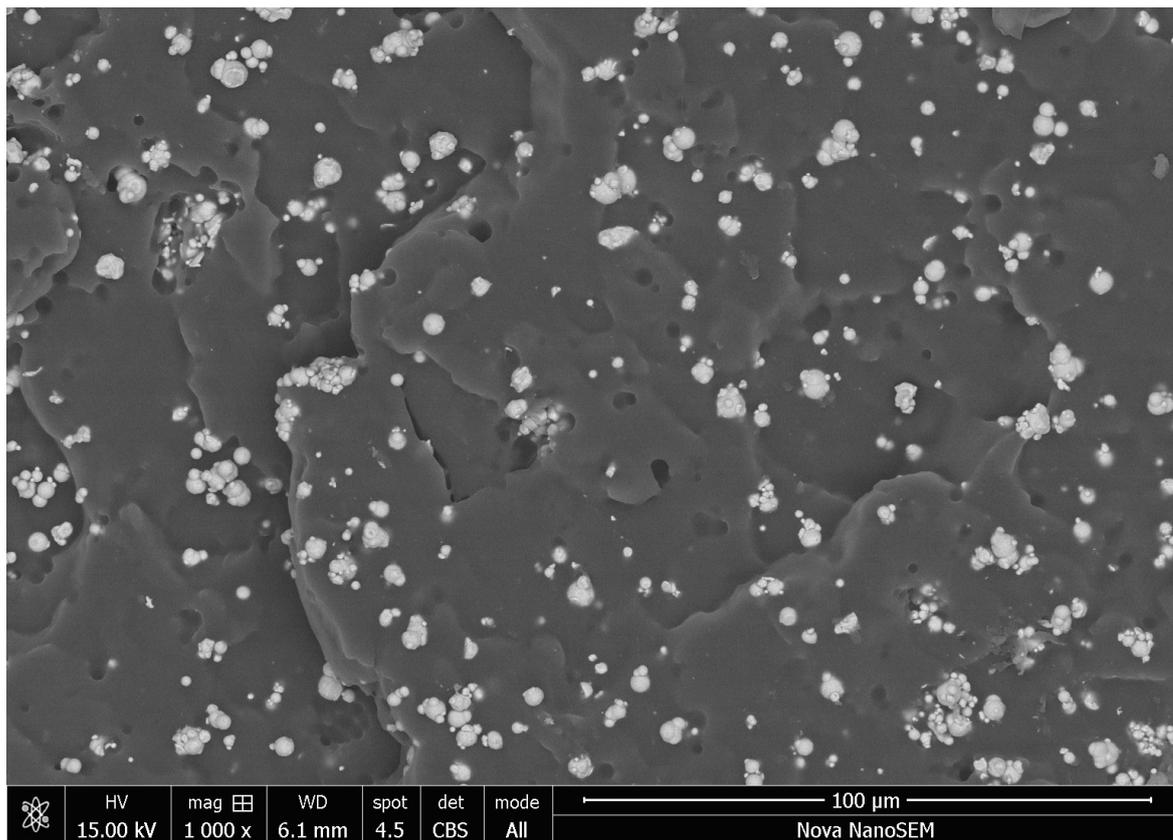
4.1.7 SEM

Dále byly pro každou koncentraci vytvořeny snímky pomocí skenovacího elektronového mikroskopu, které umožňují pohled na strukturu materiálu. Z těchto snímků jde velmi dobře vidět, jak se s rostoucí koncentrací zvyšuje množství kovového prášku v polymerní matrici. Snímky byly pořízeny konkrétně na přístroji FEI Nova NanoSEM 450.

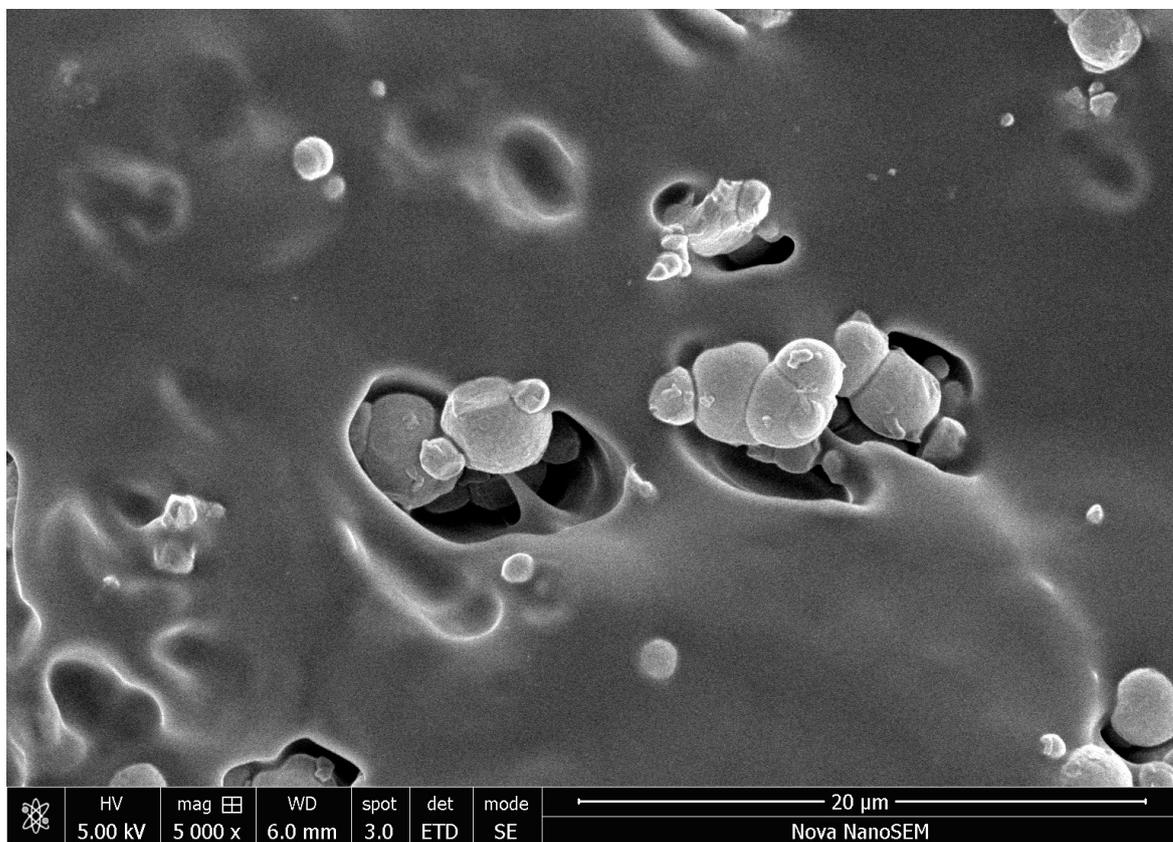
4.1.7.1 Mikroskopie SEM - 50 hm.% CIP



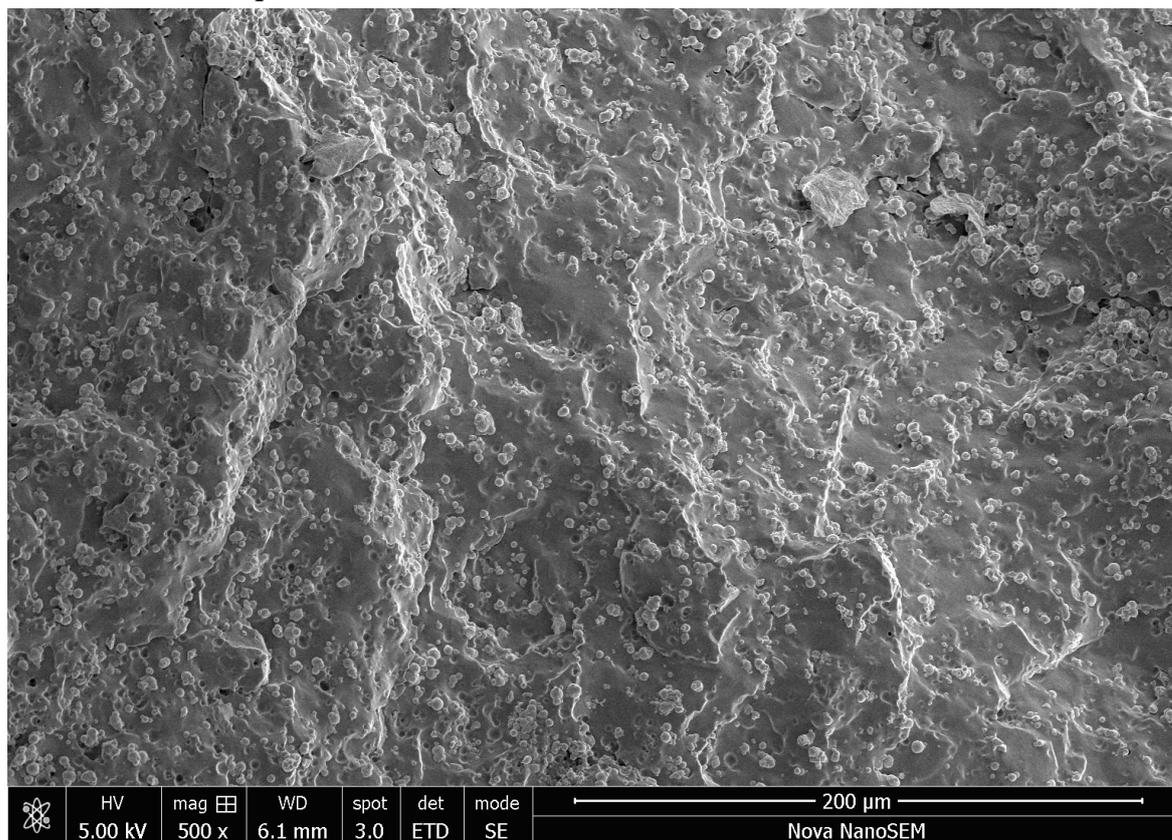
Obrázek 51 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (200 μm)



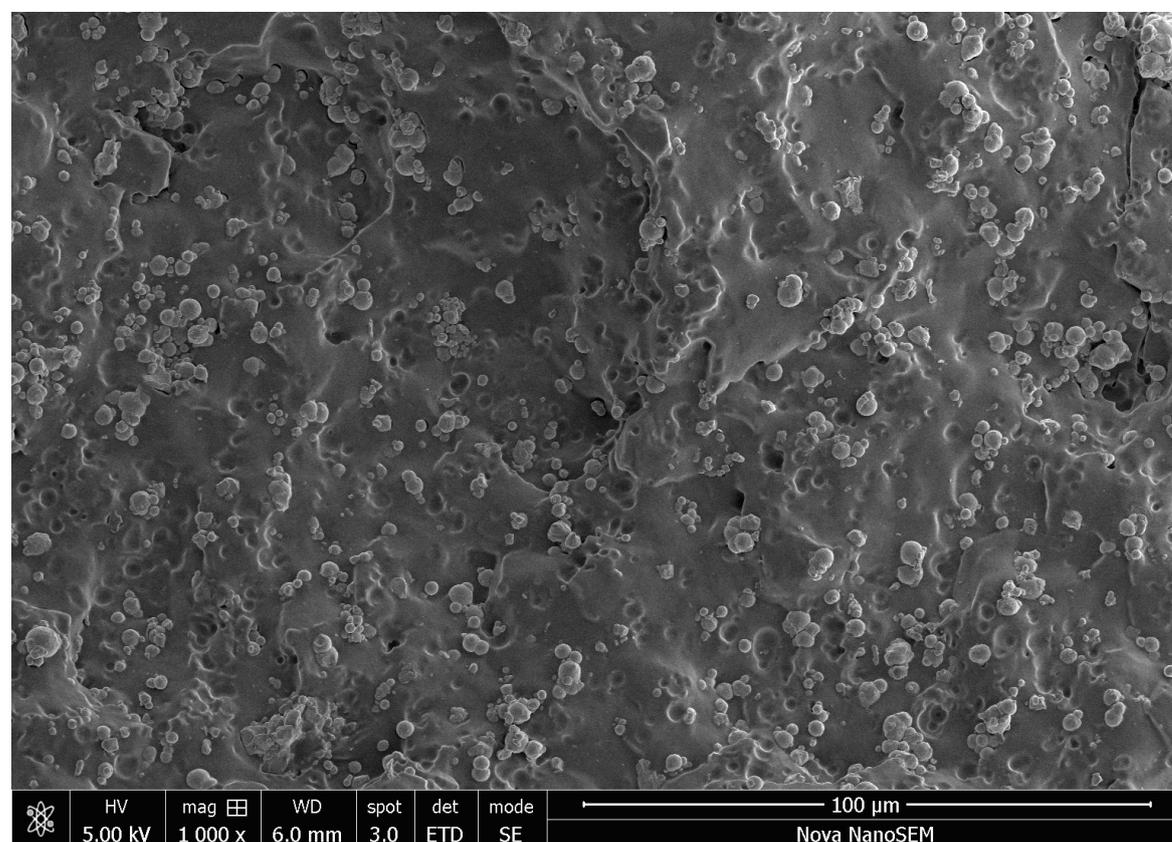
Obrázek 52 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (20 μm)



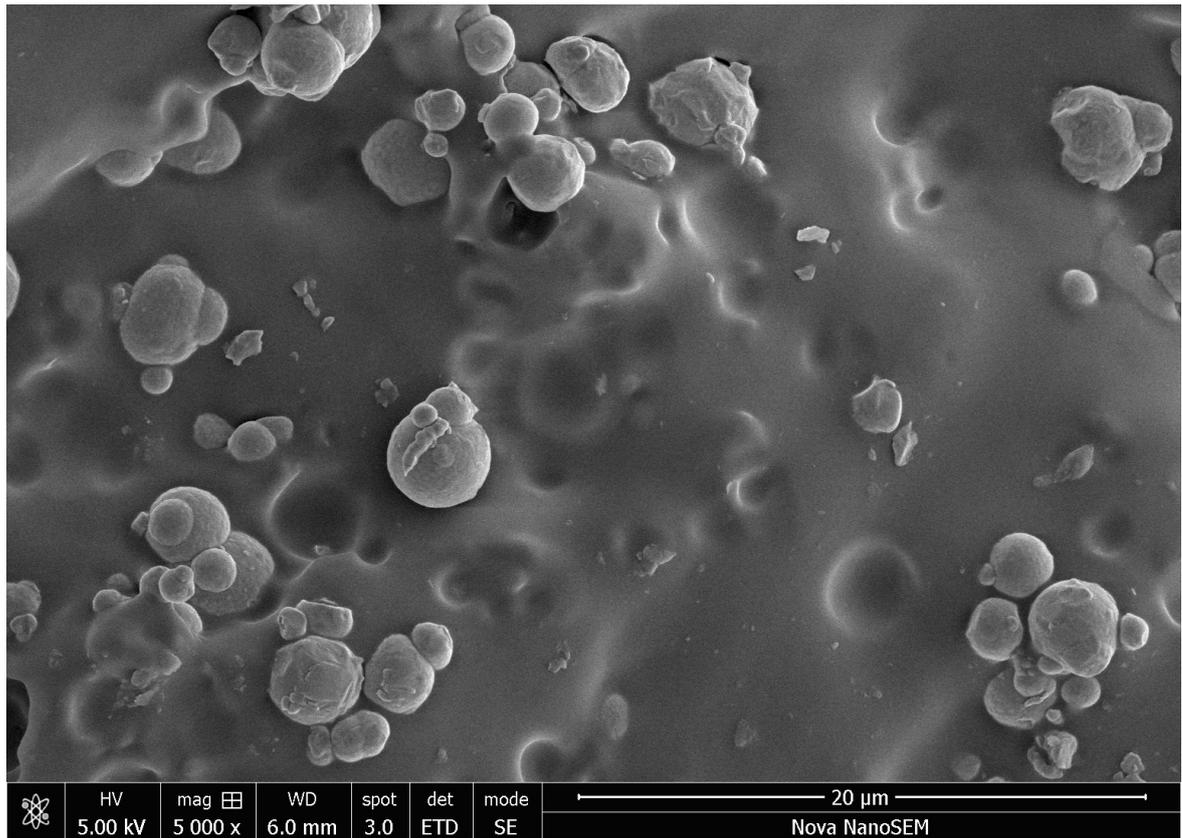
Obrázek 53 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (100 μm)

4.1.7.2 Mikroskopie SEM - 60 hm.% CIP

Obrázek 54 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (200 μm)

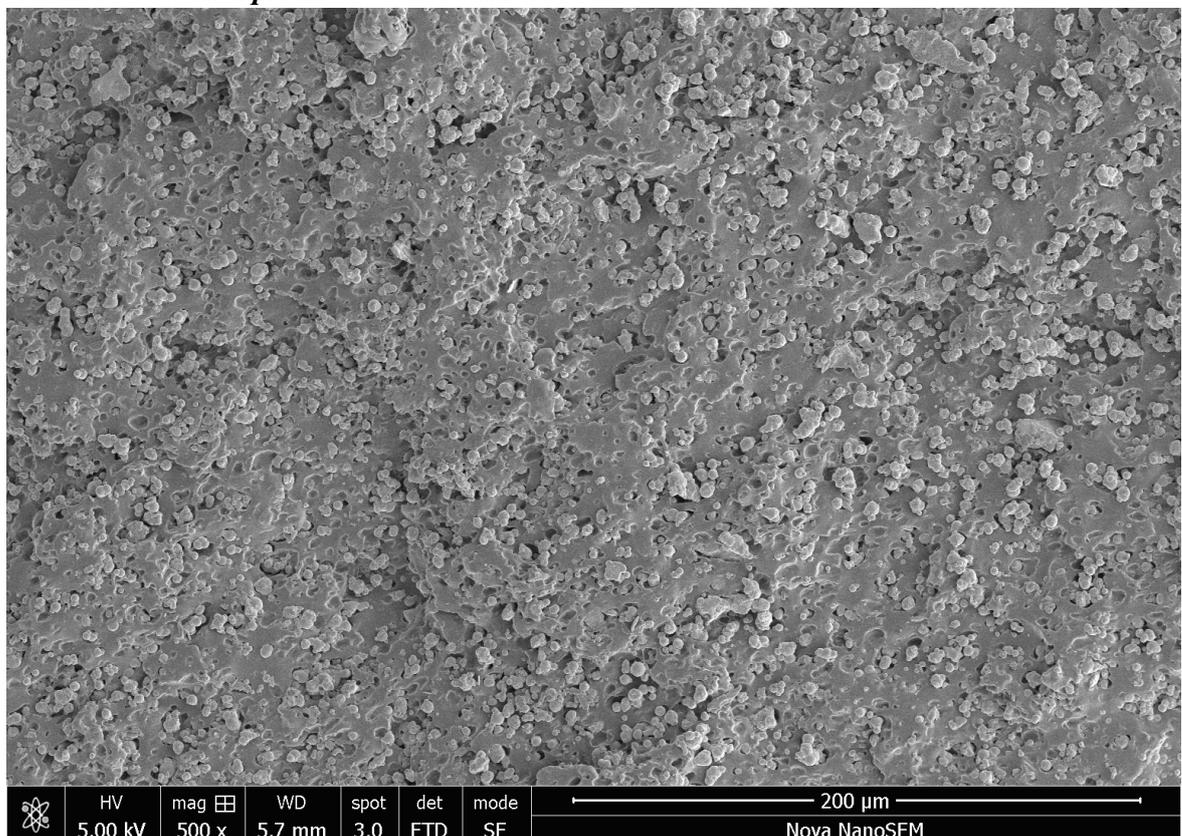


Obrázek 55 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (100 μm)

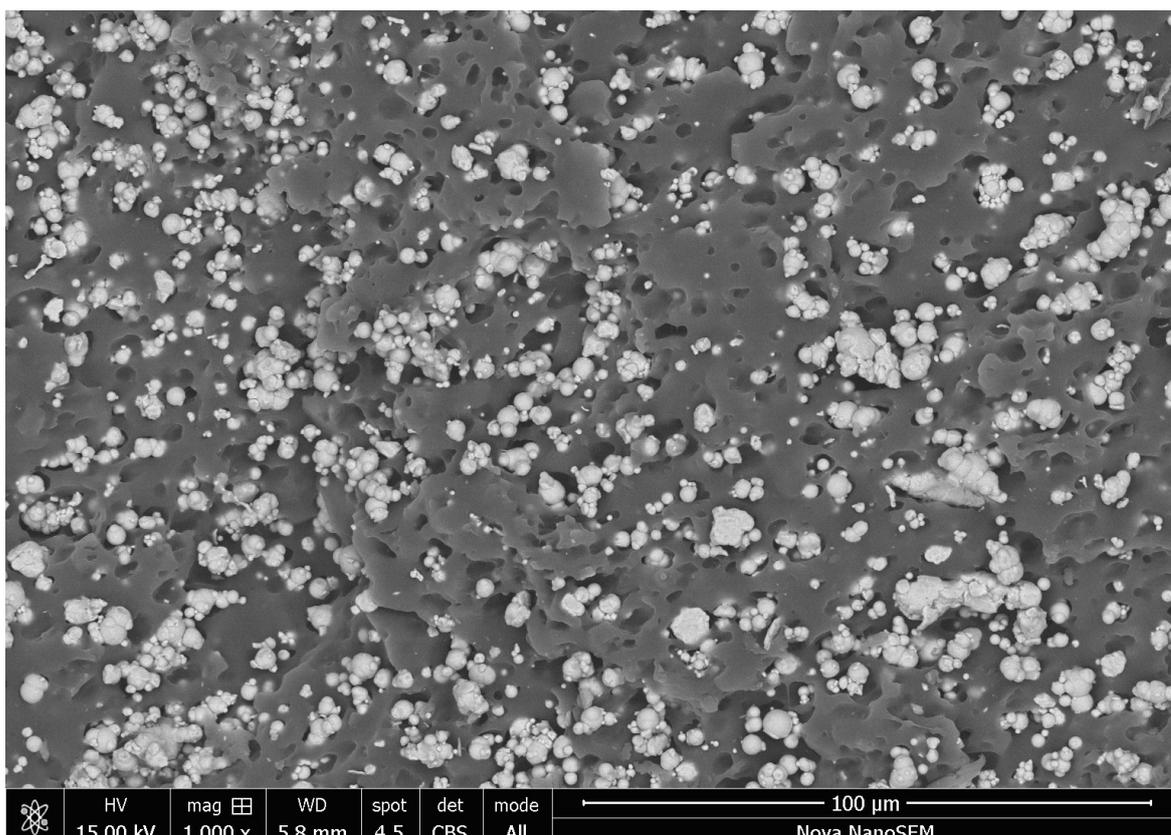


Obrázek 56 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (20 μm)

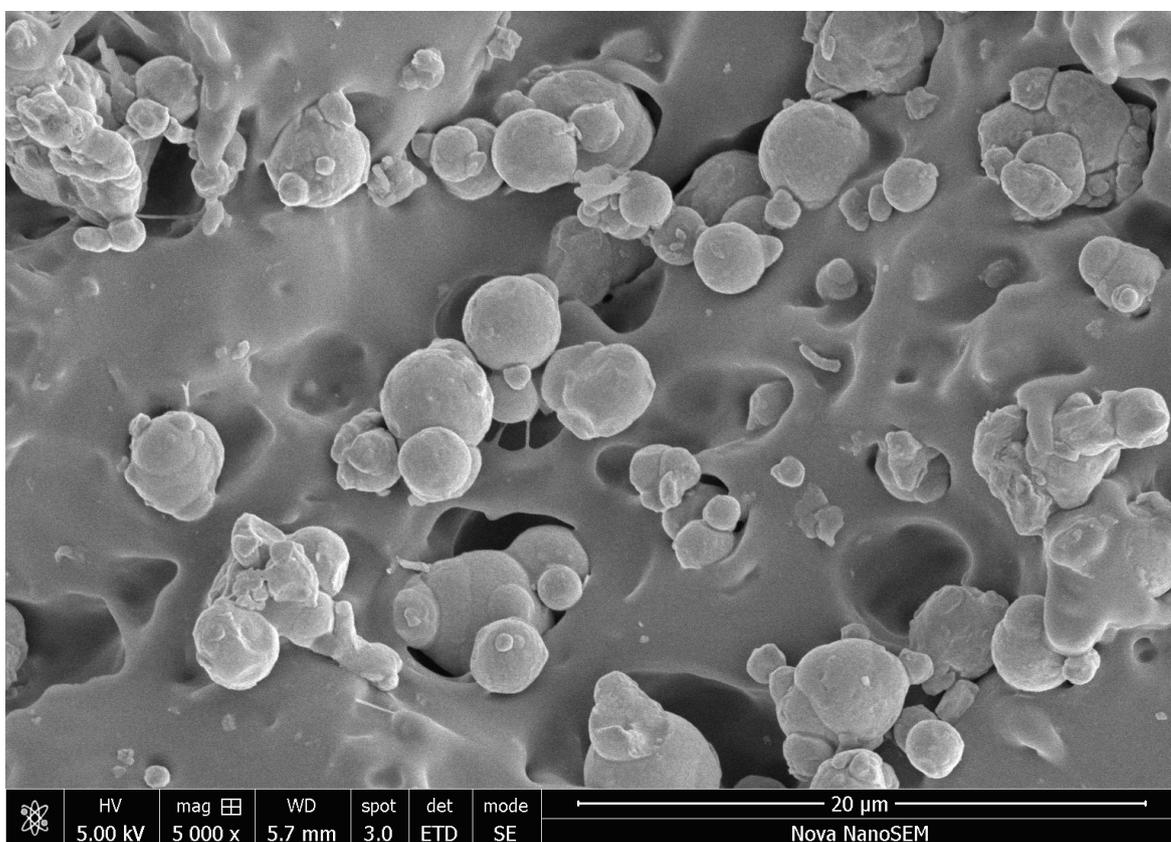
4.1.7.3 Mikroskopie SEM - 70 hm.% CIP



Obrázek 57 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (200 μm)

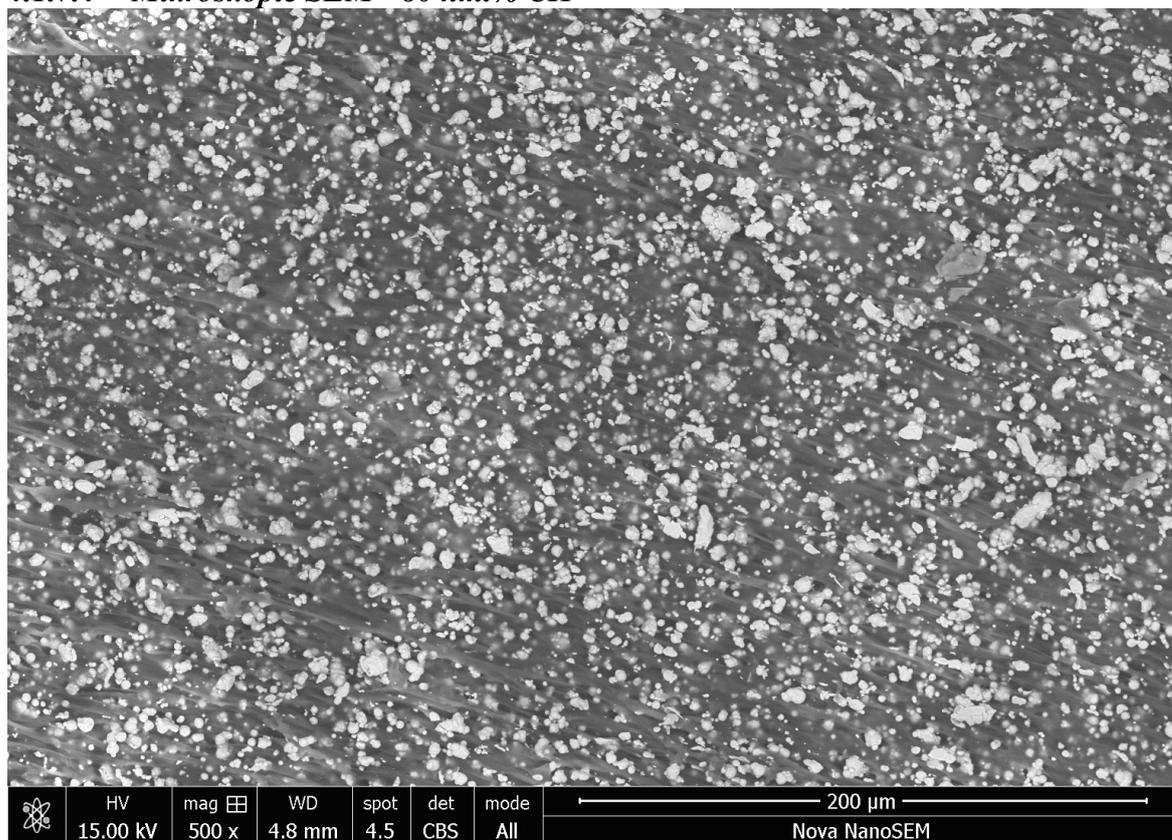


Obrázek 58 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (100 µm)

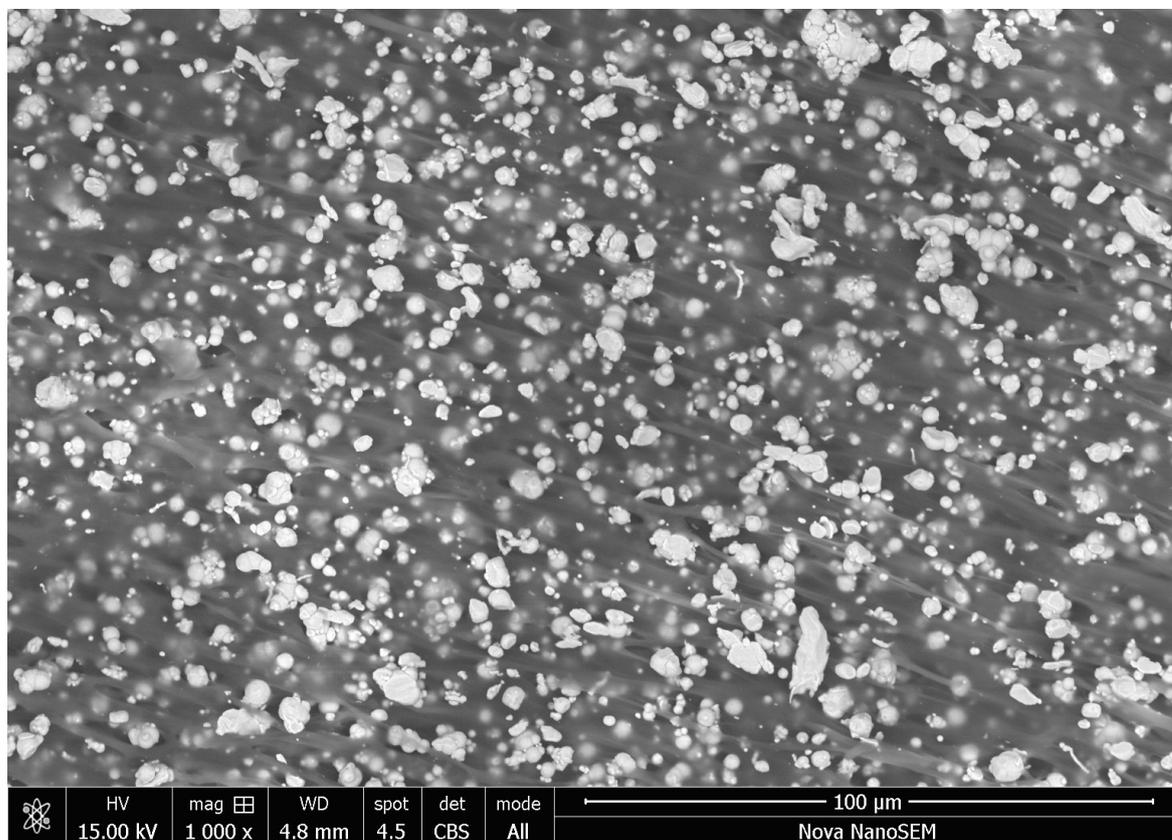


Obrázek 59 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (20 µm)

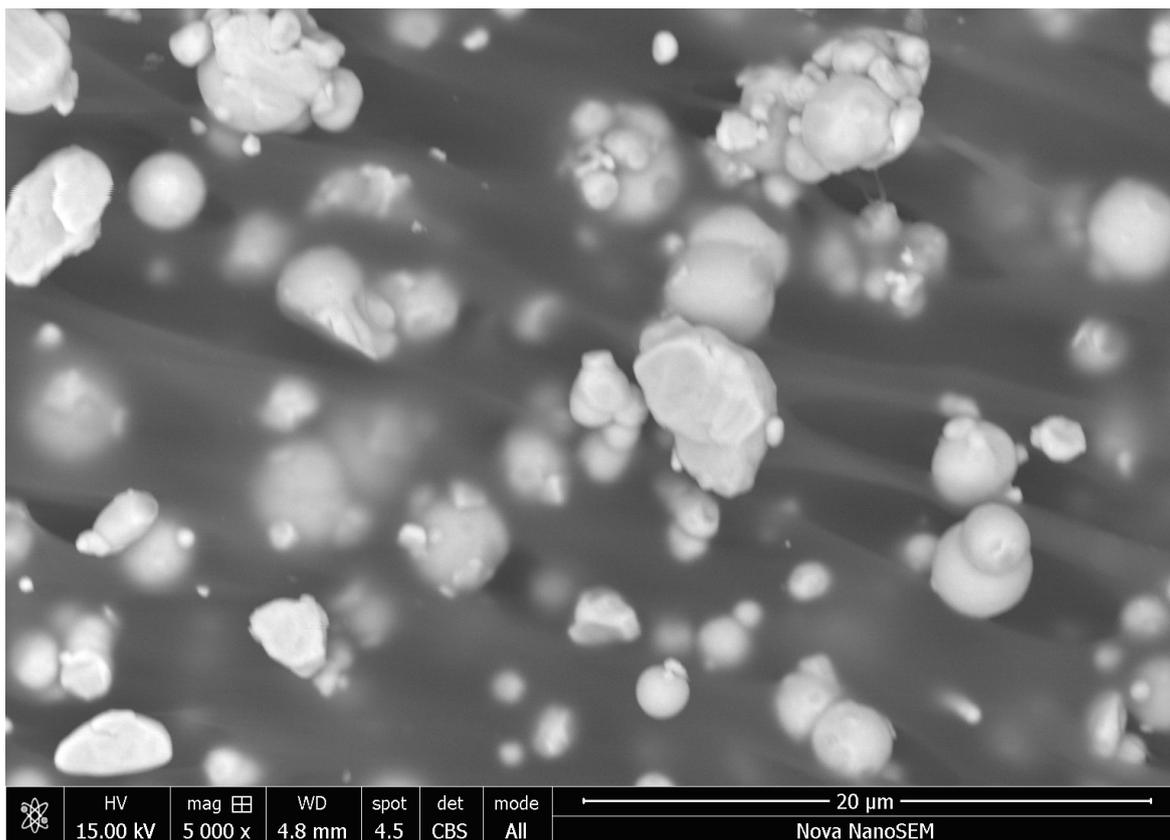
4.1.7.4 Mikroskopie SEM - 80 hm.% CIP



Obrázek 610 SEM, Mikroskopie 80 hm.% (200 μm)

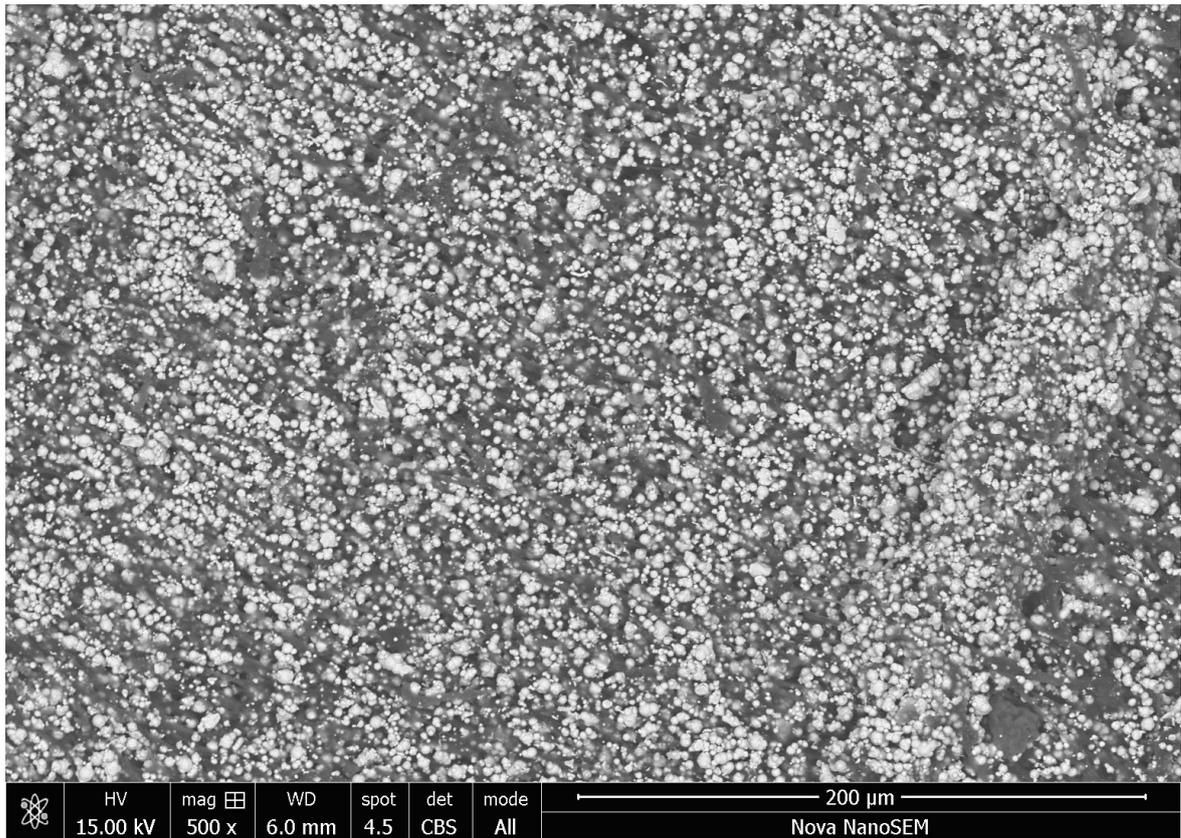


Obrázek 601 SEM, Mikroskopie 80 hm.% (100 μm)

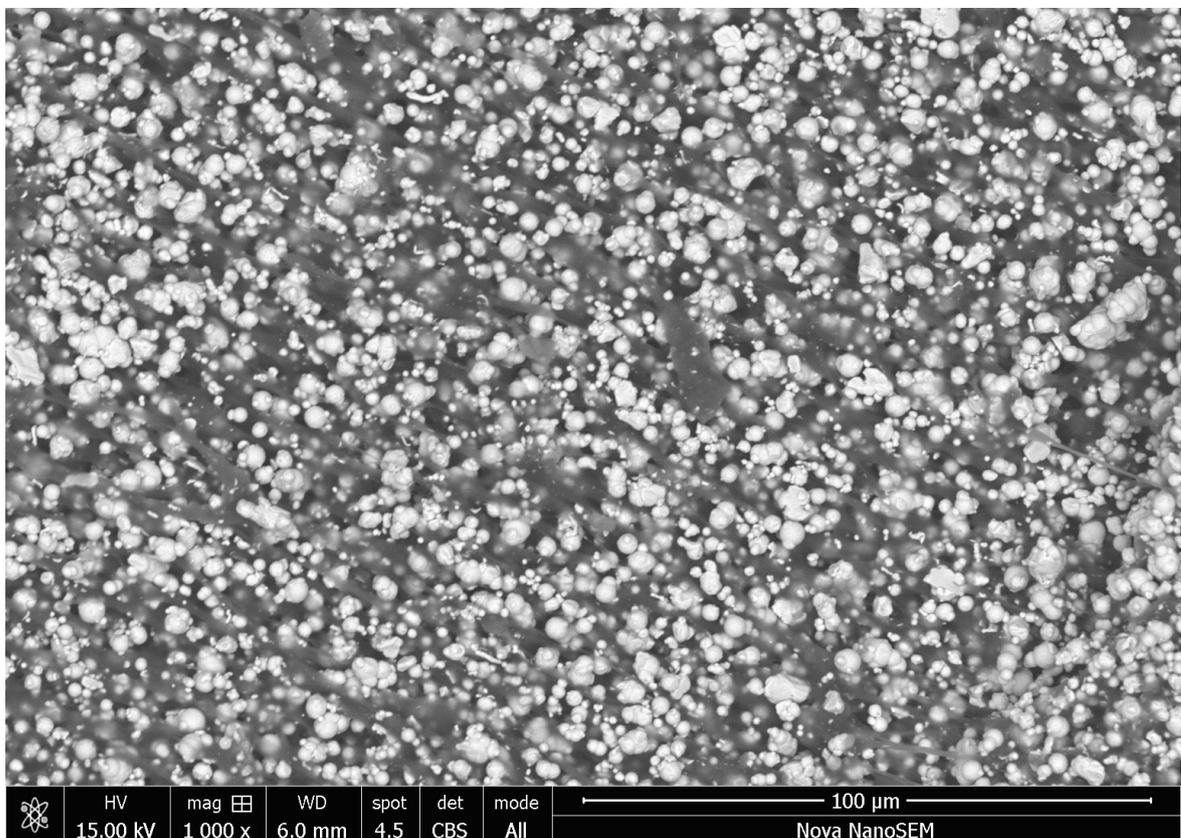


Obrázek 62 SEM, Mikroskopie 80 hm.%(20 µm)

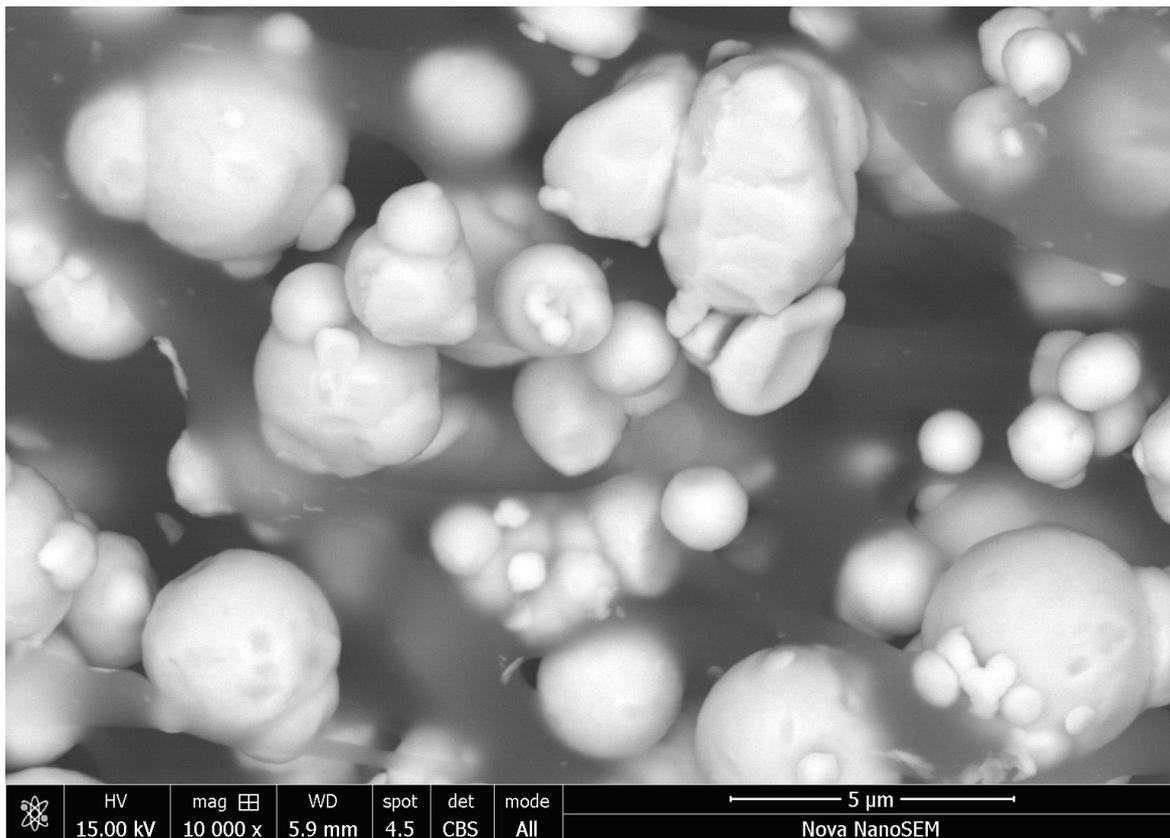
4.1.7.5 Mikroskopie SEM - 90 hm.% CIP



Obrázek 63 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (200 μm)



Obrázek 64 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (100 μm)



Obrázek 65 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (5 μm)

4.1.7.6 Zhodnocení SEM snímků

Na snímcích pořízených na skenovacím elektronovém mikroskopu lze vidět, že u koncentrace 50 hm.% se prášek karbonylového železa vyskytuje v menším množství, avšak s rostoucí koncentrací se postupně plocha snímků částicemi zaplňuje, což lze velmi pěkně vidět zejména u snímků s měřítkem 200 a 100 μm. Dále si lze všimnout rozměrů kovového prášku, které se většinou opravdu pohybují v rozmezí, které deklaruje výrobce. Na několika snímcích (například Obrázek 59 a 65) lze vidět shlukování neboli aglomeraci částic kovového prášku. Některé snímky jsou pořízeny v módu SE (Sekundární elektrony), což jsou ty, které nezvýrazňují prášek karbonylového železa. Ostatní využívají zpětně odražených elektronů (BSE) pro tvorbu snímku, díky čemuž jsou částice kovového prášku zvýrazněny, jelikož oproti polymerní matici mají vyšší atomové číslo, což umožňuje odrazení většího množství elektronu, které dále může zachytit detektor.

4.1.8 Magnetoreologie

Vzhledem ke kombinaci matrice z termoplastického elastomeru a plniva z feromagnetického karbonylového železa byla provedena magnetoreologie, což je zkouška, která popisuje změny chování materiálu při vystavení magnetickému poli. Právě zmíněná elastická matrice z TPE umožňuje pohyb částic, ke kterému dochází při vystavení kompozitního materiálu magnetickému poli, čímž se mění například viskozita materiálu. Částice se po vystavení magnetickému poli začnou přesouvat a orientovat podle působení pole, jakmile však přestane působit magnetické pole, dojde k rozvolnění částic. Magnetoreologický efekt je však limitován maximální koncentrací, při níž dochází k organizaci částic do řetězců a následnému rozvolnění. Toto je dáno tím, že při vyšších koncentracích plniva začnou mizet viskoelastické zóny v kompozitním materiálu, které umožňují návrat částic do původní polohy poté, co přestane působit na materiál magnetické pole. Proto se zvolila nejnižší relativně tisknutelná koncentrace, tedy 70 hm.%, pro tuto zkoušku.



Obrázek 66 Rotační reometr Anton-Paar
MCR 502

Magnetoreologie byla provedena na rotačním reometru Anton-Paar MCR 502, kdy měření bylo provedeno dvakrát, poprvé bez působení magnetického pole a podruhé s působením

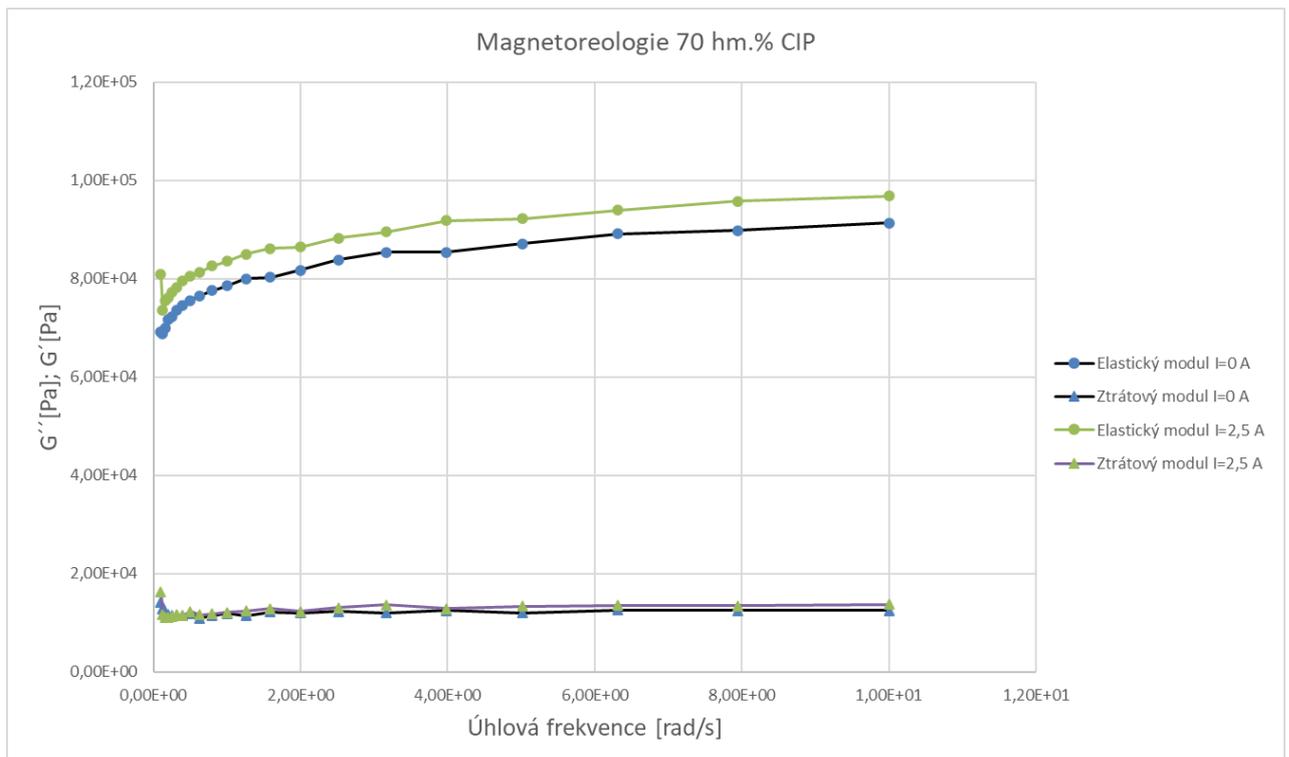
magnetického pole o intenzitě 746 kA/m, které bylo vytvářené proudem 2,5 A. Pro měření bylo vyseknuto z vylisované destičky o tloušťce 2 mm kruhové zkušební těleso, jehož průměr byl 20 mm. Zkušební těleso bylo při měření zajištěno silou 0,3 N. Při měření se spodní část zkušební tělesa dotýká podložky, jež je statická, vrchní plocha tělesa je však vystavena oscilující části reometru, čímž dochází k namáhání zkušební tělesa a měří se brzdny efekt materiálu. V následujících tabulkách a obrázku se nachází výsledky magnetoreologie.

Tabulka 8 Výsledky magnetoreologie bez působení magnetického pole

Magnetoreologie 70 hm.% I=0 A			
Číslo měření	Úhlová frekvence [rad/s]	Elastický modul G' [Pa]	Ztrátový modul G'' [Pa]
1	1,00E-01	6,92E+04	1,41E+04
2	1,26E-01	6,88E+04	1,28E+04
3	1,59E-01	7,01E+04	1,22E+04
4	2,00E-01	7,16E+04	1,18E+04
5	2,51E-01	7,23E+04	1,15E+04
6	3,16E-01	7,37E+04	1,14E+04
7	3,98E-01	7,47E+04	1,15E+04
8	5,01E-01	7,56E+04	1,18E+04
9	6,31E-01	7,65E+04	1,10E+04
10	7,94E-01	7,76E+04	1,15E+04
11	1,00E+00	7,86E+04	1,19E+04
12	1,26E+00	8,00E+04	1,15E+04
13	1,59E+00	8,03E+04	1,23E+04
14	2,00E+00	8,18E+04	1,20E+04
15	2,51E+00	8,38E+04	1,23E+04
16	3,16E+00	8,54E+04	1,21E+04
17	3,98E+00	8,54E+04	1,25E+04
18	5,01E+00	8,72E+04	1,21E+04
19	6,31E+00	8,92E+04	1,26E+04
20	7,94E+00	8,99E+04	1,25E+04
21	1,00E+01	9,13E+04	1,25E+04

Tabulka 9 Výsledky magnetoreologie s působením magnetického pole

Magnetoreologie 70 hm.% I=2,5 A			
Číslo měření	Úhlová frekvence [rad/s]	Elastický modul G' [Pa]	Ztrátový modul G'' [Pa]
1	1,00E-01	8,09E+04	1,64E+04
2	1,26E-01	7,36E+04	1,17E+04
3	1,59E-01	7,56E+04	1,12E+04
4	2,00E-01	7,61E+04	1,12E+04
5	2,51E-01	7,73E+04	1,12E+04
6	3,16E-01	7,82E+04	1,16E+04
7	3,98E-01	7,96E+04	1,15E+04
8	5,01E-01	8,05E+04	1,23E+04
9	6,31E-01	8,13E+04	1,17E+04
10	7,94E-01	8,26E+04	1,19E+04
11	1,00E+00	8,36E+04	1,21E+04
12	1,26E+00	8,50E+04	1,24E+04
13	1,59E+00	8,62E+04	1,29E+04
14	2,00E+00	8,64E+04	1,24E+04
15	2,51E+00	8,83E+04	1,31E+04
16	3,16E+00	8,95E+04	1,37E+04
17	3,98E+00	9,18E+04	1,29E+04
18	5,01E+00	9,23E+04	1,34E+04
19	6,31E+00	9,40E+04	1,35E+04
20	7,94E+00	9,58E+04	1,35E+04
21	1,00E+01	9,68E+04	1,37E+04

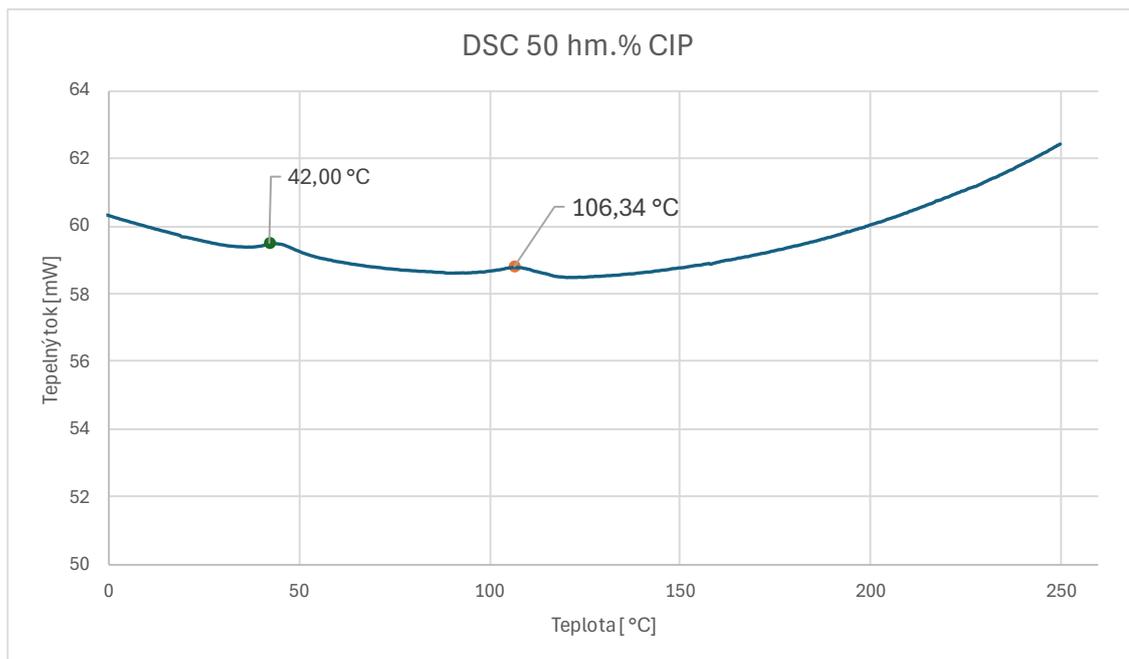


Obrázek 67 Grafické znázornění výsledků magnetoreologie

Na grafu se nachází obě měření, jak s působením magnetického pole ($I=2,5$ A), tak i bez ($I=0$ A), z nichž jsme získali elastický modul, který představuje elastickou složku a ztrátový modul, jenž reprezentuje viskózní složku. Z výsledků měření na Obrázku 67 lze vidět, že u ztrátového modulu G'' [Pa] nedošlo k prakticky žádné změně, avšak u elastického modulu došlo ke zvýšení průměrně o **5360 Pa**, procentuálně tedy o **7 %**. Ze získaných výsledků lze tedy vyčíst, že magnetoreologický efekt u koncentrace 70 hm.% je opravdu malý, lze tedy očekávat, že bude horší u vyšších koncentrací. Příčinou je již zmíněné mizení viskoelastických zón, ke kterému dochází při rostoucí koncentraci plniva. Lepší výsledky lze očekávat od nižších koncentrací, které však nejsou tisknutelné standartní neupravenou FDM tiskárnou.

4.1.9 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Dále byla na přístroji Pyris 1 DSC provedena diferenciální skenovací kalorimetrie, která umožňuje náhled do změn tepelného toku na určitém teplotním profilu materiálu, díky čemuž je možné určit teploty skelného přechodu, tání neb krystalizace. Během těchto teplot dochází v materiálu ke spotřebování (endotermická reakce) nebo uvolňování (exotermická reakce) tepla, což se projeví v získaném grafu z měření v podobě lokálních špiček. Princip spočívá v umístění malého množství měřeného materiálu, konkrétně koncentrace 50 hm.% CIP, do jedné části DSC, zatímco v druhé části DSC je referenční materiál, v našem případě indium. Oba materiály jsou vystaveny stejnému procesu ohřevu/ochlazování, jakmile však dojde například k dosažení teploty tavení, tak měřený polymerní materiál začne spotřebovávat teplo, čímž dojde k rozdílu v tepelném toku oproti referenčnímu materiálu. Výsledkem měření je tedy graf závislosti tepelného toku na teplotě, jenž se nachází na Obrázku 68. Na výsledcích měření lze vidět dvě místa, ve kterých dochází k endotermické reakci, přibližně tedy při teplotě **42 °C** a **106,34 °C**. U první teploty se jedná o teplotu skelného přechodu, která se velmi blíží teplotě skelného přechodu, jež je uvedena v materiálovém listě čistého Vistamaxx 6202, tedy 45,2 °C. Druhá endotermická reakce na teplotě 106,17 °C nastává kvůli dosažení teploty tání, která také odpovídá teplotě tání čistého Vistamaxx 6202 pohybující se kolem 108 °C. Měřený materiál s 50 hm.% CIP je sice nejnižší vyrobenou koncentrací, avšak stále je to relativně velké množství plniva, u kterého by se ovlivnění teplot dalo pozorovat, pokud by plnivo mělo na tuto vlastnost vliv. Z výsledků lze však vidět, že teploty odpovídají původnímu čistému Vistamaxx 6202. Z hlediska tepelných vlastností však určitě dochází k růstu tepelné vodivosti materiálu, která se zvyšuje s rostoucí koncentrací.



Obrázek 68 Výsledek DSC pro koncentraci 50 hm.% CIP

4.1.10 Zhodnocení materiál a možná aplikace

Bylo provedeno několik různých zkoušek, které měly charakterizovat materiál a jednotlivé koncentrace. V rámci tahových zkoušek bylo pro každou koncentraci a čistý Vistamaxx 6202 vytištěno 5 tahových těles, na kterých byla poté provedena tahová zkouška podle normy ČSN ISO 37. Výsledky poukázali na růst pevnosti materiálu, avšak pouze do koncentrace 70 hm.% CIP, po jejímž překonání došlo k prudkému poklesu pevnosti kompozitního materiálu. Následně bylo provedeno měření tvrdosti podle Shore A podle normy ČSN ISO 48-4, ze kterého byla vypořazována lineární závislost tvrdosti na koncentraci kovového prášku, kdy u nejvyšší koncentrace, 90 hm.% CIP, bylo dosaženo tvrdosti až **86 Shore A**, což je nárůst o **26 Shore A** oproti původní hodnotě čistého Vistamaxx 6202 **60 Shore A**. Dále byly vytvořeny snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu Nova NanoSEM 450, na kterých lze vidět, jak s rostoucí koncentrací se polymerní matrice plní práškem karbonylového železa. Také bylo možné vypořazovat tendenci částic prášku se shlukovat a tvořit takzvané aglomeráty. Následující měření proběhlo na rotačním reometru a týkalo se magnetoreologie. Výsledky ukázaly, že elastický modul G' , tedy elastická složka, testované koncentrace 70 hm.% se po vystavení magnetickému poli zvýšil o **7 %**, průměrně o hodnotu **5360 Pa**, avšak ztrátový modul G'' , který představuje viskózní složku, se prakticky nezměnil. Tyto výsledky poukazují na malý magnetoreologický efekt, a to kvůli vysoké koncentraci plniva, při které došlo k vymizení viskoelastických zón, jež umožňují právě tento efekt. Posledním vykonaným měřením byla

diferenciální skenovací kalorimetrie, jež umožnila zjistit, zda plnivo neovlivnilo teplotu tání a skelného přechodu. Výsledkem měření byl graf, který ve dvou místech poukazyval na endotermickou reakci, jelikož došlo ke zvýšení tepelného toku v těchto dvou teplotách. Konkrétně se jednalo o teploty **42** a **106,34 °C**, kdy u první se jednalo o teplotu skelného přechodu a u druhé o teplotu tání. Při srovnání s materiálovým listem se teploty nelišily, a proto lze usoudit, že plnivo nemá vliv na teploty skelného přechodu a tavení.

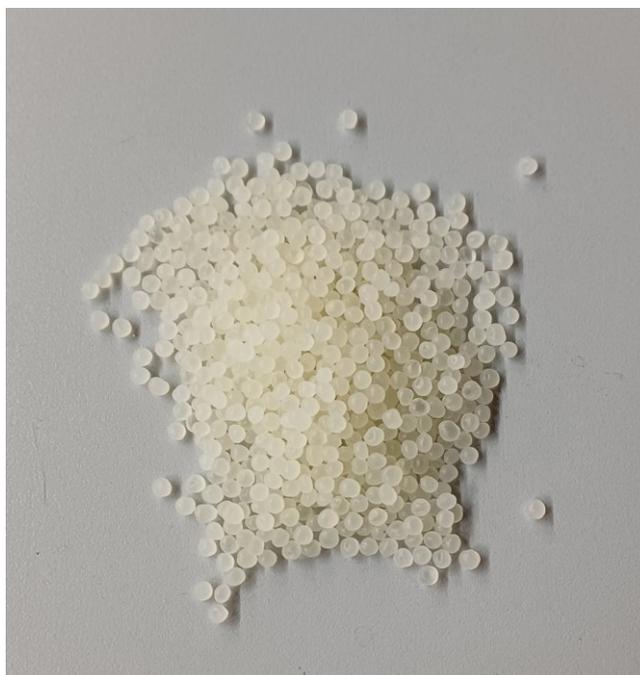
Primárním důvodem pro volbu takové kombinace matrice a plniva bylo ověření tisku magnetoreologických elastomerů, které lze aplikovat například u absorbérů vibrací, vibračních izolátorů nebo aktuátorů ventilů, a to právě díky možnosti regulace vlastností magnetoreologického elastomeru magnetickým polem. Kromě využití spojeným s magnetoreologickým jevem lze tyto materiály aplikovat při stínění elektromagnetického záření, jelikož karbonylové železo absorbuje toto záření právě v oblasti mikrovln. Lze jej tedy použít pro ochranu citlivého vybavení a při kombinaci s elastickými vlastnostmi materiálů i proti mírným vibracím či nárazům. Ve spojitosti s absorpcí mikrovln je možné využít tento materiál při takzvaném 4D tisku, který umožňuje změnu tvaru tištěného objektu při vystavení určitým podnětům, což by umožňovalo cílenou aktuaci částí tištěných struktur, a to právě díky ohřevu, který je způsoben karbonylovým železem při absorpci mikrovln. Standartně bez plniv totiž změna tvaru probíhá nejčastěji ve vodní lázni, kdy aktuace teplem probíhá na celém objektu, avšak přidáním karbonylového železa a cílenými mikrovlnami lze ohřívat materiál pouze v určité oblasti, dojde tedy ke změně tvaru pouze v požadovaném místě. Dále by bylo možné z vyrobených materiálu vytisknout substrát pro fličkovou anténu, která využívá magneto-dielektrické vlastnosti využitého materiálu.

4.2 Filament z termoplastu

Druhý segment praktické části bude věnován výrobě filamentu z více konvenčního materiálu pro 3D tisk, který bude obohacen opět o plnivo v podobě kovového prášku.

4.2.1 Výběr matrice a plniva

Pro roli matrice byl vybrán materiál, který lze označovat jako nejčastěji využívaný v oblasti 3D tisku pomocí technologie FDM, a to PLA. specificky se jedná o Luminy LX175U od společnosti TotalEnergies Corbion, který se vyznačuje tím, že je biologicky odbouratelný. Kromě dostupnosti je pro PLA typický velmi jednoduchý tisk bez velké tepelné deformace nebo tahání struny jako u ABS a PETG.



Obrázek 69 PLA Luminy LX175U

Jako plnivo byl opět zvolen prášek karbonylového železa s označením CIP CN. Jedná se o stejný prášek, který byl využit pro výrobu filamentu z termoplastického elastomeru, jehož medián průměru částic se pohybuje mezi 6,5 až 8 μm . Vyznačuje se vysokou čistotou, obsah železa dosahuje až 99,8 %, absorpcí mikrovln a specifickými magnetickými vlastnostmi.

4.2.2 Výroba granulátu

K míchání a granulaci směsi opět došlo na stejném stroji jako v případě filamentu z termoplastického elastomeru, tedy na vytlačovacím stroji Scientific Twin Screw Extruder. Tentokrát se připravovali pouze 3 koncentrace, a to konkrétně 30, 40 a 50 hm. %, kdy příprava navážky probíhala podle Tabulky 10.



Obrázek 70 Vakuová sušárna MEMMERT VO400 [78]

Před samotným mícháním materiálu se jak matrice, tak i plnivo vysušili ve vakuové sušárně MEMMERT VO400, a to při teplotě 50 °C po dobu 12 hodin.

Po navážení se PLA a CIP vložilo do stejné nádoby, kde se obsah promíchal. Mezitím se zadaly na stroji požadované teploty pro teplotní zóny a nechal se vytlačovací stroj vytopit.

Tabulka 10 Navážka

Hmotnost [kg]	Hm. %		
	30	40	50
CIP [kg]	0,43	0,67	1
PLA Luminy LX175U [kg]	1	1	1

Teploty, jež byly zadány, lze najít na následující tabulce.

Tabulka 11 Teploty na zónách vytlačovacího stroje

Zóna	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Teplota [°C]	164	164	167	167	172	172	175	175	180	180	180	180

Poté co teploty dosáhli požadované úrovně se zapnulo otáčení šneku, jehož otáčky byly nastaveny na 15 otáček za minutu. Jakmile se začal materiál vytlačovat v podobě struny ze trysek, byl následně odtažen pomocí pásového odtahu, kde chlazení zajišťovalo několik ventilátorů. Po odtahu následovalo navedení struny do granulačního zařízení, kde byla struna zpracována na granulát.



Obrázek 71 Extrudovaná struna



Obrázek 72 Získaný granulát

Tímto procesem byl získán granulát pro všechny tři koncentrace.

4.2.3 Výroba filamentu

Po získání granulátu všech 3 koncentrací byl čas na výrobu filamentu. Stroj pro výrobu filamentu byl zvolen Extruder Bocomatic EB-30 s průměrem šneku 30 mm a pracovní délkou šneku L/D 30. K vytlačovacímu stroji však chyběla vytlačovací hlava s požadovaným průměrem vytlačovacího otvoru pro filamentu o průměru 1,75 mm, z toho důvodu bylo nutné takovou hlavu vyrobit.



Obrázek 73 Vytlačovací stroj Bocomatic EB-30

4.2.3.1 Výroba vytlačovací hlavy

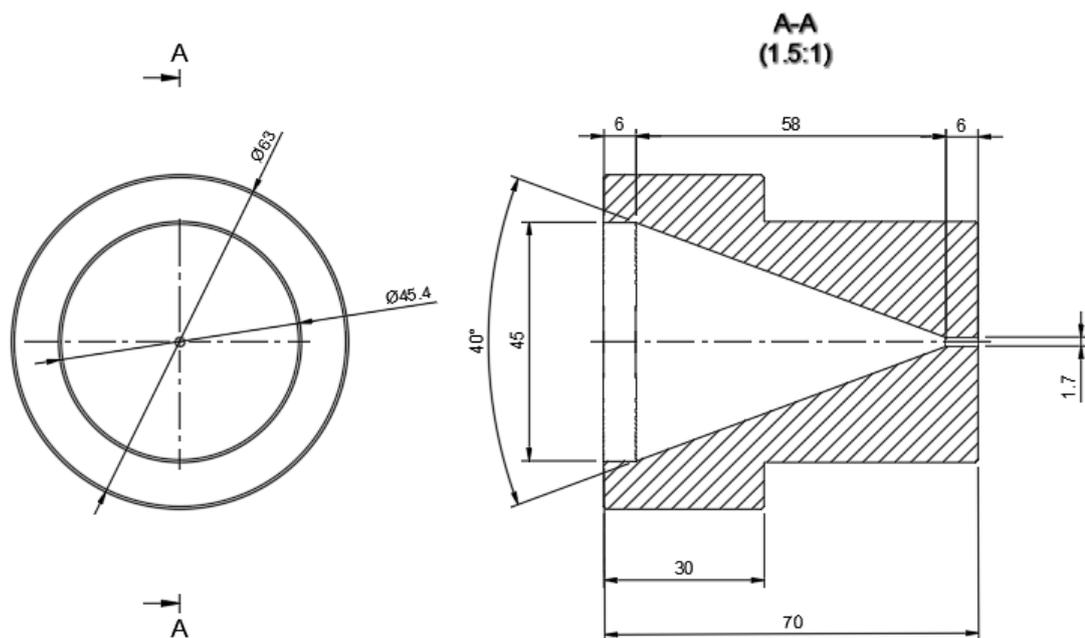
Pro výrobu vytlačovací hlavy byla zvolena technologie obrábění zvaná soustružení. Proces probíhal na stroji TOS SUI 50 s maximální délkou soustružení 1000 mm, regulovatelnými otáčkami vřetena v rozpětí 14-2240 otáček za minutu a celkovým potřebným výkonem 7,5 kW. Vnější rozměry vytlačovací hlavy vycházely z měření propůjčené vytlačovací hlavy s vytlačovacím otvorem o průměru 10 mm. Modelování a následné vytváření výkresu

probíhalo v programu Fusion 360, kde také při modelování byly podle požadovaného průměru otvoru 1,7 mm upraveny vnitřní rozměry.



Obrázek 74 Soustruh SUI 50 – ilustrativní obrázek [79]

Rozměry vyráběné vytlačovací hlavy se nachází na následujícím obrázku.



Obrázek 75 Rozměry vytlačovací hlavy

Materiál, ze kterého byla vytlačovací hlava obráběna byl třídy 12 v podobě tyče o průměru 75 mm. Po upnutí byl v první řadě obroben polotovár na průměr 63 mm, poté následovalo obrobení na průměr 45,4 mm po délce 40 mm, po kterém došlo k upíchnutí. Následně se obrobek upnul za průměr 45,4 mm a začala práce na dutině vytlačovací hlavy. Prvně byl vyvrtán pomocí vrtáku otvor o průměru 40 mm, který byl následně s využitím soustružnického nože obroben na průměr 45 mm. V programu Fusion byly z modelu následně vypočítány hloubky, do kterých lze vrtat pomocí vrtáků o průměru 30, 20, 10, 8, 6, 5 a 4 mm, konkrétně 25, 38, 52, 54, 57, 58 a 60 mm. V souvislosti s těmito rozměry byly vyvrtány díry, u nichž materiál, který zbýval k obrobení do požadovaného vnitřního kužele, byl obroben pomocí soustružnického nože na dalším obrázku.



Obrázek 76 Soustružnický
nůž – vnitřní uběrací

Před samotným soustružením plochy kužele byla z druhé strany vyvrtána díra vybrušovaným vrtákem o průměru 1,7 mm. Jelikož se využitím soustružnického nože z Obrázku 76 nebylo možné dostat až do úplné špičky kužele, byl zbývající materiál odstraněn vrtáním pomocí vrtáku, jenž byl zbrošen do úhlu 40°. Po tomto kroku následovalo obrobení zkosení. Vzhledem k nutnosti nízké drsnosti vnitřních povrchů vytlačovacích hlav, byly pomocí jemné vrtací brusky PFBS 12 C6 značky Parkside a různých brousících násad vyhlazeny vnitřní povrchy, jež následně byly vyleštěny leštící pastou. Proces broušení a leštění probíhal tak, že se obrobek upnul za průměr 45,4 mm, kdy

během následovného broušení a leštění se nechala vytlačovací hlava rotovat v soustruhu a brusku se ručně vykonával opakovaný pohyb od vnějšku po vnitřek dutiny.



Obrázek 77 Vrták zbroušený na 40°



Obrázek 78 Vyrobené vytlačovací hlava

4.2.3.2 Vytlačení filamentu

Jak již bylo zmíněno pro prvotní vytlačení filamentu byl zvolen laboratorní vytlačovací stroj Bocomatic EB-30, do kterého byla vsazena vyrobená vytlačovací hlava. Za vytlačovacím strojem bylo kromě chladicí vany a odtahu přistaveno i měření průměru struny. Před samotným procesem vytlačování bylo nutné vyčistit stroj od předešlého materiálu, a to pomocí polyethylenu, což vyžadovalo vytopení zón na teploty od 170 až po 200 C°. Po vytlačení nežádoucího materiálu došlo k nasypání vysušeného granulátu o koncentraci 40 hm.% do násypky vytlačovacího stroje a snížení teplot zón na první zkoušené teploty vytlačování, které lze vidět na další tabulce.

Tabulka 12 Zkušební teploty pro vytlačování filamentu

Zóna	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Teplota [°C]	160	160	165	165	170	1770	180	180

Tyto teploty se však projeví jako příliš vysoké, jelikož materiál vystupující z vytlačovací hlavy se nedal odebrat a protáhnout skrz chladicí vanu až po odtah a měření průměru. Proto následovala optimalizace teplot, což vedlo k nastavení na teploty uvedené na další tabulce.

Tabulka 13 Teploty zón při vytlačování filamentu

Zóna	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Teplota [°C]	120	120	135	135	145	145	130	130

Při nastavení těchto teplot se podařilo vytlačit malé množství materiálu, které bylo možné dostat do chladicí vany, avšak poté došlo k narušení stabilnosti toku, jež se poté nepodařilo obnovit. Toto vedlo ke zvýšení teplot, což nepomohlo a tok materiálu se zastavil kompletně. Poté co se podařilo stroj vyčistit a uvést do provozu však vzhledem k vyčerpání stroje a obsluhy vypršel rezervovaný čas, který byl vyhrazen na tomto stroji pro vytlačování filamentu.

Dále bylo tedy rozhodnuto pro návrat k tiskárně Everplast (Obrázek 28), která zpracovává na rozdíl od klasických tiskáren materiál v podobě granulí, tudíž se neliší od klasického vytlačovacího stroje kromě toho, že je umístěna na konstrukci, která při tisku umožňuje pohyb ve třech osách. Po poměrně krátké optimalizaci byly teploty ustáleny na hodnotách, které jsou uvedeny v následující tabulce. Rychlost šneku byla nastavena na 7,2 RPM.

Tabulka 14 Teploty pro vytlačování filamentu na Everplast

Zóna	Č. 1	Č. 2	Tryska
Teplota [°C]	170	180	185

Do tiskárny byla pro proces vytlačování umístěna vytlačovací tryska o průměru 3 mm, po jejímž opuštění byl materiál zužován na požadovaný průměr odtahem. Z hlediska zpracovatelnosti se těmito teplotami podařilo vytlačit spolehlivě filament pro koncentraci 30 hm.% CIP, při vytlačení 40 hm. % nastaly drobné problémy se stabilitou toku, avšak vytlačení 50 hm.% vedlo k ucpání tiskárny, což bylo odstraněno nastavením teplot zón o několik desítek stupňů výše, ale materiál nešlo odebrat. Ani po dalších úpravách teplot se nepodařilo stabilně vytlačit filament s koncentrací 50 hm.%. Filament ostatních koncentrací po vytlačení z trysky byl ihned ochlazen ventilátorem a odtážen. Proces vytlačení byl poměrně pomalý, proto se vytlačilo pouze několik metrů filamentu. Filament se podařilo vytlačit v rozměru $1,75 \pm 0,1$ mm.



Obrázek 79 Vytlačený filament

4.2.4 Tisk

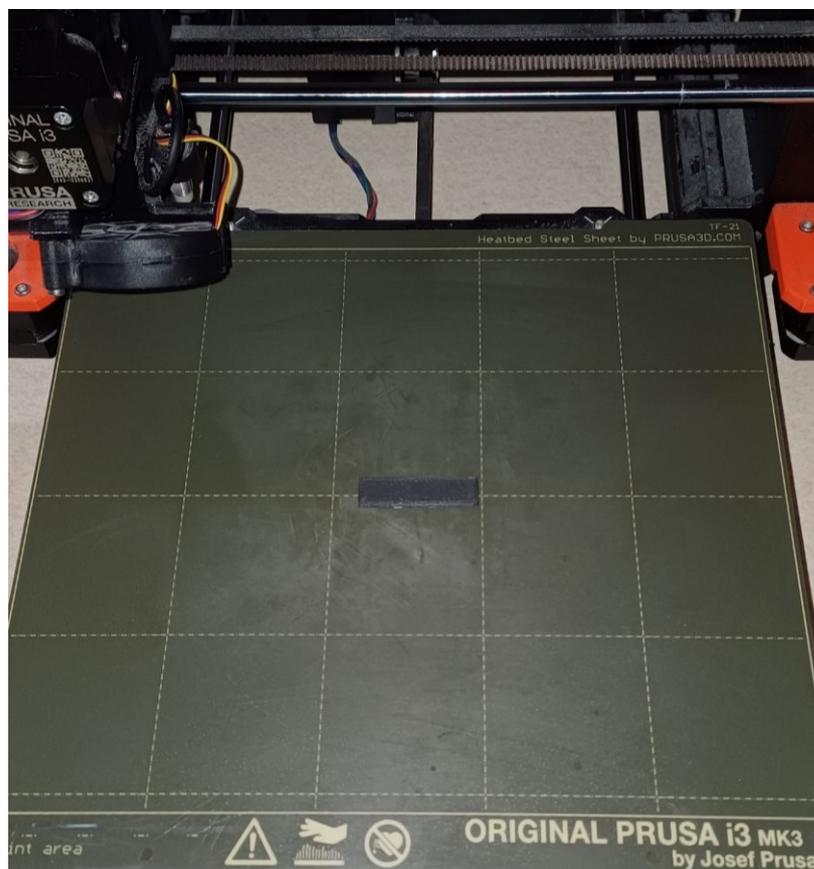
Vzhledem k malému množství získaného filamentu probíhal tisk souběžně z granulátu i filamentu na tiskárně Everplast a Prusa i3 MK3S. Při tisku s Everplast byl použit software Slic3r, kde se pouze nastavil násobič extruze na hodnotu 0,8 a šířka extruze na 165 %. Teploty zón, trysky a podložky byly pro tisk nastaveny podle následující tabulky.

Tabulka 15 Teploty pro tisk PLA na Everplast

Zóna	Č. 1	Č. 2	Tryska	Podložka
Teplota [°C]	175	185	195	45

Při tisku modelů na této tiskárně však bylo nutné přidat pod objekt takzvaný raft, který umožňoval snadné odebrání výtisku z podložky tiskárny Everplast, jež nemá odnímatelnou podložku podobně jako tiskárna Prusa i3 MK3S.

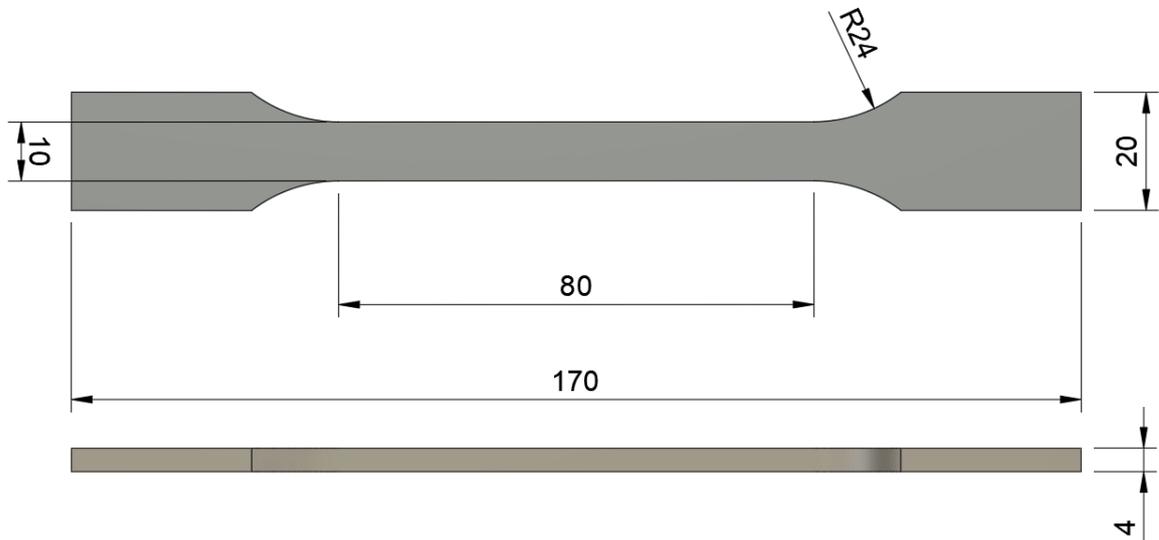
Pro nastavení tisku s tiskárnu Prusa i3 MK3S byl využit software PrusaSlicer, kde se pouze nastavila nižší teplota oproti klasickému PLA, tedy 195 °C, a kvůli nepravidelnosti průměru filamentu byl zvýšen násobič extruze na 1,2. V rámci zkušební tisku byl vložen do tiskárny G-KÓD obsahující příkazy pro tisk kvádru o rozměrech 40 x 10 x 3.



Obrázek 80 Zkušební tisk

4.2.5 Tahová zkouška

Pro tahovou zkoušku byly připraveny zkušební tělesa podle normy ČSN EN ISO 527, jejichž rozměry lze vidět na následujícím obrázku.



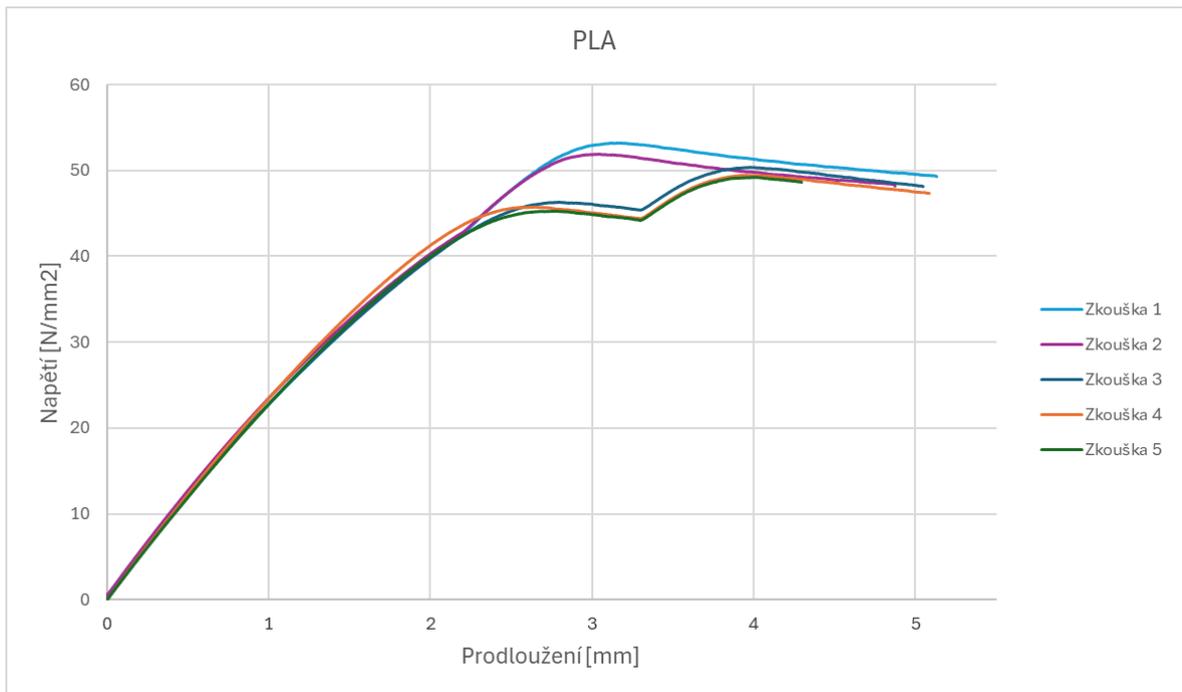
Obrázek 81 Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku

Tahová zkouška opět probíhala na zařízení Testometric MT350-5CT se zátěžovou buňkou 500 kg a bez extenzometru. Výsledky lze najít v dalších podkapitolách.

4.2.5.1 Tahová zkouška - čisté PLA



Obrázek 82 Zkušební tělesa – čisté PLA

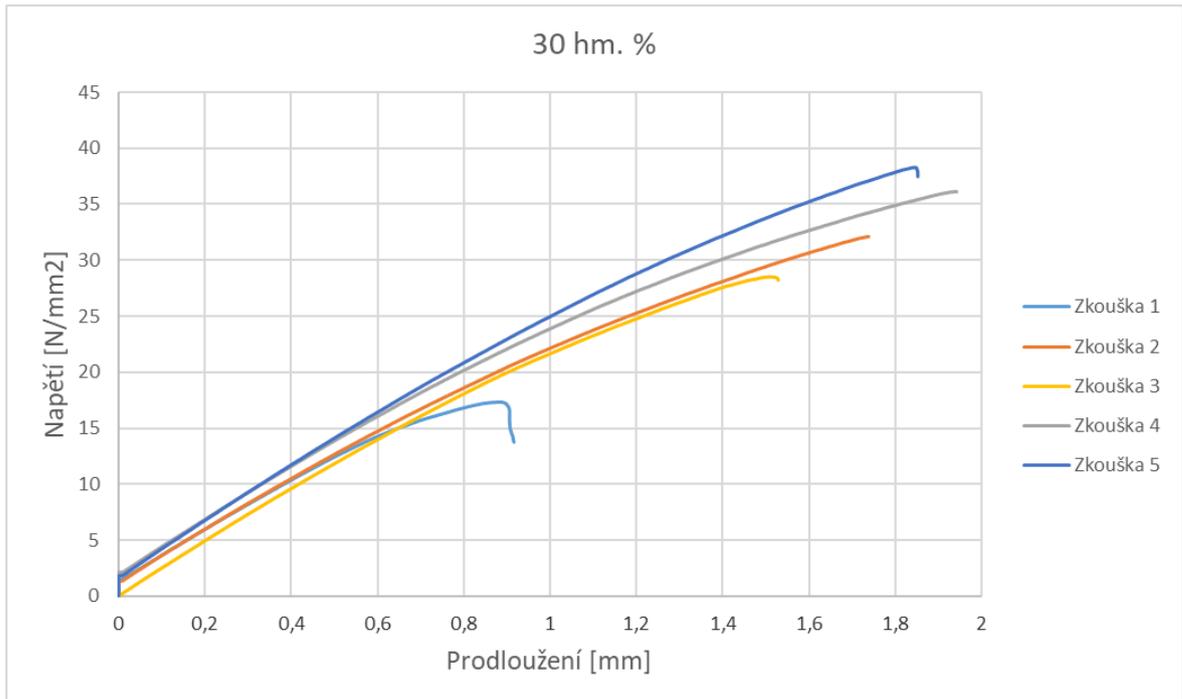


Obrázek 83 Výsledek tahové zkoušky – čisté PLA

4.2.5.2 Tahová zkouška - 30 hm.% CIP



Obrázek 84 Zkušební tělesa – 30 hm.%

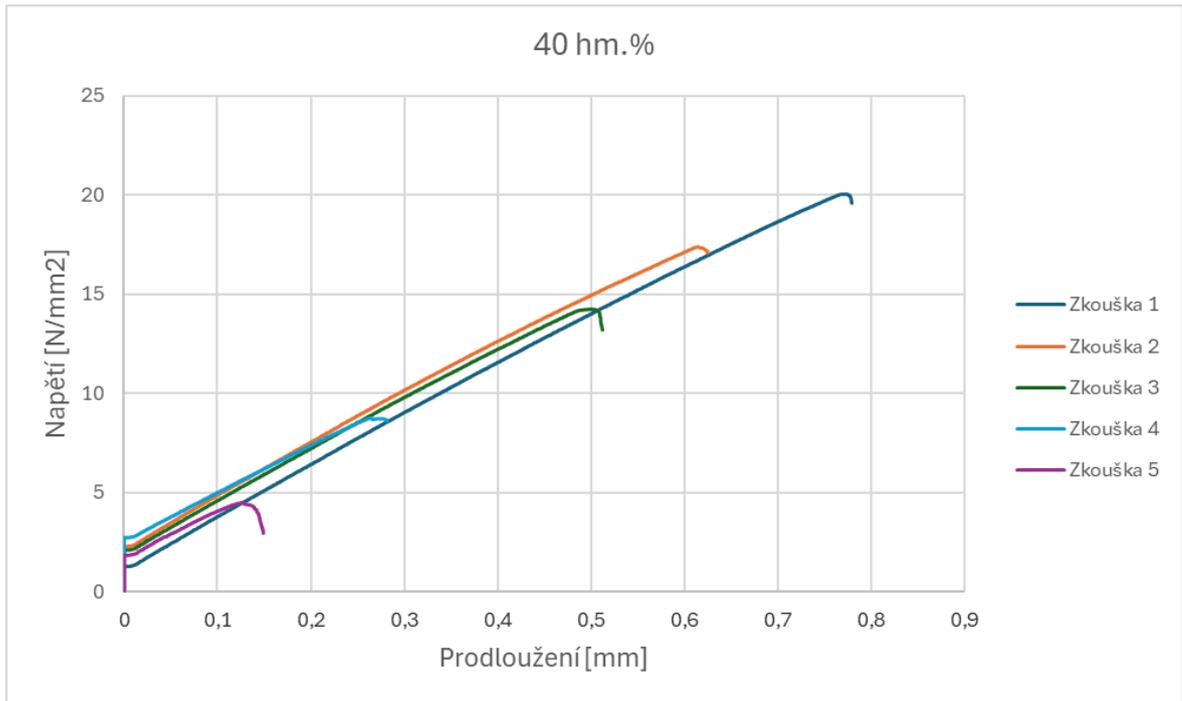


Obrázek 86 Výsledek tahové zkoušky – 30hm.%

4.2.5.3 Tahová zkouška - 40 hm.% CIP



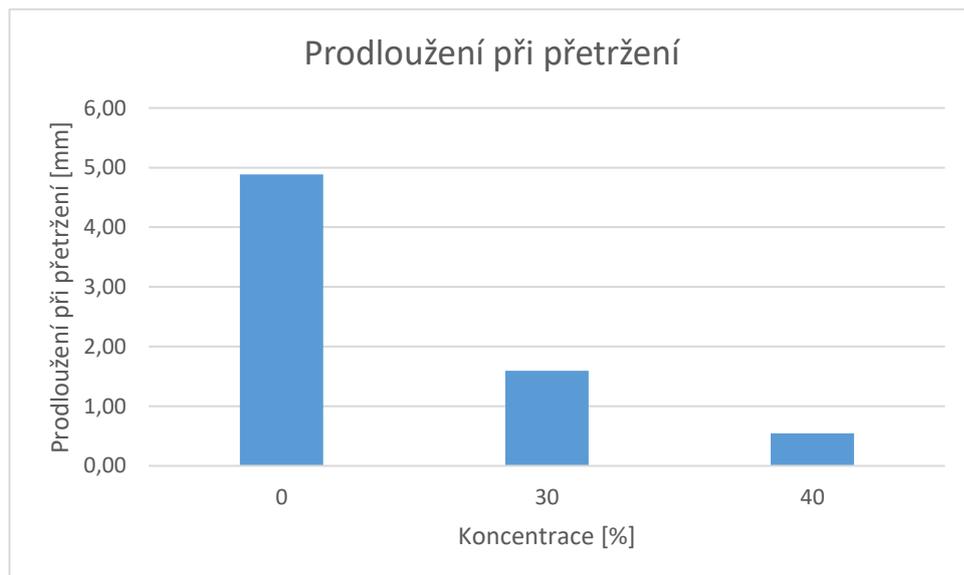
Obrázek 85 Zkušební tělesa 40 hm.%



Obrázek 87 Výsledek tahové zkoušky – 40 hm.%

4.2.5.4 Zhodnocení tahových zkoušek

U tahové zkoušky čistého PLA byl nástup druhé rychlosti tahu pro první dvě zkoušky nastaven na 3 mm, pro zbytek však došlo ke snížení na 2 mm, což je dostačující pro určení modulu pružnosti. K ovlivnění výsledků touto změnou nedošlo.



Obrázek 88 Porovnání výsledků tahové zkoušky

Před poklesem tažnosti materiálu by mělo vlivem práškového plniva dojít k mírnému zpevnění, avšak koncentrace, při kterých se materiál zpevňuje jsou zřejmě nižší než koncentrace zkoušené. Z Obrázku lze vidět že dochází ke ztrátě tažnosti materiálu.

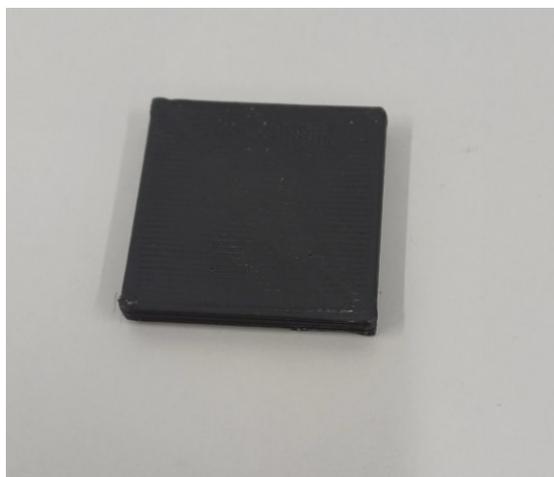
Z hlediska modulu pružnosti bylo dosaženo pro čisté PLA, 30 a 40 hm.% hodnot, které lze vidět v další tabulce.

Tabulka 16 Modul pružnosti

Modul pružnosti [N/mm ²]			
Konc. [hm% CIP]	0	30	40
1	2704,547	2514,941	2901,736
2	2762,07	2597,532	2890,113
3	2687,761	2674,795	2880,495
4	2650,229	2672,726	2614,738
5	2748,3	2788,844	2528,34
Průměr	2710,58	2649,77	2763,08

4.2.6 Zkouška tvrdosti Shore D

Opět bylo provedeno měření tvrdosti, avšak tentokrát Shore D. Norma ČSN EN ISO 868, podle které se stanovuje tvrdost plastů, definuje minimální vzdálenost mezi sousedními vtisky a minimální vzdálenost mezi vtiskem a okrajem, jejichž hodnoty jsou 6 a 12 mm. Tyto podmínky jsou stejné jako u měření tvrdosti Shore A, proto bude využito stejné zkušební těleso a rovněž i stejný tvrdoměr Polymertest, avšak s měřicí hlavou pro Shore D a odpovídajícím závažím. Tvrdost se u Shore D měří 1 sekundu po vniknutí.

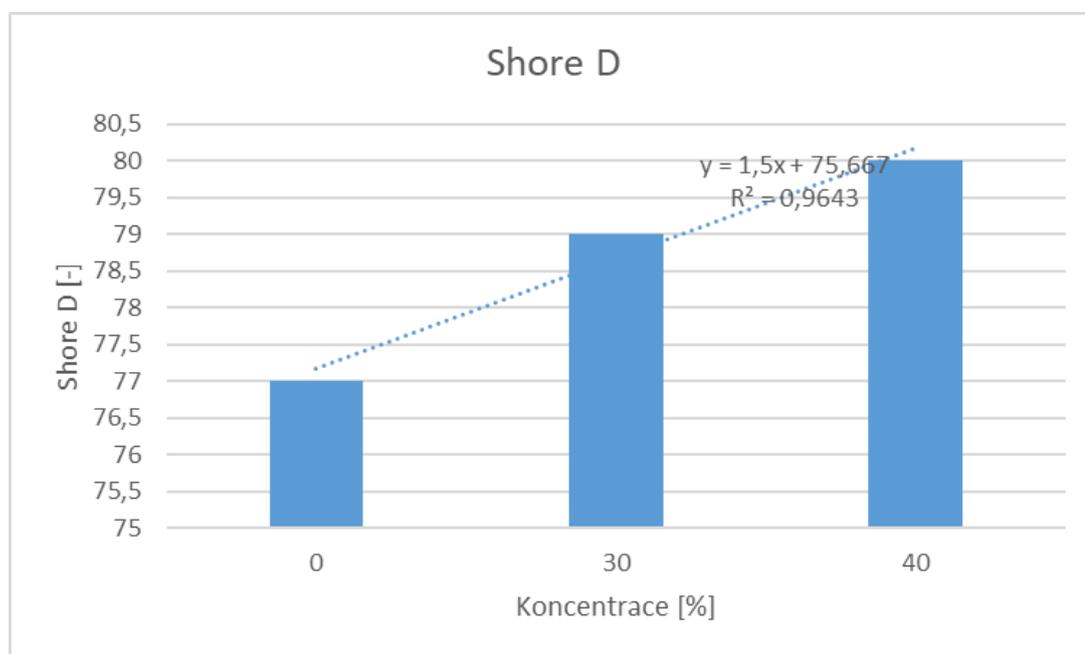


Obrázek 89 Zkušební těleso pro měření tvrdosti Shore D

Z výsledků, které se nacházejí v další tabulce a grafu, lze vidět, že dochází s rostoucí koncentrací ke zvyšování tvrdosti, a to opět lineárně, jak ukazuje rovnice spojnice trendu a její spolehlivost. Pro čisté PLA se naměřila tvrdost **77 Shore D**, dále pro 30 a 40 hm.% tvrdost **79 a 80 Shore D**.

Tabulka 17 Výsledek měření tvrdosti Shore D

Shore D			
Č. měř.	Koncentrace CIP [%]		
	0	30	40
1	77	79	81
2	76	79	80
3	76	79	79
4	77	76	81
5	77	77	80
Medián	77	79	80

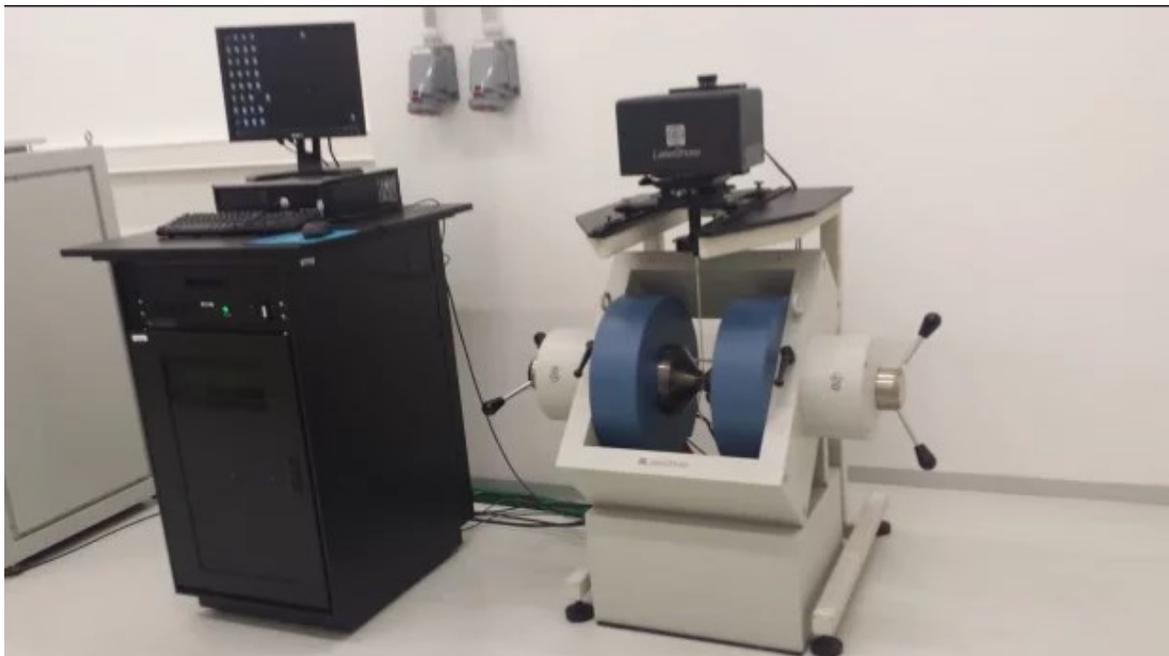


Obrázek 90 Grafické porovnání změřené tvrdosti Shore D

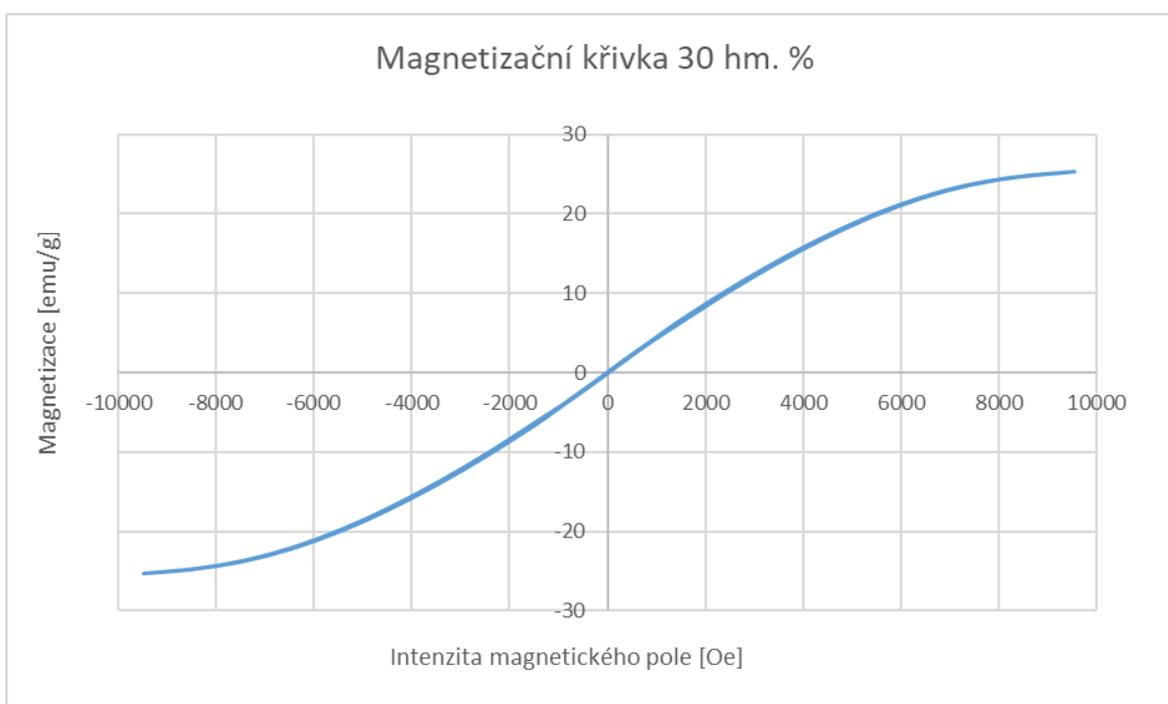
4.2.7 Magnetizační křivka

Další provedené měření proběhlo na vibračním magnetometru VSM 7407, jenž slouží k měření magnetizační křivky, ze které lze určit různé magnetické vlastnosti zkoušeného materiálu. Pro měření byly vylisovány z granulátu tabulky, ze kterých byly následně vystřiženy zkušební tělesa. Princip měření magnetizační křivky na tomto přístroji spočívá v umístění zkušební tělesa mezi elektromagnety, které vytvářejí magnetické pole, což vede zkušební těleso k vytvoření vlastního magnetického pole. Zároveň zkušební těleso kmitá mezi elektromagnety, čímž indukuje elektrický proud na cívkách, ze kterého se poté

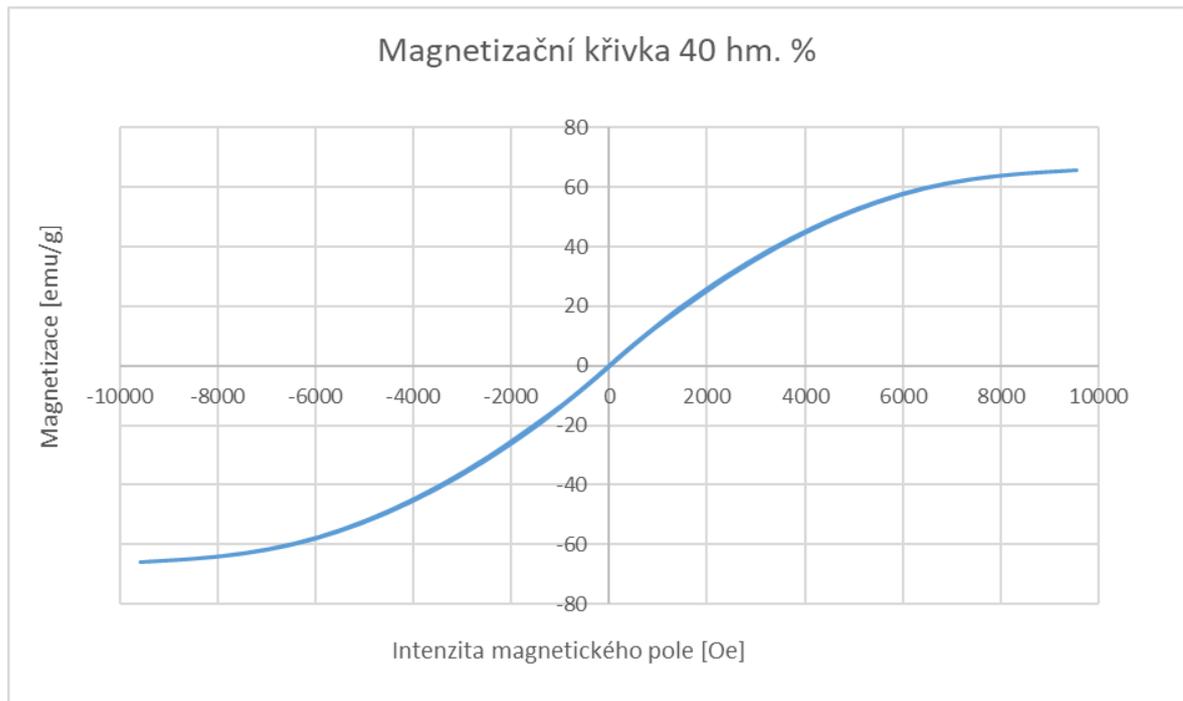
určuje magnetizace. Změnou intenzity a směru magnetického pole poté získáváme magnetizační křivku.



Obrázek 92 Vibrační magnetometr VSM 7407 [80]



Obrázek 91 Magnetizační křivka 30 hm.%



Obrázek 93 Magnetizační křivka 30 hm. %

Z výsledků, jenž jsou zobrazeny na Obrázcích 92 a 93, lze vidět, že maximální magnetická saturace pro 30 hm.% je **25,28 emu/g**, mezitím co saturace u 40 hm.% dosahuje hodnoty **65,83 emu/g**, z čehož lze určit, že zvýšením koncentrace o 10 hm.% se magnetická saturace zvýšila 2,6krát. Další magnetické vlastnosti, konkrétně koercivitu a remanentní magnetizaci, lze určit z rovnice spojnice trendu vrchní křivky, která byla pro obě koncentrace nastavena jako polynomická 5. stupně. Pro koncentraci 30 hm.% rovnice vypadá následovně:

$$y = 6,66E - 20x^5 - 1,65E - 17x^4 - 2,43E - 11x^3 + 5,26E - 10x^2 + 4,31E - 03x + 8,68E - 02$$

A pro 40 hm. %:

$$y = 4,73E - 19x^5 + 4,49E - 18x^4 - 1,10E - 10x^3 - 2,78E - 09x^2 + 1,31E - 02x + 2,64E - 01$$

Dosazením do rovnic za $x=0$ lze získat remanentní magnetizaci. Pro zjištění koercivity je nutné zjistit hodnotu x pro $y=0$, proto byla rovnice vložena do programu Desmos, kde byla zobrazena právě hledaná hodnota x pro $y=0$. Remanentní magnetizace je zbytková magnetizace, která zbude v materiálu poté, co přestane působit vnější magnetické pole, koercivita je na druhou stranu vlastnost, která určuje odolnost materiálu proti demagnetizaci.

Výsledky saturace, remanentní magnetizace a koercivity lze nalézt v následující souhrnné tabulce.

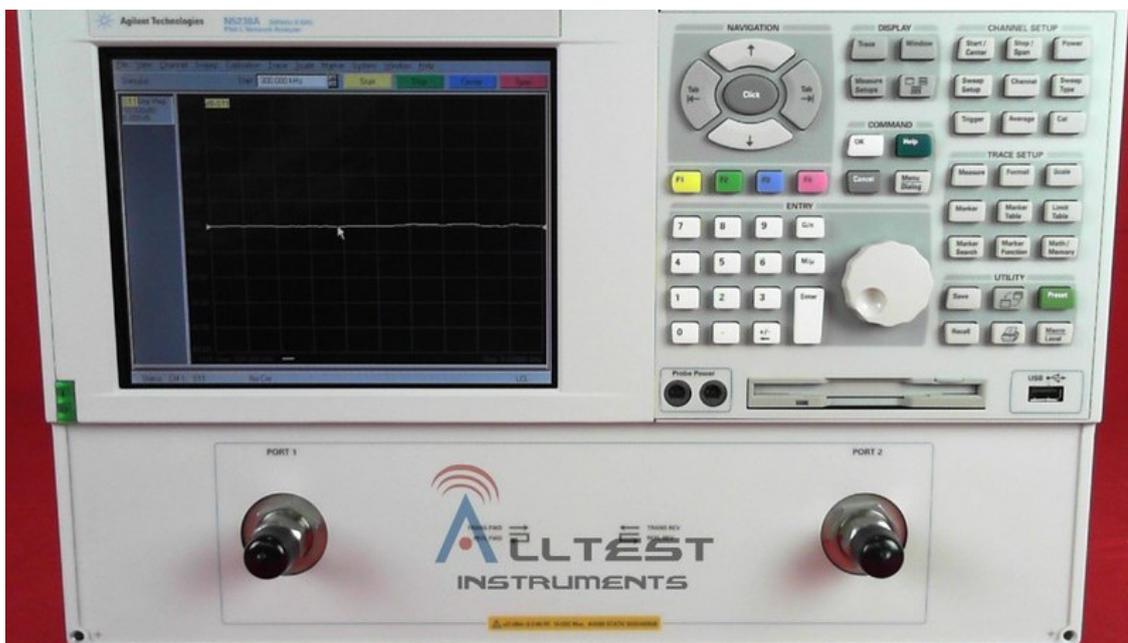
Tabulka 18 Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti			
Koncentrace CIP [%]	Saturace [emu/g]	Remanentní magnetizace [emu/g]	Koercivita [Oe]
30	25,28	0,0868	15,85
40	65,83	0,264	15,67

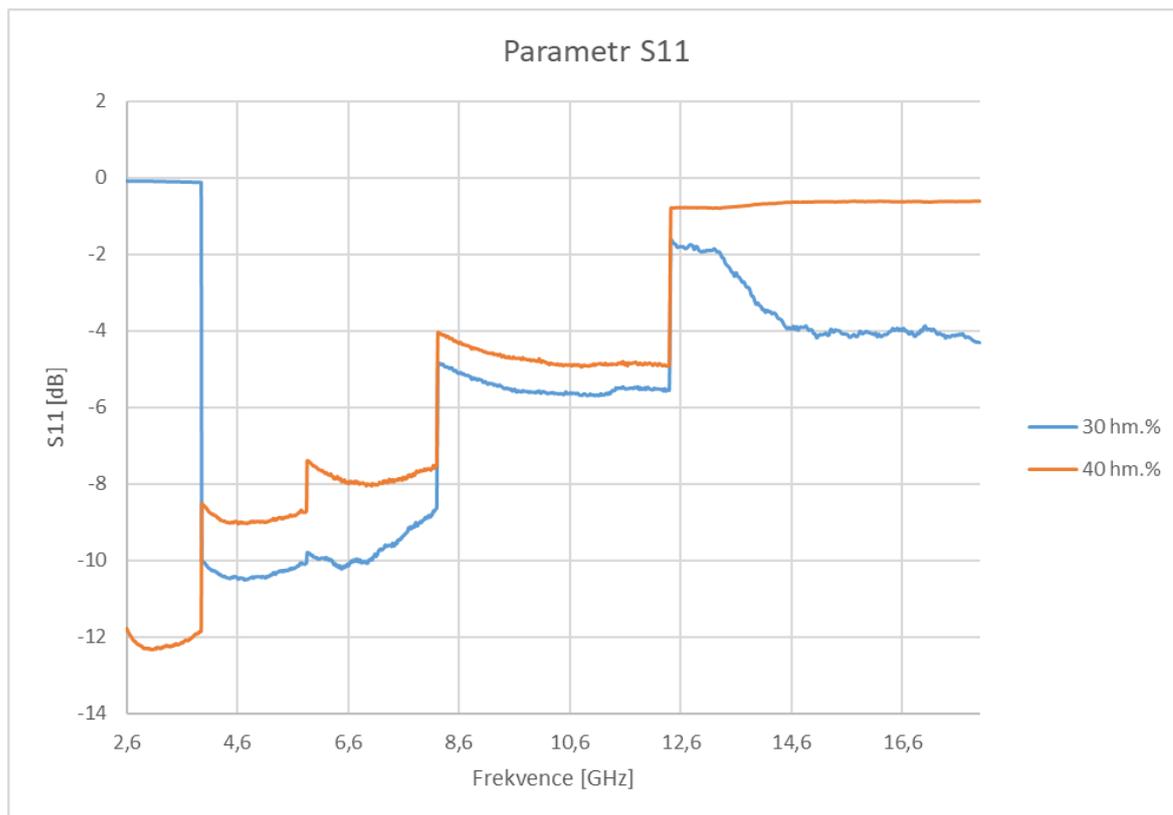
Výsledky z Tabulky 18 poukazují na fakt, že zvýšením koncentrace karbonylového plniva došlo k nárůstu remanentní magnetizace, ale koercivita se změní minimálně. Obecně podle výsledných grafů je možné říct, že materiál je feromagnetický, jelikož průběh křivky není lineární, a jedná se o magneticky měkkou látku, a to z důvodu úzké hysterezní smyčky. I právě nízká zbytková magnetizace odpovídá vlastnostem karbonylového železa.

4.2.8 Stínění elektromagnetického záření

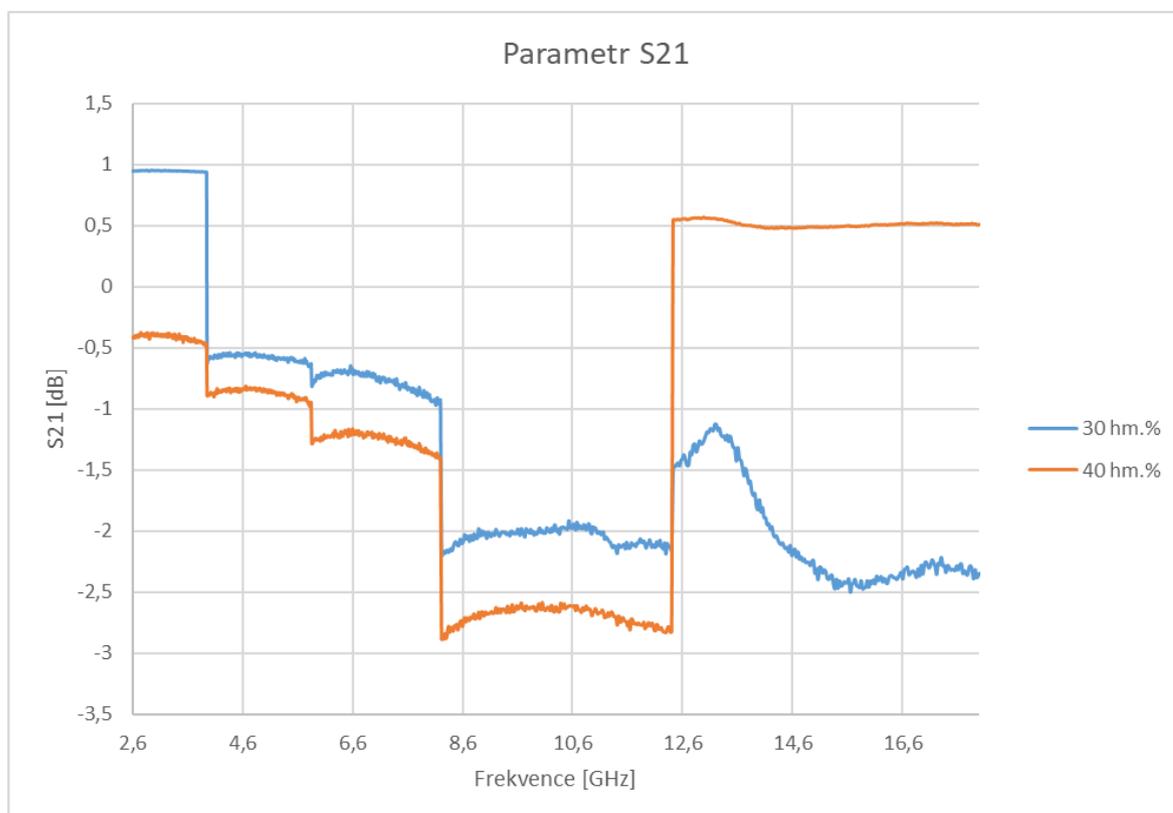
Dalším provedeným měřením bylo stínění elektromagnetického záření, které probíhalo na přístroji Agilent PNA-L-N5230A s vlnovody WR62, 90, 137, 187, 284, pro nichž byly vytištěny tělesa dle jejich rozměrů.



Obrázek 94 Agilent PNA-L-N5230A [81]



Obrázek 95 Výsledek měření – parametr S11



Obrázek 96 Výsledek měření – parametr S21

Z měření jsme získali v rozmezí 2,6 až 18 GHz parametry S_{11} , jenž představuje odrazivost, a S_{21} , jehož hodnota reprezentuje stínící vlastnost.

Tabulka 19 Rozměry těles podle použitého vlnovodu

Rozměry zkušebních těles [mm]	
WR284	72,136 x 34,036
WR187	47,5488 x 22,1488
WR137	34,8488 x 15,7988
WR90	22,86 x 10,16
WR62	15,7988 x 7,8994

Výsledky poukazují na to, že odrazivost, znázorněná parametrem S_{11} na Obrázku 95, se zlepšuje s rostoucí koncentrací karbonylového železa. Z Obrázku 96 lze vidět, že stínící vlastnost se také zlepšuje s rostoucí koncentrací železa, kdy nejlepších výsledků stínění se dosahuje u koncentrace 40 hm.% v rozmezí frekvencí **8,5 až 12,4 GHz**, kdy parametr S_{21} se pohybuje mezi **-2,58 až -2,88 dB**. Podobně vysoké hodnoty lze pak najít u koncentrace 30 hm.% při rozmezí frekvencí **15 až 16,9 GHz**, při nichž se pohybuje parametr S_{21} od **-2,3** až po **-2,5 dB**.

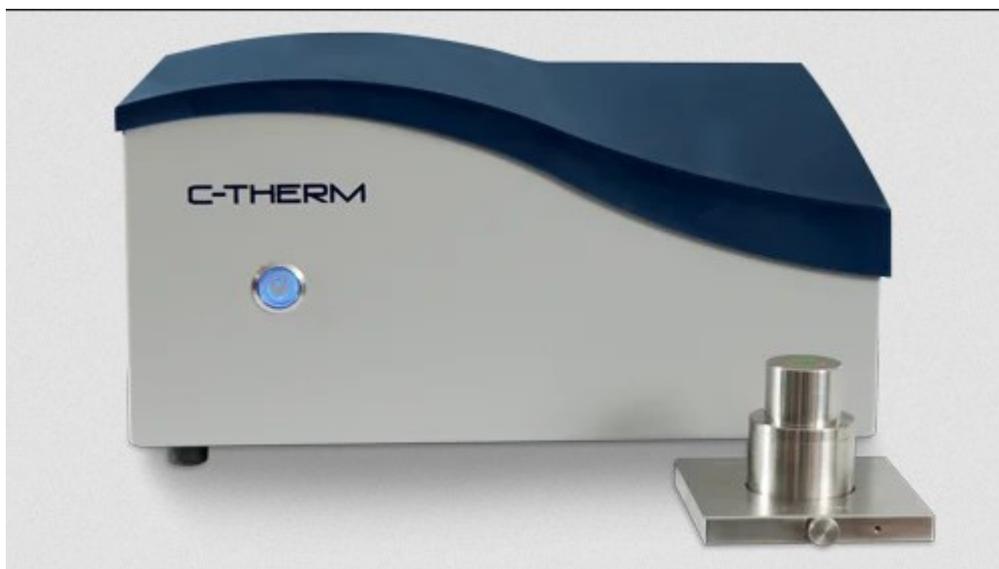


Obrázek 97 Zkušební tělesa – stínění

Stále však toto nejsou dostatečně vysoké hodnoty, aby šlo tyto koncentrace označit jako dobrý stínící materiál, vzhledem k tomu, že hodnoty parametru S_{21} nedosahují -10 dB. Ke zlepšení stínících vlastností by došlo při zvýšení koncentrace karbonylového železa, jelikož z výsledků jde vidět, že s rostoucí koncentrací plniva se stínící vlastnost zlepšuje, avšak při vyšších koncentracích nastává problém se zpracovatelností materiálu.

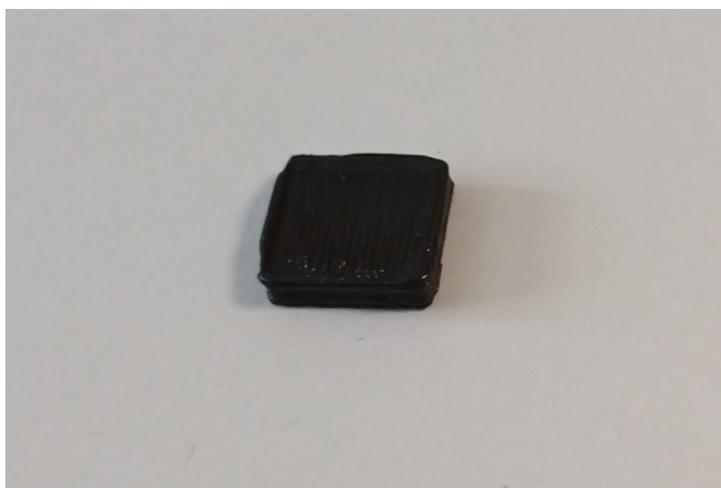
4.2.9 Měření tepelné vodivosti

Další zkouškou materiálu bylo měření tepelné vodivosti na analyzátoru tepelné vodivosti C-Therm Technologies model TCI.



Obrázek 98 Analyzátor tepelné vodivosti od C-Therm Technologies [82]

Pro tuto zkoušku byly vytištěny tělesa o rozměrech 20x20x0,5 mm z obou koncentrací. Měření spočívá v umístění zkoušeného tělesa na senzor, kde se nachází topná spirála, do které je přiváděn určitý proud, čímž spirála vydá teplo. Dále díky speciálnímu prstenci kolem senzoru je zaručena jednorozměrná výměna tepla. Zvýšení teploty vede v senzoru ke změně napětí, které odpovídá tepelné vodivosti, a to tak, že prudká změna napětí naznačuje materiál s nižší tepelnou vodivostí a mírná změna na druhou stranu materiál s vyšší tepelnou vodivostí.



Obrázek 99 Zkušební těleso pro měření tepelné vodivosti

Výstupem měření je tepelná vodivost popisující vedení tepla uvnitř materiálu, ze které lze vypočítat efuzivita materiálu, jež charakterizuje výměnu tepla s okolním prostředím. Efuzivita byla vypočítána ze vzorce:

$$E = \sqrt{k * \rho * c}$$

kde **k** je tepelná vodivost, **ρ** hustota materiálu a **c** měrná tepelná kapacita.

Tabulka 21 Výsledek měření tepelné vodivosti pro koncentraci 30 hm. %

30 hm. %		
Číslo měření	Tepelná vodivost k [W/mK]	Efuzivita (Ws ^{1/2} /m ² K)
1	0,37966	698,97
2	0,38432	703,25
3	0,38607	704,84
4	0,38612	704,89
5	0,38737	706,03
6	0,38973	708,18
Průměr	0,38555	704,36

Tabulka 20 Výsledek měření tepelné vodivosti pro koncentraci 40 hm. %

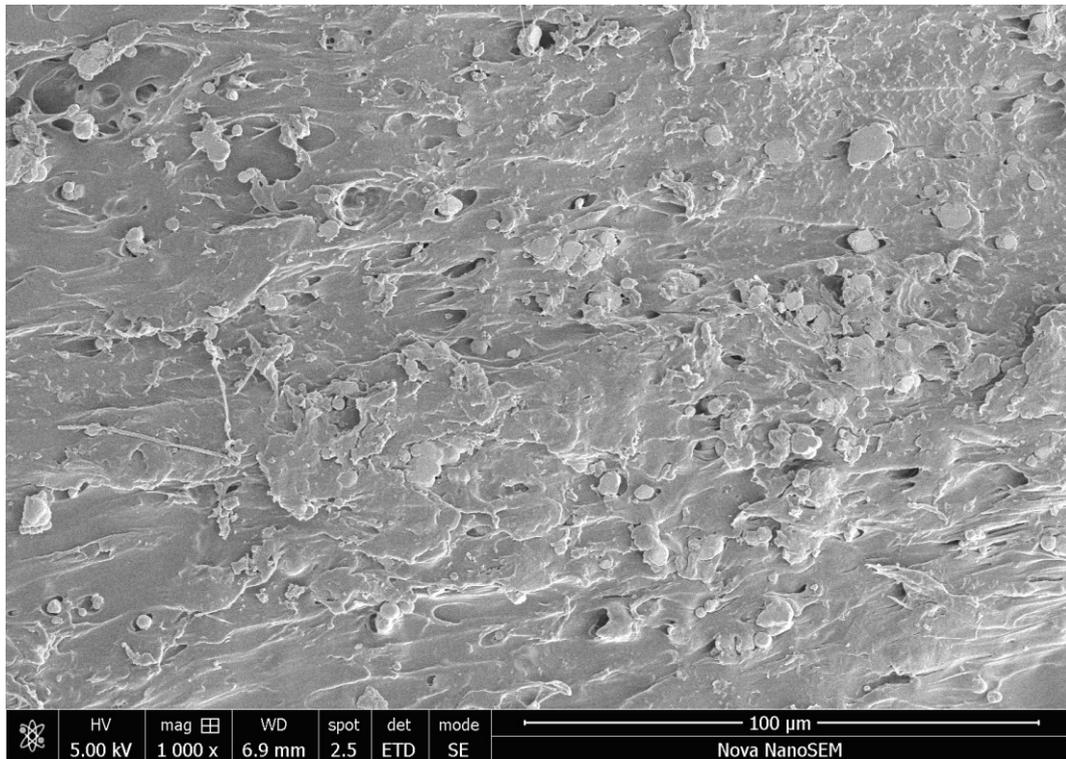
40 hm. %		
Číslo měření	Tepelná vodivost k [W/mK]	Efuzivita (Ws ^{1/2} /m ² K)
1	0,46280	818,94
2	0,45969	816,19
3	0,46197	818,20
4	0,45801	814,69
5	0,45982	816,30
6	0,45934	815,87
Průměr	0,46027	816,70

Výsledky, na Tabulkách 20 a 21, znázorňují naměřenou tepelnou vodivost pro obě koncentrace. Tepelná vodivost koncentrace 30 hm. % je **0,38555 W/mK**, avšak při růstu koncentrace na 40 hm. % se zvýšila vodivost o 19,4 % na hodnotu **0,46027 W/mK**. Efuzivita se také zvýšila z hodnoty **704,36** na **816 Ws^{1/2}/m²K**, tedy o skoro 16 %. Když se tyto hodnoty porovnájí s čistým PLA, jehož hodnota tepelné vodivosti je 0,13 W/mK, zjistíme, že u koncentrací došlo k nárůstu vodivosti o **196,5 %** pro 30 hm. % a **254,1 %** pro 40 hm. %.

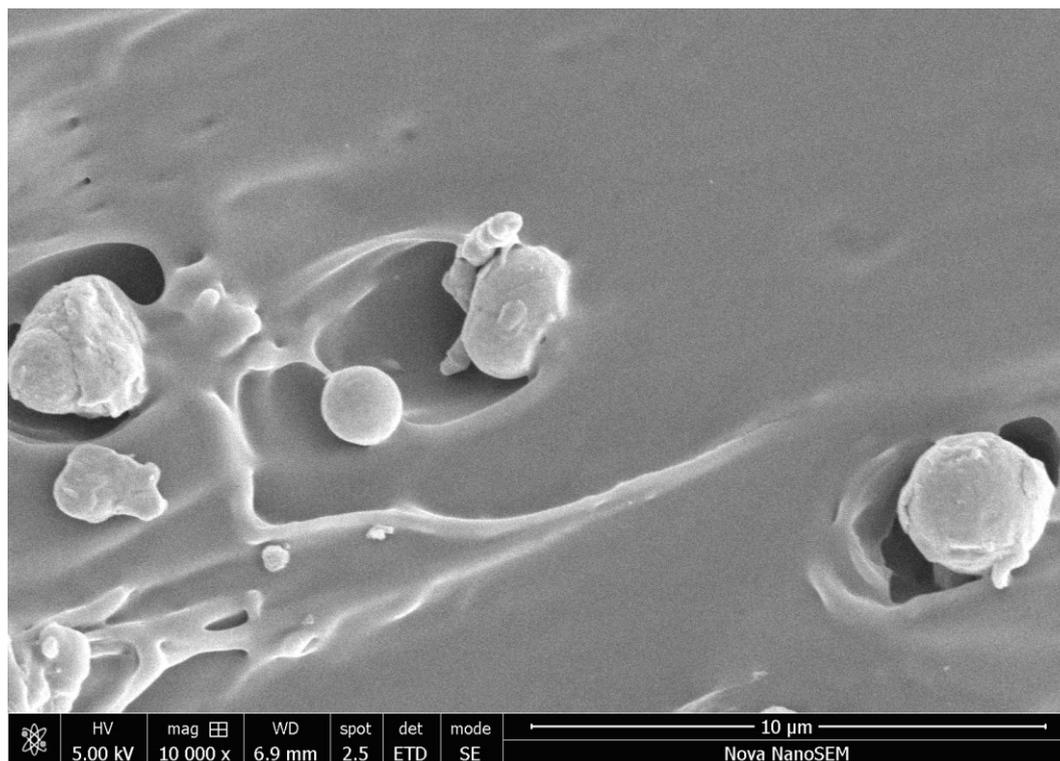
4.2.10 SEM

Podobně jako u filamentu z termoplastického elastomeru i zde byly pořízeny snímky koncentrací ze skenovacího elektronového mikroskopu FEI Nova NanoSEM 450.

4.2.10.1 Mikroskopie SEM - 30 hm.% CIP

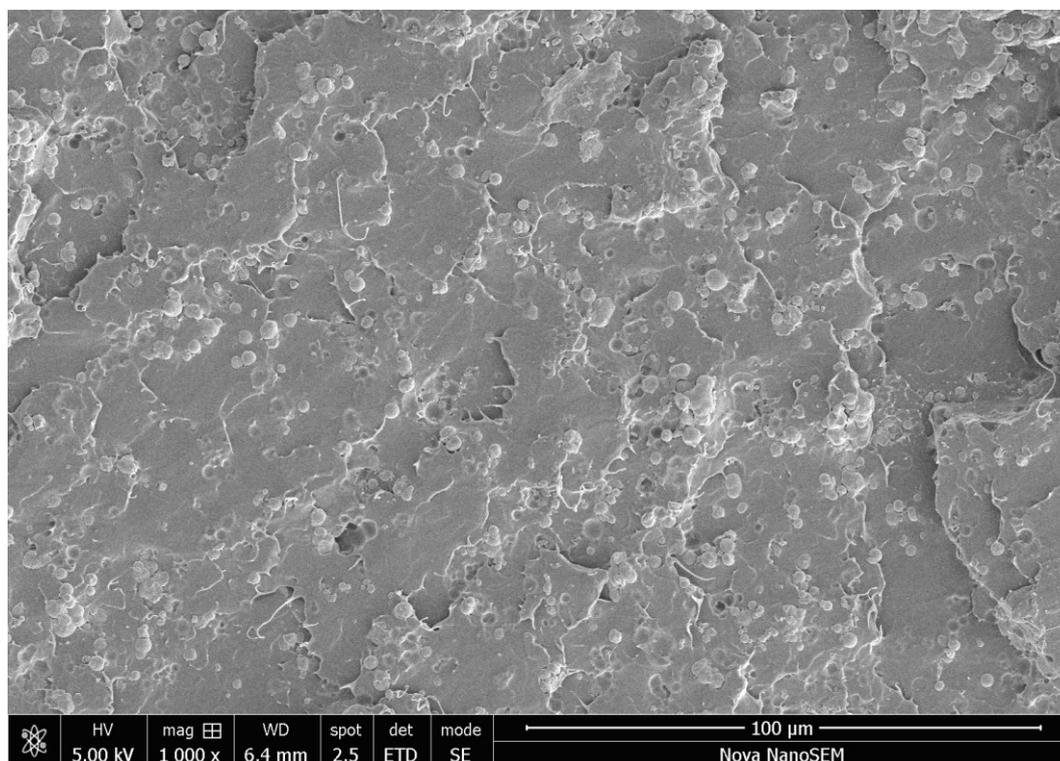


Obrázek 100 SEM, Mikroskopie 30 hm.% (100 μm)

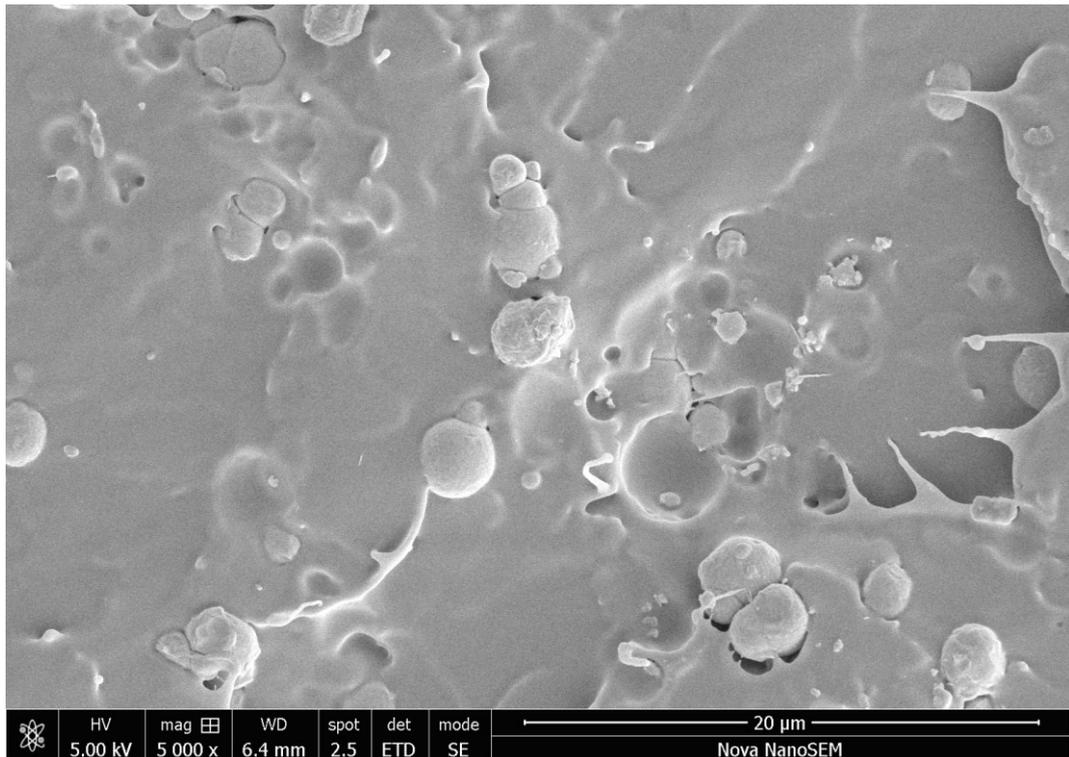


Obrázek 101 SEM, Mikroskopie 30 hm.% (10 μm)

4.2.10.2 Mikroskopie SEM - 40 hm.% CIP

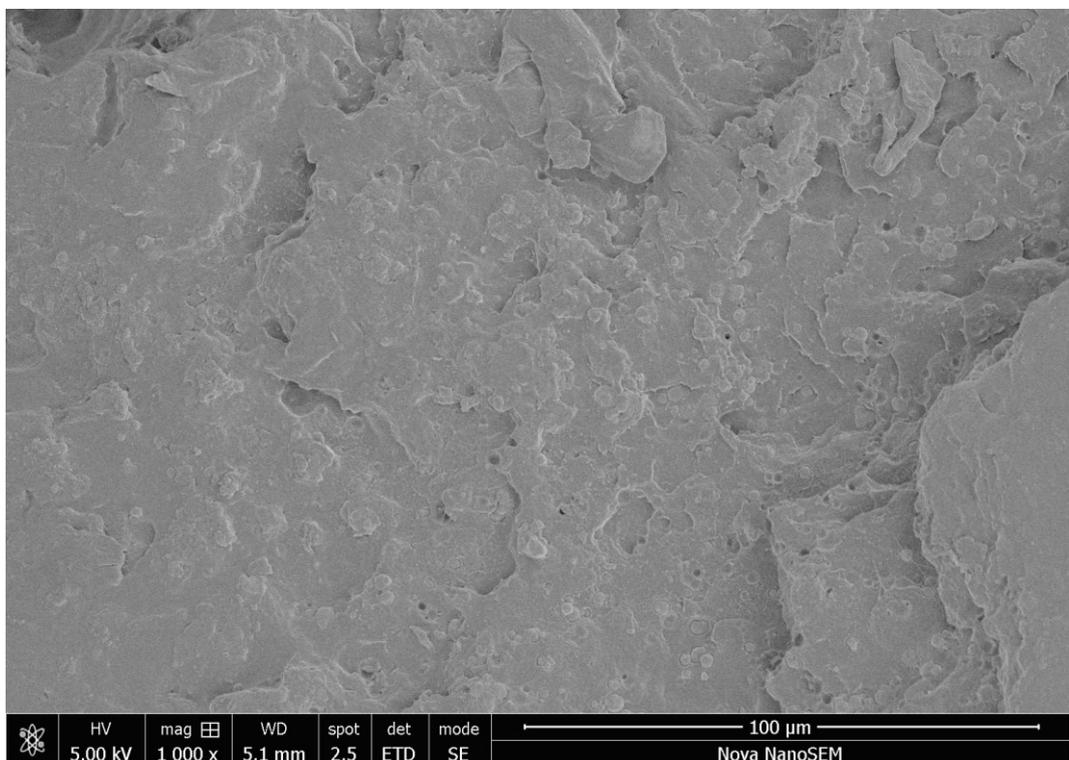


Obrázek 102 SEM, Mikroskopie 40 hm.% (100 μm)

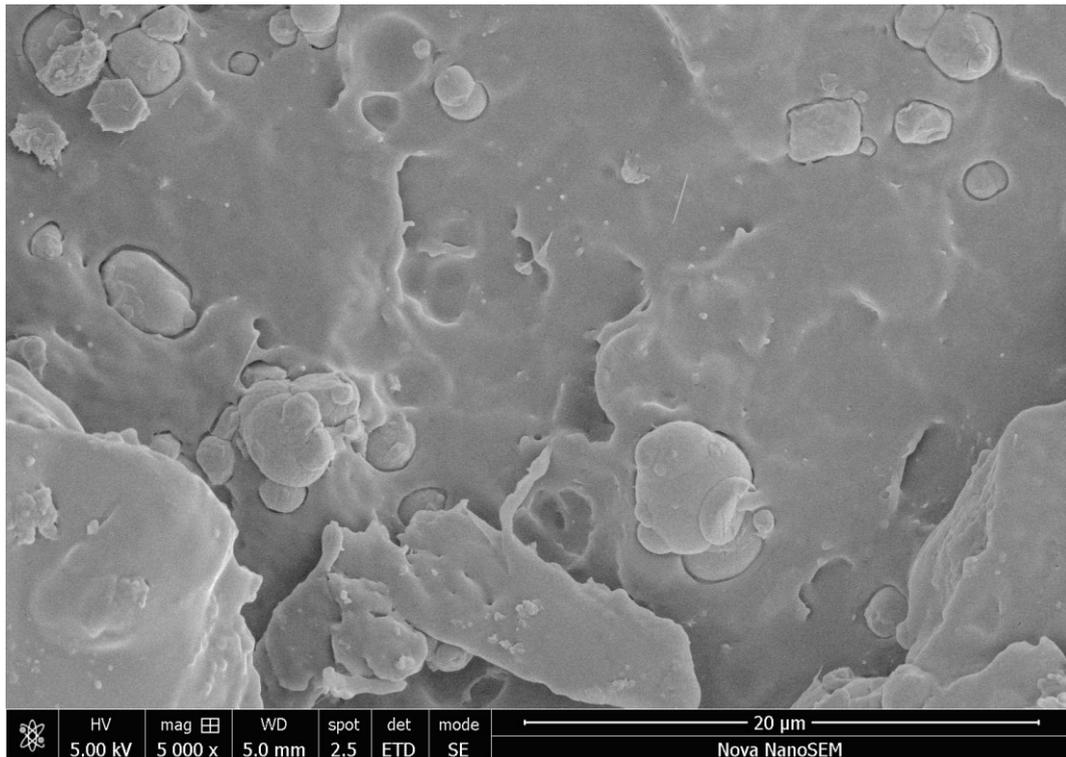


Obrázek 103 SEM, Mikroskopie 40 hm.% (20 μm)

4.2.10.3 Mikroskopie SEM - 50 hm.% CIP



Obrázek 104 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (100 μm)



Obrázek 105 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (20 μm)

4.2.10.4 Zhodnocení snímků

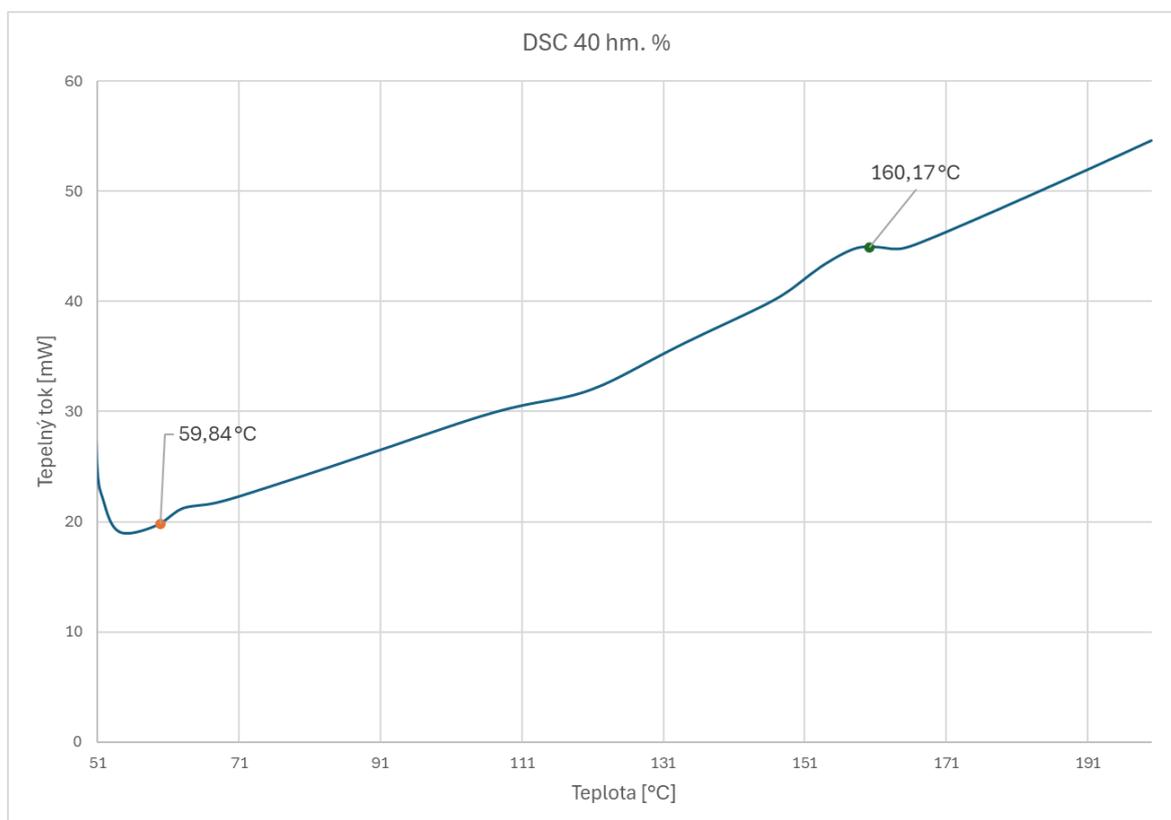
Na snímcích opět lze vidět částice karbonylového železa, jejichž počet se zvyšuje s rostoucí koncentrací. Také si lze všimnout, podobně jako u snímků filamentu z termoplastického elastomeru, tendence částic karbonylového železa se shlukovat.

4.2.11 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Pro tyto dvě koncentrace také byla provedena diferenciální skenovací kalorimetrie, a to na stejném zařízení, tedy konkrétně Pyris 1 DSC, pro koncentraci 40 hm.%.



Obrázek 107 Pyris 1 DSC



Obrázek 106 Diferenciální skenovací kalorimetrie pro 40 hm.% CIP

Z výsledného grafu na Obrázku 106 lze vidět, že ke skelnému přechodu dochází přibližně při teplotě **59,84 °C** a k tání při teplotě **160,17 °C**. Při srovnání s materiálovým listem, kde teplota skelného přechodu se pohybuje mezi 55 až 60 °C a teplota tavení mezi 145 až 160 °C, zjistíme, že plnivo karbonylového železa nemá vliv na teploty fázový změn.

4.2.12 Zhodnocení materiálu a potenciální aplikace

Pro tyto materiály, jejichž matrice PLA je doplněna o karbonylové železo ve třech koncentracích, bylo vykonáno několik zkoušek, jež charakterizují materiál z několika ohledů. Opět se provedly tahové zkoušky, z nichž vyšlo najevo, že koncentrace 30 a 40 hm.% vykazují horší mechanické vlastnosti než původní čistý termoplast, lze tedy říct, že ke zpevnění došlo u nižší koncentrace, po které došlo ke zhoršení mechanických vlastností, jehož trend pokračuje zkoušenými vzorky. Dále se určovala tvrdost Shore D, jež opět poukázala na lineární růst tvrdosti, kdy oproti čistému PLA, jehož tvrdost byla určena na **77 Shore D**, došlo ke zvýšení na hodnoty **79** a **80 Shore D** pro koncentrace 30 a 40 hm.%. Následovalo měření magnetizační křivky, kdy výsledky poukázali na zvýšení magnetické saturace z hodnoty **25,28 Oe** u 30hm.% na **65,83 Oe** pro koncentraci 40 hm.%. Z průběhu magnetizační křivky se určilo, že materiál je feromagnetický a také magneticky měkký, a to z důvodu úzké hysterezní křivky. Poté se při měření stínění elektromagnetického záření pro obě koncentrace vytiskly zkušební tělesa jejichž rozměry odpovídaly využitým vlnodům. Výsledky měření charakterizovaly obě koncentrace jako špatné stínící materiály, jelikož nejvyšší dosažená hodnota parametru S_{21} byla **-2,88 dB**, což lze vyřešit zvýšením koncentrace plniva, avšak by došlo ke zhoršení zpracovatelských vlastností. Z měření tepelné vodivosti materiálů bylo zjištěno, že oproti čistému PLA se tepelná vodivost zvedla o **196,5** a **254,1 %** u koncentrací 30 a 40 hm.% na hodnoty **0,38555** a **0,46027 W/mK**. Také byly opět pořízeny snímky na skenovacím elektronovém mikroskopu Nova NanoSEM 450, na nichž lze vidět rostoucí počet částic se zvyšující koncentrací plniva. V poslední řadě byla provedena diferenciální skenovací kalorimetrie, z jejíž výsledků lze vyčíst, že ani v tomto případě plnivo z karbonylového železa nemá vliv na teploty fázových přeměn.

Z hlediska aplikace by se dal tento materiál použít pro stínění pouze v případě, že dojde ke zvýšení koncentrace plniva na takovou hodnotu, při níž by parametr S_{21} dosáhl nebo překonal -10 dB. Toto zvýšení koncentrace je však spojené se vznikem problémů při zpracování. Vzhledem k magnetickým vlastnostem vyrobeného materiálu by se dal použít na statory elektromotorů, které vyžadují právě úzkou hysterezní křivku, aby se

minimalizovali ztráty na elektromotoru. Podobně jako materiály z termoplastického elastomeru, lze tento kompozitní filament použít na tisk substrátu pro flíčkovou anténu. Přidáním plniva v podobě karbonylového prášku zvýšilo tepelnou vodivost materiál, což by mohlo vést k aplikaci v rámci pasivních chladičů, například tranzistorů, avšak pro ideální aplikaci by bylo nutné zvýšit koncentraci karbonylového železa. V případě této aplikaci by však bylo také vhodnější vyměnit PLA za více tepelně odolnější polymer, jako PETG nebo ABS. Za použití tiskárny s multimateriálovým systémem by byl možný v kombinaci s jinými materiály i tisk různých senzorů.



Obrázek 108 Vytištěná flíčková anténa, potenciální aplikace – spodní část (substrát) je z vyrobeného PLA filamentu s karbonylovým železem o koncentraci 30 hm.% a samotná anténa je z vodivého PLA od společnosti Protopasta.

ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly vyrobeny a charakterizovány dva kompozitní materiály, jejichž matrice byla doplněna o plnivo v podobě karbonylového železa. Jako první byl vyroben filament z termoplastického elastomeru Vistamaxx 6202, po kterém následovala výroba filamentu z více konvenčního 3D tiskového materiálu, kterým byl polymer PLA. Pro materiál z termoplastického elastomeru bylo vybráno 5 koncentrací určených k výrobě, konkrétně 50, 60, 70, 80 a 90 hm.% CIP. U PLA byly k výrobě určeny 3 koncentrace, 30, 40 a 50 hm.%. U obou materiálů bylo prvním krokem vysušení materiálu před samotným mícháním směsí na vytlačovacím stroji Scientific Twin Screw Extruder, a také na Brabenderu pro koncentrace 80 a 90 hm.% CIP. Po vytlačení směsi došlo ke granulaci buď na granulacním zařízení, nebo drtiči. Pro výrobu flexibilního filamentu byl využit stroj 3devo Composer 450, kde došlo k výrobě malého množství struny pro všechny koncentrace. Výroba filamentu probíhala prvně na vytlačovacím stroji Bocomatic EB-30, pro nějž byla vyrobena vytlačovací hlava s vhodným průměrem otvoru pro vytlačování filamentu, avšak během času, který byl na stroji pro vytlačování filamentu rezervován, se nepodařilo stabilizovat a optimalizovat vytlačovací proces, z toho důvodu se filament vytlačil na stroji Everplast. Zde proběhlo vytlačení filamentu 30 a 40 hm.%, avšak koncentrace 50 hm.% se nepodařila vytlačit z důvodu vyskytlých problémů při procesu extruze.

Poté došlo k testování 3D tisku vyrobených filamentů na tiskárna Prusa i3 MK3S. U flexibilních filamentů se podařilo tisknout až od koncentrace 70 hm.%, a to velmi nízkými rychlostmi a s mírným ucpáním extruderu. Nejlépe tisknutelná byla koncentrace 90 hm.% u níž však také bylo nutné použít nízkých rychlostí, ale k ucpávání docházelo zřídka. Možným řešením ucpávání by byla komplexní konstrukční úprava extruderu, popřípadě speciální kovová vložka, která by navedla filament k trysce a neumožňovala by filamentu vzpříčení. U PLA tisk probíhal bezproblémově, v softwaru PrusaSlicer bylo nutné nastavit vyšší násobič extruze kvůli širší toleranci průměru struny, také se snížila extruzní teplota z 210 °C, pro klasické PLA, na 195 °C. Jelikož bylo nutné vytisknout zkušební tělesa pro charakterizaci materiálů, byla pro tisk flexibilních materiálu použita tiskárna Everplast, která zpracovává materiál v podobě granulátu. Pro PLA byla použita kombinace tiskárny MK3S a Everplast.

Pro charakterizaci flexibilních filamentů bylo provedeno několik zkoušek, konkrétně tahová zkouška, měření tvrdosti, magnetoreologie, diferenciální skenovací kalorimetrie a také byly pořízeny snímky pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. Z tahových zkoušek bylo

zjištěno, že do koncentrace 70 hm.% probíhá zvýšení tažnosti materiálů, avšak po překročení této koncentrace dojde k prudkému zhoršení mechanických vlastností materiálu. U měření tvrdosti podle Shore A výsledky poukázaly na lineární růst tvrdosti od tvrdosti čistého termoplastického elastomeru 60 Shore A až po 86 Shore A u koncentrace 90 hm.%. Dále provedená magnetoreologie na koncentraci 70 hm.% poskytla výsledky, z nichž lze usoudit, že tato koncentrace vykazuje malý magnetoreologický efekt. Při vystavení magnetickému poli totiž dojde ke zvýšení elastického modulu o 7 %, avšak ztrátový modul neboli viskózní složka, se prakticky nezmění. Toto je dáno tím, že při vyšších koncentracích dochází k úbytku viskoelastických zón, které právě tento jev umožňují. Z grafu diferenciální skenovací kalorimetrie vyšlo najevo, že karbonylové železo nemá vliv na teploty fázových přeměn v materiálu. Na snímcích pořízených na skenovacím elektronovém mikroskopu lze vidět, jak se počet částic zvyšuje s rostoucí koncentrací, také byla pozorována tendence plniva se shlukovat do takzvaných aglomerátů.

Pro PLA byla opět provedena diferenciální skenovací kalorimetrie a zkoušky tahu a tvrdosti. Kromě toho bylo také provedeno měření stínících vlastností materiálu, tepelné vodivosti a magnetizační křivky. Z výsledků tahových zkoušek vyšlo najevo, že ke zpevnění materiálu došlo při nižší koncentraci a mechanické vlastnosti zkoušených koncentrací se již pouze zhoršují. Měření tvrdosti podle Shore D opět poukázalo na lineárně rostoucí tvrdost se zvyšující koncentrací plniva, kdy od tvrdosti čistého PLA, 77 Shore D, se bylo možné dostat až na tvrdost 80 Shore D pro koncentraci 40 hm.%. Při měření stínících vlastností byl měřen parametr S_{11} , který popisuje odrazivost, a parametr S_{21} , jenž charakterizuje stínící vlastnosti materiálu. Nejlepšího výsledků se dosáhlo na rozpětí frekvencí 8,5 až 12,4 GHz, kdy parametr S_{21} se pohybuje mezi -2,58 až -2,88 dB. Tyto hodnoty však nejsou dostačující pro stínění, jelikož jako dobře stínící lze materiál označit až při dosažení -10 dB. Těchto hodnot lze dosáhnout vyšší koncentrací plniva, které je však spojené s problémy během zpracování. Z měření tepelné vodivosti vyšlo najevo, že přidání karbonylového železa zvýšilo tepelnou vodivost o 196,5 a 254,1 % pro koncentrace 30 a 40hm.% oproti čistému PLA. Magnetizační křivka charakterizovala materiál jako feromagnetický s nízkou remanentní magnetizací a úzkou hysterezní křivkou, což definuje tento materiál jako magneticky měkký. Mezi koncentracemi došlo ke zvýšení magnetické saturace z 25,28 Oe, pro koncentraci 30 hm.%, až na 65,83 Oe u koncentrace 40 hm.%. Diferenciální skenovací kalorimetrie opět neprokázala žádný vliv karbonylového železa na teploty fázových přeměn v materiálu.

Z pořízených SEM snímků lze opět vidět rostoucí počet částic karbonylového železa při zvyšování koncentrace plniva.

Z hlediska aplikace by se daly použít flexibilní filamenty při tisk 4D struktur, vyšší koncentrace, jako 80 a 90 hm.%, pro stínění mikrovln, nebo jako substrát pro flíčkovou anténu. Vzhledem k magnetizační křivce materiálů z PLA, by se daly tyto materiály aplikovat při tisku statorů elektromotorů, a to z důvodu, že tyto součásti potřebují právě úzkou hysterezní křivku a remanentní magnetizaci. Podobně jako flexibilní filamenty, by se i tyto materiály daly použít pro tisk substrátů flíčkových antén.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Anon., [b.r.]. *PŘÍRUČKA 3D TISKAŘE UŽIVATELSKÝ MANUÁL 3D TISKÁREN: - ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+ KIT -ORIGINAL PRUSA i3 MK3S+ CZE* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3s_cs.pdf
- [2] CHAPMAN, Arun, 2022. The complete history of 3D printing. *UltiMaker* [online]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>
- [3] HORVATH, Joan C. a Rich CAMERON, 2018. *Mastering 3D printing in the classroom, library, and lab*. New York, NY: Apress. ISBN 9781484235010.
- [4] HORVATH, Joan a Rich CAMERON, 2020. *Mastering 3D printing : a guide to modeling, printing, and prototyping*. [New York, New York]: Apress. ISBN 9781484258422.
- [5] JEAN-CLAUDE ANDRÉ, 2017. *From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing*. B.m.: John Wiley & Sons. ISBN 9781119482772.
- [6] KENNEDY, Eileen, 2021. A Brief History of 3D Printing. *openpress.universityofgalway.ie* [online]. Dostupné z: <https://openpress.universityofgalway.ie/designingthedigitalworld/chapter/brief-history-3d-printing/>
- [7] L JYOTHISH KUMAR, Pulak M PANDEY a DAVID IAN WIMPENNY, 2019. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. B.m.: Singapore Springer Singapore Springer. ISBN 9789811303050.
- [8] REDWOOD, Ben, FILEMON SCHÖFFER a Brian GARRET, 2018. *The 3D printing handbook : technologies, design and applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V. ISBN 9789082748505.
- [9] SAVINI, A. a G.G. SAVINI, 2015. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)* [online]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1109/histelcon.2015.7307314>

- [10] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN, 2019. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing* [online]. **35**(35), 1286–1296. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- [11] Anon., [b.r.]. „Darwin" RepRap self-replicating 3D printer (Generation I) | Science Museum Group Collection. *collection.sciencemuseumgroup.org.uk* [online]. Dostupné z: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8357315/darwin-reprap-self-replicating-3d-printer-generation-i-printer>
- [12] PARK, Rachel, 2013. Father of 3D Printing Sells Significant Share Holding in 3DS. *3D Printing Industry* [online]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/father-of-3d-printing-sells-significant-share-holding-in-3ds-7579/>
- [13] Anon., [b.r.]. Binder Jetting (BJ) Machines: Definition, Applications, Types, Advantages, and Disadvantages. *www.xometry.com* [online]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/binder-jetting-bj-machines/>
- [14] KRISTIANV, 2022. Binder Jetting jako revoluční nástroj aditivní výroby kovových dílů. *Additive Systems* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://additivesystems.cz/binder-jetting-jako-revolucni-nastroj-aditivni-vyroby-kovovych-dilu/>
- [15] AHN, Dong-Gyu, 2021. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* [online]. **8**(2), 703–742. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- [16] Anon., [b.r.]. What is Directed Energy Deposition additive manufacturing and how does it work? *Engineering Product Design* [online]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/>
- [17] DASS, Adrita a Atieh MORIDI, 2019. State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings* [online]. **9**(7), 418. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/coatings9070418>
- [18] SVETLIZKY, David, Mitun DAS, Baolong ZHENG, Alexandra L. VYATSKIKH, Susmita BOSE, Amit BANDYOPADHYAY, Julie M. SCHOENUNG, Enrique J. LAVERNIA a Noam ELIAZ, 2021. Directed energy deposition (DED) additive

manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today* [online]. 49. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>

[19] ANG, Gedeon, 2023. Bed Slinger (3D Printing): What Is It Exactly? *All3DP* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/bed-slinger-3d-printing-simply-explained/>

[20] Anon., 2024. CoreXY vs Bed Slinger: A Comparative Analysis of 3D Printer Motion Systems. *Creality Store* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://store.creality.com/blog/corexy-vs-bed-slinger>

[21] SCHWAAR, Carolyn, 2022. What Is Material Jetting? – 3D Printing Basics. *All3DP Pro* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>

[22] Anon., 2022. SLS 3D Printing – The Ultimate Guide. *All3DP Pro* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>

[23] Anon., 2014. Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. *Lboro.ac.uk* [online]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>

[24] Anon., [b.r.]. Sheet Lamination | Siemens Software. *Siemens Digital Industries Software* [online]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/sheet-lamination/55512>

[25] Anon., 2021. Sheet Lamination. *Dassault Systèmes* [online]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/make/guide/process/sheet-lamination>

[26] SCHWAAR, Carolyn, 2024. The 7 Main Types of 3D Printing Technology. *All3DP* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/#section-sheet-lamination>

[27] Anon., 2019. Vat Polymerization: What Are SLA, DLP, and LCD? *All3DP* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/vat-polymerization-what-are-sla-dlp-and-lcd/>

[28] Anon., [b.r.]. What is Vat Photopolymerization, its types, and applications? *Engineering Product Design* [online]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge->

base/vat-photopolymerization/

[29] MAX VON ÜBEL, 2017. 3D Printing Materials – All You Need to Know in 2019. *All3DP* [online]. B.m.: All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>

[30] O'CONNELL, Jackson, 2021. PLA Plastic/Material: All You Need to Know. *All3DP* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>

[31] FREY, Shawn a Anatol LOCKER, 2023. PETG Filament: All You Need to Know. *All3DP* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/petg-filament-all-you-need-to-know/>

[32] Anon., [b.r.]. All About ABS 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition. *www.xometry.com* [online]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>

[33] POLYGENIS, Tasos, [b.r.]. ABS 3D Printing: A Comprehensive Guide to Materials, Techniques, and Applications. *www.wevolver.com* [online]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/abs-3d-printing-a-comprehensive-guide-to-materials-techniques-and-applications>

[34] TECHNOLOGIES, Plastic Extrusion, 2021. What is ABS Material? - Plastic Extrusion Technologies. *plasticextrusiontech.net* [online]. Dostupné z: <https://plasticextrusiontech.net/what-is-abs-material/>

[35] Anon., [b.r.]. *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with ASA* [online]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/asa/>

[36] CAROLO, Lucas, 2023. 3D Printing ASA: The Best Settings & Printing Tips. *All3DP* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-asa/>

[37] Anon., [b.r.]. Polycarbonate 3D Printing: Definition, Purpose, How It Works, Advantages, and Examples. *www.xometry.com* [online]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/polycarbonate-3d-printing/>

[38] Anon., [b.r.]. Polycarbonate 3D Printing: In-depth Guide | Top 3D Shop. *Digital Manufacturing Store Top 3D Shop* [online]. Dostupné

z: <https://top3dshop.com/blog/polycarbonate-3d-printing-in-depth-guide>

[39] Anon., [b.r.]. *Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Polycarbonate* [online].

Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polycarbonate/>

[40] BAHAR, Anis, Sofiane BELHABIB, Sofiane GUESSASMA, Ferhat BENMAHIDDINE, Ameer El Amine HAMAMI a Rafik BELARBI, 2022. Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate. *Energies* [online]. **15**(10), 3686. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/en15103686>

[41] KONDO, Hironori, Jackson O'CONNELL a Matteo PARENTI, 2023. The Best Polycarbonate (PC) Filaments of 2023. *All3DP* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/polycarbonate-pc-filament-basics-best-brands/>

[42] V, Carlota, 2020. All you need to know about Polycarbonate (PC) for 3D printing. *3Dnatives* [online]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/polycarbonate-pc-for-3d-printing-110220204/>

[43] SRIRAM RENGANATHAN, 2019. Flexible 3D Printing Filament – Which Should You Chose? *All3DP* [online]. B.m.: All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose/>

[44] ANGELOPOULOS, Panagiotis M., Michail SAMOUHOS a Maria TAXIARCHOU, 2020. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication; a review. *Materials Today: Proceedings* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1016/j.matpr.2020.07.069](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069)

[45] KNIGHT, M. a D. CURLISS, 2003. Composite Materials. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. 455–468 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1016/b0-12-227410-5/00128-9](https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00128-9)

[46] ALL3DP, 2018. All 10 Types of 3D Printing Technology in 2019. *All3DP* [online]. B.m.: All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>

[47] MATSUZAKI, Ryosuke, Masahito UEDA, Masaki NAMIKI, Tae-Kun JEONG,

Hirosuke ASAHARA, Keisuke HORIGUCHI, Taishi NAKAMURA, Akira TODOROKI a Yoshiyasu HIRANO, 2016. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports* [online]. **6**(1). Dostupné z: doi:10.1038/srep23058

[48] DONG, Qiangsheng, Ming ZHANG, Xingxing ZHOU, Yi SHAO, Jiayi LI, Liming WANG, Chenglin CHU, Feng XUE, Qingqiang YAO a Jing BAI, 2021. 3D-printed Mg-incorporated PCL-based scaffolds: A promising approach for bone healing. *Materials Science and Engineering: C* [online]. **129**, 112372 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1016/j.msec.2021.112372](https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112372)

[49] KIM, Heejin, Yuree OH, Jun Yeon HWANG, Sook Young MOON a Min Wook LEE, 2022. High-performance continuous carbon fiber composite filament via solution process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. **115**, 466–475 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1016/j.jiec.2022.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.08.033)

[50] MAUREL, Alexis, Matthieu COURTY, Benoit FLEUTOT, Hugues TORTAJADA, Kalappa PRASHANTHA, Michel ARMAND, Sylvie GRUGEON, Stéphane PANIER a Loic DUPONT, 2018. Highly Loaded Graphite–Polylactic Acid Composite-Based Filaments for Lithium-Ion Battery Three-Dimensional Printing. *Chemistry of Materials* [online]. **30**(21), 7484–7493 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1021/acs.chemmater.8b02062](https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b02062)

[51] MOHAMMADI ZERANKESHI, Meysam, Sayed Shahab SAYEDAIN, Mobina TAVANGARIFARD a Reza ALIZADEH, 2022. Developing a novel technique for the fabrication of PLA-graphite composite filaments using FDM 3D printing process. *Ceramics International* [online]. **48**(21), 31850–31858 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.117

[52] HUANG, Jan-Chan, 2002. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Advances in Polymer Technology* [online]. **21**(4), 299–313 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1002/adv.10025](https://doi.org/10.1002/adv.10025)

[53] LIU, Zhaobing, Qian LEI a Shuaiqi XING, 2019. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. **8**(5), 3741–3751. Dostupné

z: [doi:10.1016/j.jmrt.2019.06.034](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034)

[54] OU, Runqing, Rosario A. GERHARDT, Courtney MARRETT, Alexandre MOULART a Jonathan S. COLTON, 2003. Assessment of percolation and homogeneity in ABS/carbon black composites by electrical measurements. *Composites Part B: Engineering* [online]. **34**(7), 607–614 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: [doi:10.1016/s1359-8368\(03\)00085-4](https://doi.org/10.1016/s1359-8368(03)00085-4)

[55] PODSIADŁY, Bartłomiej, Piotr MATUSZEWSKI, Andrzej SKALSKI a Marcin SŁOMA, 2021. Carbon Nanotube-Based Composite Filaments for 3D Printing of Structural and Conductive Elements. *Applied Sciences* [online]. **11**(3), 1272. Dostupné z: [doi:10.3390/app11031272](https://doi.org/10.3390/app11031272)

[56] RYAN, Kirstie R., Michael P. DOWN, Nicholas J. HURST, Edmund M. KEEFE a Craig E. BANKS, 2022. Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. *eScience* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.esci.2022.07.003](https://doi.org/10.1016/j.esci.2022.07.003)

[57] KRUPIČKA, Svatopluk, 2007. *Magnetismus: Historia a Současnost*. B.m.: Fyzikální ústav AV ČR.

[58] Anon., [b.r.]. Magnety | Eduportál Techmania. edu.techmania.cz [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magnety>

[59] J M D COEY, 2009. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge: Cambridge University Press, . [Reprinted. ISBN 9780521816144.

[60] FYZMATIK.PISE.CZ, [b.r.]. Faradayův magnetooptický jev. fyzmatik.pise.cz [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://fyzmatik.pise.cz/1869-faradayuv-magnetoopticky-jev.html>

[61] Anon., [b.r.]. Magnetické látky | Eduportál Techmania. edu.techmania.cz [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magneticke-latky>

[62] Anon., [b.r.]. Magnetické materiály. publi.cz [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>

[63] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA, 2006a. Encyklopedie fyziky.

- fyzika.jreichl.com* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [64] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA, 2006b. Encyklopedie fyziky. *fyzika.jreichl.com* [online] [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>
- [65] JAAFAR, M.F., Faizal MUSTAPHA a Mazli MUSTAPHA, 2021. Review of current research progress related to magnetorheological elastomer material. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. **15**, 5010–5045. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.058](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.058)
- [66] KALLIO, Marke, 2005. *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers* [online]. VTT Technical Research Centre of Finland [cit. 2024-03-01]. VTT Technical Research Centre of Finland. Dostupné z: <https://publications.vtt.fi/pdf/publications/2005/P565.pdf>
- [67] LI, Yancheng, Jianchun LI, Weihua LI a Haiping DU, 2014. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. *Smart Materials and Structures* [online]. **23**(12), 123001 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/12/123001](https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/12/123001)
- [68] LIU, Taixiang a Yangguang XU, 2019. Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications. *Smart and Functional Soft Materials* [online]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.5772/intechopen.85083](https://doi.org/10.5772/intechopen.85083)
- [69] MOUČKA, Robert, Michal SEDLAČÍK a Eva KUTÁLKOVÁ, 2018. Magnetorheological elastomers: Electric properties versus microstructure. *Nucleation and Atmospheric Aerosols* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1063/1.5060697](https://doi.org/10.1063/1.5060697)
- [70] MUNTEANU, A, A. RONZOVA, E. KUTALKOVA, P. DROHSLER, R. MOUCKA, M. KRACALIK, O BILEK, S A MAZLAN a M. SEDLACIK, 2022. Reprocessed magnetorheological elastomers with reduced carbon footprint and their piezoresistive properties. *Scientific Reports* [online]. **12**(1) [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1038/s41598-022-16129-y](https://doi.org/10.1038/s41598-022-16129-y)

- [71] SEDLACIK, M., M. MRLIK, V. BABAYAN a V. PAVLINEK, 2016. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures* [online]. **135**, 199–204 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.037>
- [72] Anon., [b.r.]. Diamagnetic Levitation. *High Field Magnet Laboratory (HFML)* [online]. Dostupné z: <https://www.ru.nl/hfml/research/levitation-explained/diamagnetic-levitation/>
- [73] FICO, Daniela, Daniela RIZZO, Valentina DE CAROLIS, Francesco MONTAGNA, Elisabetta PALUMBO a Carola Esposito CORCIONE, 2022. Development and characterization of sustainable PLA/Olive wood waste composites for rehabilitation applications using Fused Filament Fabrication (FFF). *Journal of Building Engineering* [online]. **56**, 104673 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: doi:[10.1016/j.jobbe.2022.104673](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104673)
- [74] Anon., [b.r.]. Carbonyl Iron Powder. *BASF Aerospace Materials and Technologies* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://aerospace.basf.com/carbonyl-iron-powder.html>
- [75] Anon., [b.r.]. Filament Maker ONE: Advanced 3D Filament Extruder | 3devo. *www.3devo.com* [online]. Dostupné z: <https://www.3devo.com/filament-maker-one-composer-precision>
- [76] Anon., [b.r.]. 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [77] YOUNÈS ARBAOUI, PHILIPPE AGACIAK, Alexis CHEVALIER, Vincent LAUR, Azar MAALOUF, Julien VILLE, PHILIPPE ROQUEFORT, Thierry AUBRY a Patrick QUÉFFELEC, 2017. 3D printed ferromagnetic composites for microwave applications. *Journal of Materials Science* [online]. **52**(9), 4988–4996 [vid. 2023-11-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0737-3>
- [78] ADMIN, 2024b. Sušárna vakuová MEMMERT VO400 vč. skříňky. *Cps.utb.cz* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://cps.utb.cz/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/kondicionovani-tepelne-upravy/susarna-vakuova-memmert-vo400-vc-skrinky>
- [79] Anon., [b.r.]. Středový soustruh a vřetenový soustruh TOS SUI 50 - Nabídka na

Machineseeker. *www.machineseeker.cz* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.machineseeker.cz/tos-sui+50/i-11525015>

[80] ADMIN, 2024a. Magnetometr vibrační 7407. *Cps.utb.cz* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://cps.utb.cz/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/elektricke-magneticke-a-tepelne-vlastnosti-materialu/magnetometr-vibracni-7407>

[81] Anon., [b.r.]. N5230A Agilent Keysight | Network Analyzer | Alltest Instruments. *Alltest Instruments* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://alltest.net/categories/products/N5230A-Agilent-Keysight>

[82] Anon., [b.r.]. TCi Thermal Conductivity Analyzer. *C-Therm Technologies Ltd.* [online]. Dostupné z: <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/tci-thermal-conductivity-analyzer/>

[83] Anon., [b.r.]. Carbonyl iron powder – made by its inventor! *electronics-electric.basf.com* [online] [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: https://electronics-electric.basf.com/global/en/electronics/products/carbonyl_iron_powder.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojdimenzionální
FDM	Fused Deposition Modeling
STL	Surface Tessellation Language
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
SHS	Selective Heat Sintering
FFF	Fused Filament Fabrication
DLP	Digital Light Processing
SLM	Selective Laser Melting
UV	Ultra Violet
PLA	Kyselina polyléčná
PETG	Polyethylentereftalát-modifikovaný glykolem
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
TPU	Termoplastický polyuretan
CIP	Carbonyl Iron Particles
TPE	Termoplastický elastomer
LOM	Laminated Object Manufacturing
dB	Jednotka zisku v porovnání s půlvlnným dipólem
PMMA	Polymethylmethakrylát
UAM	Ultrasound Additive Manufacturing
PC	Polykarbonát
TPA	Termoplastický polyamid

- TPC Termoplastický kopolyester
- GHz Jednotka frekvence, GigaHertz
- TPS Termoplastický elastomer na bázi styrolu
- $\Omega \cdot \text{cm}$ Měrný elektrický odpor
- SEM Scanning Electron Microscope
- DCM Dichlormethan
- GPa Jednotka tlaku
- G-KÓD Seznam příkazů pro 3D tiskárnu
- USB Universal Serial Bus
- MPa Jednotka tlaku
- PM Prášková metalurgie
- MIM Plastické vstřikování kovů
- RPM Otáčky za minutu
- PTFE Polytetrafluorethylene
- BSE Zpětně odražené elektrony
- SE Sekundární elektrony
- DSC Diferenciální skenovací kalorimetrie

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Charles Hull [12].....	12
Obrázek 2 První tiskárna uskupení RepRap Darwin [11].....	13
Obrázek 3 Binder Jetting [8].....	15
Obrázek 4 Directed Energy Deposition [16]	17
Obrázek 5 FDM tiskárna [8].....	18
Obrázek 6 Material Jetting [8].....	21
Obrázek 7 Powder Bed Infusion [8]	23
Obrázek 8 Sheet Lamination [46].....	24
Obrázek 9 Vat Photopolymerization [8].....	25
Obrázek 10 Upravená tisková hlava pro impregnaci v trysce [47].....	31
Obrázek 11 Proces zamíchání plniva při pokojové nebo zvýšené teplotě [48]	31
Obrázek 12 Proces výroby kompozitního filamentu s použitím rozpouštědla [51]	32
Obrázek 13 Obsah uhlíkových nanotrubic v polymerní matrici a) pod perkolační mezí, b) nad elektrickou perkolační mezí, ale pod mechanickou perkolační mezí c) nad mechanickou perkolační mezí [55]	33
Obrázek 14 Vistamaxx 6202.....	41
Obrázek 15 Prášek karbonylového železa [74].....	42
Obrázek 16 Scientific Twin Screw Extruder	43
Obrázek 17 Hnětič Brabender.....	45
Obrázek 18 Drtič.....	46
Obrázek 19 Navážka	46
Obrázek 20 Nadrcený materiál	47
Obrázek 21 Vytlačovací stroj na filament 3devo Composer 450 [75]	47
Obrázek 22 Průběh průměru filamentu.....	48
Obrázek 23 Vytlačené filamenty o koncentraci 80 (vlevo) a 90 (vpravo) hm.%	49
Obrázek 24 Prusa i3 MK3S [76].....	49
Obrázek 25 Ucpaný extruder	50
Obrázek 26 Filament po vytažení z extruderu	51
Obrázek 27 Kovová vložka pro zabránění vzpříčení filamentu [77].....	51
Obrázek 28 Tiskárna Everplast.....	52
Obrázek 29 Podextruze	53
Obrázek 30 Tiskové teploty	54
Obrázek 31 Vytištěné zkušební těleso pro tahovou zkoušku	54
Obrázek 32 Rozměry zkušební tělesa pro tahovou zkoušku [mm]	55

Obrázek 33 Testometric MT350-5CT	56
Obrázek 34 Zkušební tělesa tahové zkoušky – čistý Vistamaxx 6202	57
Obrázek 35 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro čistý Vistamaxx 6202	57
Obrázek 36 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 50 hm.% CIP	58
Obrázek 37 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 50 hm.% CIP	58
Obrázek 38 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 60 hm.% CIP	59
Obrázek 39 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 60 hm.% CIP	59
Obrázek 40 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 70 hm.% CIP	60
Obrázek 41 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 70 hm.% CIP	60
Obrázek 42 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 80 hm.% CIP	61
Obrázek 43 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 80 hm.% CIP	61
Obrázek 44 Zkušební tělesa tahové zkoušky – 90 hm.% CIP	62
Obrázek 45 Graf – Výsledek tahové zkoušky pro koncentraci 90 hm.% CIP	62
Obrázek 46 Závislost prodloužení při přetržení na rostoucí koncentraci CIP	63
Obrázek 47 Rozměry zkušební tělesa	64
Obrázek 48 Tvrdoměr Polymertest	65
Obrázek 49 Zkušební těleso pro zkoušku tvrdosti	65
Obrázek 50 Graf závislosti tvrdosti Shore A na koncentraci CIP	66
Obrázek 51 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (200 μm)	67
Obrázek 52 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (20 μm)	68
Obrázek 53 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (100 μm)	68
Obrázek 54 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (200 μm)	69
Obrázek 55 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (100 μm)	69
Obrázek 56 SEM, Mikroskopie 60 hm.% (20 μm)	70
Obrázek 57 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (200 μm)	70
Obrázek 58 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (100 μm)	71
Obrázek 59 SEM, Mikroskopie 70 hm.% (20 μm)	71
Obrázek 61 SEM, Mikroskopie 80 hm.% (100 μm)	72
Obrázek 60 SEM, Mikroskopie 80 hm.% (200 μm)	72
Obrázek 62 SEM, Mikroskopie 80 hm.% (20 μm)	73
Obrázek 63 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (200 μm)	74
Obrázek 64 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (100 μm)	74
Obrázek 65 SEM, Mikroskopie 90 hm.% (5 μm)	75
Obrázek 66 Rotační reometr Anton-Paar MCR 502	76
Obrázek 67 Grafické znázornění výsledků magnetoreologie	78

Obrázek 68 Výsledek DSC pro koncentraci 50 hm.% CIP	80
Obrázek 69 PLA Luminy LX175U	82
Obrázek 70 Vakuová sušárna MEMMERT VO400 [78]	83
Obrázek 71 Extrudovaná struna.....	84
Obrázek 72 Získaný granulát.....	84
Obrázek 73 Vytlačovací stroj Bocomatic EB-30.....	85
Obrázek 74 Soustruh SUI 50 – ilustrativní obrázek [79].....	86
Obrázek 75 Rozměry vytlačovací hlavy	86
Obrázek 76 Soustružnický nůž – vnitřní uběrací.....	87
Obrázek 77 Vrták zbroušený na 40°	88
Obrázek 78 Vyrobené vytlačovací hlava	88
Obrázek 79 Vytlačený filament	90
Obrázek 80 Zkušební tisk	91
Obrázek 81 Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku	92
Obrázek 82 Zkušební tělesa – čisté PLA	92
Obrázek 83 Výsledek tahové zkoušky – čisté PLA.....	93
Obrázek 84 Zkušební tělesa – 30 hm.%	93
Obrázek 85 Zkušební tělesa 40 hm.%	94
Obrázek 86 Výsledek tahové zkoušky – 30hm.%	94
Obrázek 87 Výsledek tahové zkoušky – 40 hm.%	95
Obrázek 88 Porovnání výsledků tahové zkoušky	95
Obrázek 89 Zkušební těleso pro měření tvrdosti Shore D.....	96
Obrázek 90 Grafické porovnání změřené tvrdosti Shore D.....	97
Obrázek 91 Magnetizační křivka 30 hm.%	98
Obrázek 92 Vibrační magnetometr VSM 7407 [80]	98
Obrázek 93 Magnetizační křivka 30 hm.%	99
Obrázek 94 Agilent PNA-L-N5230A [81]	100
Obrázek 95 Výsledek měření – parametr S11	101
Obrázek 96 Výsledek měření – parametr S21	101
Obrázek 97 Zkušební tělesa – stínění	102
Obrázek 98 Analyzátor tepelné vodivosti od C-Therm Technologies [82].....	103
Obrázek 99 Zkušební těleso pro měření tepelné vodivosti.....	103
Obrázek 100 SEM, Mikroskopie 30 hm.% (100 μm).....	105
Obrázek 101 SEM, Mikroskopie 30 hm.% (10 μm).....	106
Obrázek 102 SEM, Mikroskopie 40 hm.% (100 μm).....	106

Obrázek 103 SEM, Mikroskopie 40 hm.% (20 μm).....	107
Obrázek 104 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (100 μm).....	107
Obrázek 105 SEM, Mikroskopie 50 hm.% (20 μm).....	108
Obrázek 106 Diferenciální skenovací kalorimetrie pro 40 hm.% CIP	109
Obrázek 107 Pyris 1 DSC	109
Obrázek 108 Vytištěná flíčková anténa, potenciální aplikace – spodní část (substrát) je z vyrobeného PLA filamentu s karbonylovým železem o koncentraci 30 hm.% a samotná anténa je z vodivého PLA od společnosti Protopasta.	111

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Navážka pro koncentrace 50, 60, 70 hm.%	44
Tabulka 2 Navážka pro koncentrace 80 a 90 hm.%	44
Tabulka 3 Teploty na zónách vytlačovacího stroje	45
Tabulka 4 Teploty na hnětiči Brabender.....	45
Tabulka 5 Procesní podmínky vytlačování filamentu	48
Tabulka 6 Změna prodloužení při přetržení v závislosti na koncentraci CIP.....	63
Tabulka 7 Výsledky zkoušky tvrdosti Shore A	66
Tabulka 8 Výsledky magnetoreologie bez působení magnetického pole.....	77
Tabulka 9 Výsledky magnetoreologie s působením magnetického pole.....	78
Tabulka 10 Navážka	83
Tabulka 11 Teploty na zónách vytlačovacího stroje	83
Tabulka 12 Zkušební teploty pro vytlačování filamentu	89
Tabulka 13 Teploty zón při vytlačování filamentu.....	89
Tabulka 14 Teploty pro vytlačování filamentu na Everplast.....	90
Tabulka 15 Teploty pro tisk PLA na Everplast	91
Tabulka 16 Modul pružnosti.....	96
Tabulka 17 Výsledek měření tvrdosti Shore D.....	97
Tabulka 18 Magnetické vlastnosti	100
Tabulka 19 Rozměry těles podle použitého vlnovodu.....	102
Tabulka 20 Výsledek měření tepelné vodivosti pro koncentraci 40 hm.%	104
Tabulka 21 Výsledek měření tepelné vodivosti pro koncentraci 30 hm.%	104

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Vistamaxx 6202

Příloha P II: Materiálový list Luminy LX175U

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST VISTAMAXX 6202

Product Datasheet



Vistamaxx™ 6202 Performance Polymer

Product Description

Vistamaxx 6202 performance polymer is an olefinic elastomer produced using ExxonMobil Chemical's proprietary metallocene catalyst technology. It has excellent elastomeric properties, is easy to process and is compatible with a wide variety of materials. It is particularly good for thermoplastic compounding which requires excellent filler dispersion and acceptance.

Key Features

- Suitable for a wide range of film and compounding applications which require high filler acceptance such as sound deadening sheets and masterbatches.
- Other typical applications include calendared or extruded sheet/profiles and injection molded goods.
- Excellent adhesion to conventional or metallocene PP and PE.
- Very good elasticity and toughness.
- Very low seal initiation temperature combined with high seal strength when used as sealing layer of co-extruded structures.
- Very good chemical resistance and long term aging.
- Particularly good for thermoplastic and polyolefinic blends where a balance of flexibility, transparency and impact performance is required.
- Although not NSF certified, this product has a Material Supplier Form on file with NSF to facilitate its evaluation for use in applications requiring NSF certification.
- RoHS compliant.

General

Availability ¹	• Africa & Middle East • Asia Pacific	• Europe • Latin America	• North America
Applications	• Calendered Profiles • Calendered Sheeting • Cast Film	• Extruded Profiles • Extruded Sheeting • Injection Molding	• PP/TPE Modification
Uses	• Compounding	• Film	• Packaging
RoHS Compliance	• RoHS Compliant		
Form(s)	• Pellets		
Revision Date	• 08/06/2013		

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Density ²	0.863 g/cm ³	0.863 g/cm ³	ASTM D1505
Melt Index ² (190°C/2.16 kg)	9.1 g/10 min	9.1 g/10 min	ASTM D1238
Melt Mass-Flow Rate (MFR) ²	20 g/10 min	20 g/10 min	ExxonMobil Method
Ethylene Content	15 wt%	15 wt%	ExxonMobil Method

Hardness	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Durometer Hardness (Shore A)	66	66	ASTM D2240

Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tensile Stress at 100%	280 psi	1.93 MPa	ASTM D638
Tensile Stress at 300%	305 psi	2.10 MPa	ASTM D638
Tensile Strength at Break	> 798 psi	> 5.50 MPa	ASTM D638
Tensile Set	18 %	18 %	ExxonMobil Method
Elongation at Break	> 2000 %	> 2000 %	ASTM D638
Flexural Modulus - 1% Secant	1790 psi	12.3 MPa	ASTM D790

Elastomers	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tear Strength (Die C)	190 lbf/in	33.3 kN/m	ASTM D624

ExxonMobil Chemical Vistamaxx™ 6202
Performance Polymer

Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Vicat Softening Temperature	117 °F	47.2 °C	ExxonMobil Method

Additional Information

In accordance with FDA Food Contact Notification (FCN) 832, this product may be used as articles or components of articles used in contact with all food types under Conditions of Use B through H, as described in Table 2 of 21 CFR 176.170(c).

The base resin in this product is listed in the Chinese Positive List for allowed resins in food packaging materials (issued by China MoH, 11 Oct 2011) and additives that may be present in this product are authorized according to the National Standard of People's Republic of China GB9685-2008, Hygienic Standards for Uses of Additives in Food Containers and Packaging Materials.

EU Note: The composition of this product complies with the requirements for use in contact with food of EU Regulation 10/2011.

Please contact Customer Service for the official food law certificates which provide more detailed information.

For data specific to chemical resistance, refer to the Technical Literature (TL), Chemical Resistance of Vistamaxx Performance Polymer.

Legal Statement

For detailed Product Stewardship information, please contact Customer Service.

This product, including the product name, shall not be used or tested in any medical application without the prior written acknowledgement of ExxonMobil Chemical as to the intended use.

Processing Statement

Vistamaxx performance polymer has a wide temperature processing window. A good starting point for temperatures is 10°C above the highest melting point. This material does not require drying and can be compounded or used in a dry blend. Use conventional processing knowledge to ensure mixing of the materials.

Notes

Typical properties: these are not to be construed as specifications.

¹ Product may not be available in one or more countries in the identified Availability regions. Please contact your Sales Representative for complete Country Availability.

² Property specified in conventional unit of measure.

For additional technical, sales and order assistance: www.exxonmobilchemical.com/ContactUs

Worldwide and the Americas
ExxonMobil Chemical Company
22777 Springwoods Village Parkway
Spring, TX 77389-1425
USA

Asia Pacific
ExxonMobil Chemical Asia Pacific
1 HarbourFront Place
#06-00 HarbourFront Tower One
Singapore 098633

Europe, Middle East and Africa
ExxonMobil Chemical Europe
Hermessean 2
1831 Mechelen, Belgium

©2015 ExxonMobil. ExxonMobil, the ExxonMobil logo, the interlocking "X" device and other product or service names used herein are trademarks of ExxonMobil, unless indicated otherwise. This document may not be distributed, displayed, copied or altered without ExxonMobil's prior written authorization. To the extent ExxonMobil authorizes distributing, displaying and/or copying of this document, the user may do so only if the document is unaltered and complete, including all of its headers, footers, disclaimers and other information. You may not copy this document to or reproduce it in whole or in part on a website. ExxonMobil does not guarantee the typical (or other) values. Any data included herein is based upon analysis of representative samples and not the actual product shipped. The information in this document relates only to the named product or materials when not in combination with any other product or materials. We based the information on data believed to be reliable on the date compiled, but we do not represent, warrant, or otherwise guarantee, expressly or impliedly, the merchantability, fitness for a particular purpose, freedom from patent infringement, suitability, accuracy, reliability, or completeness of this information or the products, materials or processes described. The user is solely responsible for all determinations regarding any use of material or product and any process in its territories of interest. We expressly disclaim liability for any loss, damage or injury directly or indirectly suffered or incurred as a result of or related to anyone using or relying on any of the information in this document. This document is not an endorsement of any non-ExxonMobil product or process, and we expressly disclaim any contrary implication. The terms "we," "our," "ExxonMobil Chemical" and "ExxonMobil" are each used for convenience, and may include any one or more of ExxonMobil Chemical Company, Exxon Mobil Corporation, or any affiliate either directly or indirectly stewarded.

exxonmobilchemical.com

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST LUMINY LX175U

Luminy® LX175U

Polylactic Acid
Corbion

PROSPECTOR®

www.ulprospector.com

Technical Data

Product Description

PLA is a biobased polymer derived from natural resources and offers a significant reduction in carbon footprint compared to oil-based plastics.

Luminy LX175U is a high viscosity, low flow, amorphous, transparent PLA resin suitable for film extrusion, thermoforming or fiber spinning.

General

Material Status	• Commercial: Active
Literature ¹	• Processing - Sheet/Film Extrusion (English) • Technical Datasheet (English)
Availability	• Latin America • North America
Features	• Amorphous • Food Contact Acceptable • Low Flow • Compostable • High Viscosity • Renewable Resource Content
Uses	• Compounding • Fibers • Film
Agency Ratings	• ASTM D6400 • EC 2023/2006 • EU 94/62/EC • EC 1907/2006 (REACH) • EN 13432 • FDA FCN 178 • EC 1935/2004 • EU 10/2011
Appearance	• Clear/Transparent
Forms	• Pellets
Processing Method	• Fiber (Spinning) Extrusion • Film Extrusion • Thermoforming

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Density	1.24 g/cm ³	
Melt Mass-Flow Rate (MFR) ³		ISO 1133
190°C/2.16 kg	3.0 g/10 min	
210°C/2.16 kg	6.0 g/10 min	
Moisture Content	< 400 ppm	Karl Fisher
Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Modulus	3500 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress	45.0 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Break)	< 5.0 %	ISO 527-2
Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength (23°C)	< 5.0 kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature ⁴		ISO 75-2/B
0.45 MPa, Unannealed	55.0 to 60.0 °C	
Glass Transition Temperature	55.0 to 60.0 °C	DSC
Melting Temperature	145 to 160 °C	DSC
Optical	Nominal Value Unit	
Yellowness Index	< 38 YI	
Additional Information	Nominal Value Unit	Test Method
Monomer Residue	< 0.30 %	Internal Method
Stereochemical purity: 96% L-Isomer (Corbion method)		
Extrusion	Nominal Value Unit	
Drying Temperature	85 °C	
Drying Time	4.0 to 6.0 hr	
Suggested Max Moisture	0.025 %	
Hopper Temperature	20 to 40 °C	
Cylinder Zone 1 Temp.	170 to 190 °C	
Cylinder Zone 2 Temp.	190 to 210 °C	
Die Temperature	190 to 210 °C	

