

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Diplomová práce

**Porovnávání technologií 3D tisku z pohledu kvality a
mechanických vlastností**

Jakub Hylmar

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Hylmar

Zemědělské inženýrství

Inženýrství údržby

Název práce

Porovnání technologií 3D tisku z pohledu kvality a mechanických vlastností

Název anglicky

Comparison of 3D printing technologies in terms of quality and mechanical properties

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždění základních informací o technologii 3D tisku (FDM, SLA, MJP) a jejich vzájemné porovnání. Praktická část bude zaměřena na hodnocení kvality vytištěného výrobku a výzkumu mechanických vlastností. Pomocí zkušebních těles vyrobených různými metodami 3D tisku, tj. FDM, SLA a MJP bude proveden výzkum mechanických vlastností, ze kterého bude možné stanovit užité vlastnosti jednotlivých systémů pro praktickou aplikaci.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

3D tisk, mechanické vlastnosti, obrazová analýza, textura povrchu, výzkum.

Doporučené zdroje informací

BURAGOHAIN, M. K.: Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

Časopis: Composites Part A, B, Polymers, Materials, Journal of Cleaner Production, Manufacturing Technology, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Polymer Degradation and Stability, Wear atd.

Firemní literatura

HLOUSEK, P.: 3D printing: a prospective challenge for manufacturing: a manufacturing revolution. Saarbrücken: AV Akademikerverlag, 2015.

CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015.

KLOSKI, L. W., KLOSKI, N.: Getting started with 3D printing: a hands-on guide to the hardware, software, and services behind the new manufacturing revolution. San Francisco: Maker Media, 2016.

MILLS, N. J.: Plastics: microstructure and applications. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005.

NOORANI, R.: 3D printing: technology, applications, and selection. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

TRES, P. A. Designing plastic parts for assembly. 8th edition updated. Munich: Hanser, 2017.

WIMPENNY, D. I., PANDEY, P. M., KUMAR, L. J.: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017.

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 26. 1. 2021

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 22. 02. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Porovnání technologií 3D tisku z pohledu kvality a mechanických vlastností" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za odborné a věcné připomínky a čas, který mi při psaní této diplomové práce obětoval. Velké díky patří také společnosti Part2Print s.r.o. za poskytnutí veškerých prostorů, materiálů a možnosti využití 3D tiskáren při zpracování praktické části této diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině za neustálou podporu během celého studia.

Porovnávání technologií 3D tisku z pohledu kvality a mechanických vlastností

Abstrakt:

Diplomová práce na téma „Porovnání technologií 3D tisku z pohledu kvality a mechanických vlastností“ se ve své teoretické části zabývá přiblížením 3D tisku, jeho historie, jeho technologií a používaných materiálů. Je popsáno využití jednotlivých technologií 3D tisku FDM, SLA a MJP. Také jsou popsány mechanické zkoušky plastů. V praktické části je postup tisku zkušebních vzorků pro zkoušku tahem, tvrdosti a kvality z jednotlivých technologií 3D tisku a následně jsou tyto zkoušky vyhodnoceny.

Porovnávali se vzorky nejen mezi technologiemi ale i samotné materiály pro technologie FDM a SLA. U technologie FDM se porovnávali materiály ABS, ASA a PC/ABS. Dále se zkoumal vliv vyhlazení vrstev pomocí ethylmethylketonem na tvrdost, tažnost a pevnost v tahu. U technologie SLA se zkoumal originální materiál RCP 30 od společnosti EnvisionTec a neoriginální, mnohem levnější materiál M70. Dále se zkoumala účinnost následného vytvrzení pomocí UV lampy na tvrdost. K porovnání mezi technologiemi byl u technologie MJP použit materiál VisiJet M5 MX. Zkoumala se také kvalita povrchu a vnitřní struktury mezi těmito technologiemi.

Díky výsledkům zjištěným v praktické části bude možné určit, který z materiálů jednotlivých technologií vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti a jak tyto vlastnosti ovlivňují následné úpravy (vyhlazení vrstev, vytvrzení). Výsledky z výzkumu kvality povrchu a vnitřní struktury objasní, která z technologií prokazuje nejvyšší kvalitu.

Klíčová slova: 3D tisk, zkouška tahem, tvrdost, kvalita, výzkum

Comparison of 3D printing technologies in terms of quality and mechanical properties

Abstract:

This thesis on the topic „Comparison of 3D printing technologies in terms of quality and mechanical properties“ in its theoretical part deals with history of 3D printing, its technologies and materials which are used. In theoretical part are also detailed described 3 technologies of 3D printing – FDM, SLA and MJP and mechanical test of the plastic.

In the practical part there is described procedure of printing samples which were used for hardness and quality testing. Samples were compared between the technologies of the 3D printing and also were compared different materials for FDM and SLA technologies. The effect of layer smoothing with ethyl methyl ketone on hardness, ductility and tensile strength was further investigated. The SLA technology examined the original RCP 30 material from EnvisionTec and the non-original, much cheaper M70 material. Furthermore, the effectiveness of the subsequent curing with a UV lamp on hardness was investigated. VisiJet M5 MX was used for the MJP technology to compare the technologies. The surface quality and internal structure between these technologies were also examined.

Thanks to the results which were found in the practical part of the thesis it will be able to determine which of the materials of individual 3D printing technologies shows the best mechanical features and how these features affect subsequent modifications (layer smoothing, curing). The results of the research of surface quality and internal structure will clarify which of the technologies is the best.

Key words: 3D printing, tensile test, hardness, quality, research

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	CÍL PRÁCE A METODIKA.....	2
2.1	Cíl práce	2
2.2	Metodika práce	2
3	TEORETICKÁ ČÁST	3
3.1	3D tisk	3
3.1.1	Historie 3D tisku	3
3.1.2	Formát STL	5
3.1.3	Technologie FDM	5
3.1.4	Technologie SLA	12
3.1.5	Technologie MJP	16
3.1.6	Postprocessing.....	19
3.1.7	Průša research	20
3.1.8	Využití 3D tisku.....	21
3.1.9	Budoucnost 3D tisku.....	23
3.1.10	Volba technologie a materiálu	24
3.2	Fyzikální vlastnosti polymerů	24
3.2.1	Termoplasty	25
3.2.2	Reaktoplasty.....	25
3.2.3	Elastomery	26
3.3	Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušky	26
3.3.1	Zkouška tahem	27
3.3.2	Metoda vtlačování kuličky.....	30
3.3.3	Tvrдость podle Rockwela	31
3.3.4	Shore	31
3.4	SEM – Skenovací elektronová mikroskopie	32
3.4.1	Příprava vzorků	33
4	PRAKTICKÁ ČÁST	34
4.1	Příprava a tisk.....	34
4.1.1	FDM.....	35
4.1.2	SLA	37
4.1.3	MJP	40
4.2	Zkouška tahem	41

4.2.1	Zkušební těleso	42
4.2.2	Universální zkušební stroj.....	42
4.3	Zkouška tvrdosti vnikáním kuličky	44
4.3.1	Tvrdoměr.....	44
4.4	Zkoušené materiály	45
4.5	Výzkum kvality povrchu	46
4.6	Výzkum vnitřní struktury pomocí SEM.....	47
5	VÝSLEDKY A DISKUSE.....	49
5.1	Vyhodnocení zkoušky tahem	49
5.2	Vyhodnocení zkoušky tvrdosti.....	53
5.3	Vyhodnocení kvality povrchu	54
5.4	Vyhodnocení vnitřní struktury pomocí SEM.....	54
6	ZÁVĚR.....	57
7	CITOVANÁ LITERATURA	58
	Seznam použitých zkratk.....	61
	Seznam obrázků	62
	Seznam grafů.....	63
	Seznam tabulek	64

1 ÚVOD

Aditivní technologie výroby patří v současné době k nejvíce rozvíjejícím se odvětvím. Tyto technologie vychází z principu automatického postupného nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách, až do zhotovení celého výrobku. Zprvu mělo být využití aditivních technologií pouze pro tvorbu rychlých prototypů bez potřeby předcházející výroby forem zvaný jako Rapid Prototyping (RP). Tento způsob výroby prototypů zaručuje urychlení časově a ekonomicky náročného procesu, který během vývoje nového produktu často omezoval fázi vývoje a kreativity. Avšak v současné době pojem Rapid Prototyping není pro formulaci aditivních technologií zcela přesný, neboť se nyní nevyužívá jen pro výrobu prototypů ale i pro tisk již finálních produktů. Z toho důvodu se RP nahrazuje názvem 3D tisk. (1)

V dnešní době je s 3D tiskem spojeno široké množství různých technologií 3D tisku, díky kterým lze dosáhnout požadovaného výrobku, avšak pro každý tento výrobek platí různá specifika nejen co se týče mechanických vlastností ale i z pohledu kvality či vzhledu finálního výrobku. Proto je nutné tyto technologie rozlišit a s tím i zvolit vhodný druh materiálu.

V této diplomové práci jsou popsány a následně porovnány, z pohledu mechanických vlastností a kvality povrchu tištěných výrobků, tři různé technologie 3D tisku. FDM, pracující na principu tavného depozičního modelování, STL využívající vytvrzení tekuté pryskyřice pomocí světelných paprsků a technologie MJP, která vychází z principu inkoustové tiskárny. Zároveň jsou u technologie FDM mezi sebou porovnávány vybrané materiály a je zkoumán vliv vyhlazení jednotlivých vrstev za pomoci ethylmethylketonu na mechanické vlastnosti materiálu. U technologie SLA je zkoumán vliv následného vytvrzení pomocí světelných UV záblesků na změnu tvrdosti materiálu.

2 CÍL PRÁCE A METODIKA

Kapitola stručně shrnuje cíle diplomové práce a postup, který vedl k dosažení stanovených cílů.

2.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je shromáždění informací o různých technologiích 3D tisku (FDM, SLA a MJP) a jejich vzájemného porovnání. V praktické části se tato práce zaměřuje na tisk zkušebních vzorků z různých technologií 3D tisku a následnému výzkumu mechanických vlastností a hodnocení kvality povrchu vytištěného výrobku.

Porovnávány jsou materiály ASA, ABS a PC-ABS z technologie FDM, a následné vyhlazení vrstev za pomoci ethylmethylketonu. U technologie SLA materiály M70 a RCP30 a následný vliv vytvrzení záblesky z UV lampy. Porovnáván je mezi ostatními materiály materiál VisiJet M5 MX z technologie MJP.

2.2 Metodika práce

Teoretická část se zaměřuje na přiblížení historie, popsání vybraných technologií 3D tisku (FDM, SLA, MJP) a jejich nejběžněji využívaných materiálů. Následně byly představeny zkoušky mechanických vlastností, se kterými se dále pracuje v praktické části diplomové práce. Teoretická část práce je tvořena za pomoci studie odborné literatury, odborných článků a vlastních zkušeností, vyplývajících z dlouholeté praxe v oboru 3D tisku.

V úvodu praktické části této diplomové práce je popsán postup přípravy tištěných vzorků, modelů a průběh tisku na technologicky odlišných tiskárnách. K určení a následnému porovnání jsou zkušební vzorky podrobeny zkouškám tahem a zkoušce tvrdosti metodou vlačování kuličky. Následné porovnání kvality povrchu bylo provedeno vizuální formou na modelu Peltonovy turbíny za pomoci mikroskopu a porovnání vnitřní struktury mezi technologiemi na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Výsledky a porovnání zkoušek mechanických vlastností jsou znázorněny v jednotlivých grafech a kvalita tisku je zobrazena pomocí snímků.

3 TEORETICKÁ ČÁST

Kapitola obsahuje základní informace o 3D tisku, jeho historii, představuje jednotlivé technologie 3D tisku a používané materiály. Následuje popis zkoušek mechanických vlastností materiálů, které jsou dále využity v praktické části. Teoretická část je předpokladem pro vypracování a vyhodnocení praktické části.

3.1 3D tisk

Jedná se o tzv. aditivní způsob výroby, kdy je materiál přidáván, nikoli odebírán, jako je tomu u tradičních metod nazývané jako substrativní výroba, kdy se využívá např. frézování, obrábění, vrtání apod. K výrobě fyzických částí z nahaného trojrozměrného modelu, nejčastěji ve formátu STL, se využívá automatizovaného postupného nanášení materiálu a vznikají jednotlivé vrstvy. Pomocí 3D tisku se mohou jednoduše vyrobit i velmi složité geometrické tvary. (2)

V současnosti se na trhu vyskytuje celá řada technologií spojených s 3D tiskem. Vedle nejstarší technologie SLA, která využívá vytvrzení tekuté pryskyřice světelným paprskem a v dnešní době nepoužívanější technologií na principu tavného depozičního modelování FDM, se v posledních letech objevují nové technologie. Jedná se například o technologii MJP neboli Multi Jet Printing pracující na principu inkoustové tiskárny nebo SLS, kde se za pomoci laseru svařuje prášek kovu. Existuje celá řada jiných technologií 3D tisku (SDL, LOM, DMLS, SHS nebo BJ), ale tato práce se podrobněji zaměří na technologie SLA, FDM a MJP.

3.1.1 Historie 3D tisku

3D tisk se stále vnímá jako nová a neustále se rozvíjející technologie výroby nejen plastových dílů. Z historie však vyplývá, že první zmínky o 3D tisku pocházejí již z 80. let 20. století, kdy Američan Charles Hull přišel s první technologií 3D tisku, dnes známa pod pojmem SLA. V roce 1984 si Charles Hull nechal patentovat první 3D tiskárnu a byl vůbec první, kdo vytiskl digitální 3D data. (3)

Z kraje 80. let byly CAD systémy pro tvorbu 3D modelů na úplných začátcích, proto měl Charles Hull problém s přenosem souboru do formátu, se kterým by tiskárna mohla dále pracovat. Za pomoci společnosti 3D Systems přišli s formátem souboru, zvaného jako

Standard Triangle Language, neboli STL, který je i přes drobné nedostatky nejběžnější formou souborů i v dnešní době. Podrobněji je tento formát popsán v kapitole 3.1.2. (4)

Dalším milníkem v oblasti 3D tisku se stal rok 1988, kdy Scott Crump, známý jako spoluzakladatel firmy Stratasys, vynalezl tiskárnu na principu tavného depozičního modelování (FDM). O rok později prorazil na trh s novými materiály na bázi akrylonitrilového butadienu, známého pod zkratkou ABS, který je s materiálem PLA stále nejpopulárnějším materiálem ve 3D tisku. (4)

Přestože je 3D tisk jako takový známý od 90.let minulého století, tak jeho obrovský rozvoj nastal až v nedávné době. To zapříčinil v roce 2005 projekt RepRap, založený Adrianem Bowyerem. Jeho podstatou bylo navrhnout 3D tiskárnu, která by byla tvořena z co nejvíce součástek vytištěných na jiných 3D tiskárnách. Od začátku tohoto projektu se pracovalo pod licenci open source, což znamená, že všechny zdrojové kódy, návrhy a veškeré tištěné části jsou volně přístupné veřejnosti a dále inovativní. (5)

Tohoto projektu využilo mnoho firem, které se zaměřili na výrobu těchto tiskáren a díky tomu se staly 3D tiskárny dostupnějšími i mezi amatérskými uživateli. 3D tisk tedy není jen nástroj pro velké průmyslové firmy, ale je velmi oblíbený i mezi běžnými spotřebiteli a lidmi v domácnostech, kde jsou velmi oblíbené FDM tiskárny od českého výrobce Průša research, který je dále podrobněji popsán v kapitole 3.1.7. Každý z výrobců 3D tiskáren se stále snaží zdokonalovat jednotlivé tiskárny a přicházet na trh se stále novými materiály. 3D tisk je vnímán jako obor s obrovskou budoucností a to nejen co se jedná o stálou výrobu plastových prototypů, ale i o stavbu respektive výrobu samotných domů (viz obr. 1).

Obrázek 1 - Vytištěný dům pomocí 3D tisku (6)



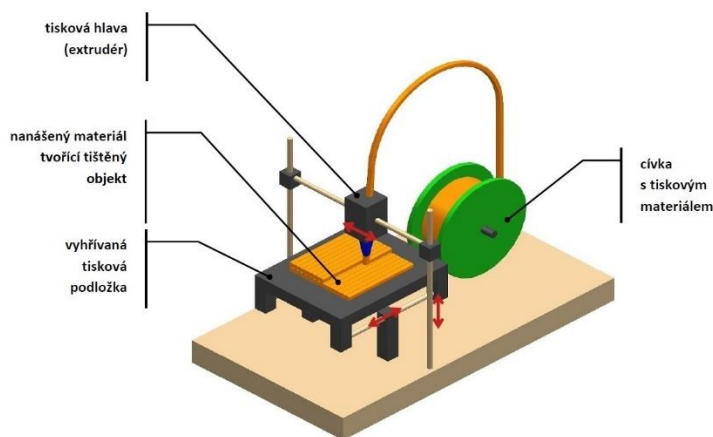
3.1.2 Formát STL

Formát STL je nejběžnější a zároveň velice jednoduché rozhraní, které slouží k přenosu geometrických popisů z CAD softwaru nejen do 3D tiskáren. STL se využívá pro všechny typy 3D tiskáren již od vzniku samotného 3D tisku. Soubor byl vytvořen společností 3D Systems a je tvořen CAD databází. Při procesu převádění z CAD softwaru do STL jsou všechny informace, které se týkají barvy, materiálu, nebo historie zanedbány. Totéž platí i pro jednotlivé body, křivky a čáry, které nejsou přímo spjaty s modelem. Ve formátu STL se zobrazují pouze pevné entity a povrchové hodnoty, které se zaznamenávají pomocí trojúhelníkových těles, které jsou popsány souřadnicemi X, Y a Z. Linearita trojúhelníků je totiž pro všechny druhy 3D tiskáren mnohem jednodušší na zpracování při zachování úplnosti objektu, než je tomu u jiných geometrických tvarů a objektů. (1)

3.1.3 Technologie FDM

FDM tiskárny jsou nejpoužívanější a zároveň nejdostupnější tiskárny na trhu, kde představují téměř 90 % všech používaných tiskáren. FDM tiskárna pracuje na principu roztaveného materiálu v podobě struny neboli filamentu. Materiál je v extrudéru taven a za pomoci tiskové trysky vytlačován na tiskovou platformu (viz obr. 2). Výška jedné vrstvy je od 0.05 do 0.35 mm, podle schopností a nastavení tiskárny. Tiskový objem u těchto tiskáren se nejčastěji pohybuje okolo rozměrů 200 x 200 x 300 mm, ale na trhu jsou i velkoformátové tiskárny, které jsou schopny vytisknout modely o rozměrech v řádech metrů. FDM tiskárny lze rozdělit do tří kategorií podle konstrukce a vykonávaného pohybu extrudéru. (7)

Obrázek 2 - Technologie FDM (8)



Kartézská

Jak už plyne z názvu, tak je tiskárna založena na pohybu v kartézském souřadnicovém systému. Části tiskárny se pohybují po osách X, Y a Z, přičemž jsou dva způsoby pohybu. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Z a platforma v ose Y, nebo se extrudér pohybuje v osách X a Y a tisková deska v ose Z. Jedná se o nejběžnější a nejoblíbenější FDM tiskárny. (3)

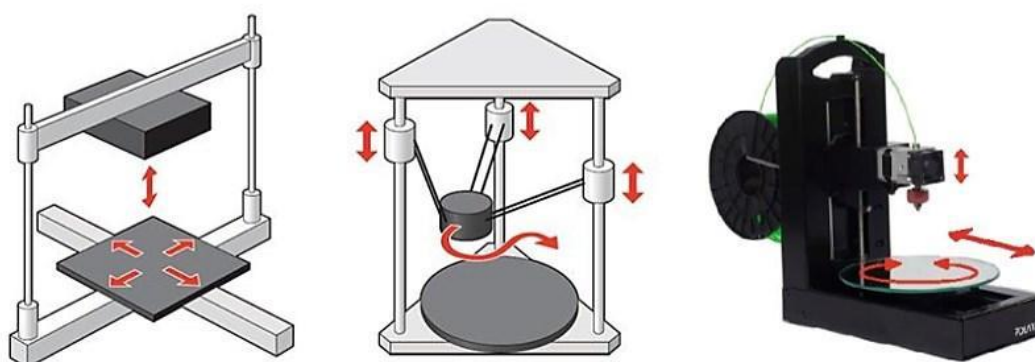
Delta

Tyto tiskárny využívají zavěšeného extrudéru na trojramenné konstrukci. Mezi hlavní výhody těchto tiskáren patří rychlost tisku a velký tiskový objem v ose Z. Problémy však nastávají již při konstrukci, kdy je vyžadována vysoká přesnost sestavení jednotlivých ramen a při pracné kalibraci, kterou provázejí složité výpočty jednotlivých pohybů krokových motorů. (3)

Polar

Tiskárny jsou založeny na polárním pohybu. Jejich konstrukce je sice velmi jednoduchá, ale příprava jednotlivých modelů pro tisk je složitá a pracná. Tiskárna využívá pohybů v ose Y a Z a rotačního pohybu tiskové desky. Tiskárny s touto konstrukcí jsou nejméně oblíbené a v praxi prakticky nepoužívané. Jednotlivé druhy konstrukcí a jejich pohybů jsou znázorněny na obr. 3. (3)

Obrázek 3 - Schéma konstrukcí FDM tiskáren (9)



U geometricky složitých tvarů, kde dochází k převisům a materiál by byl vytlačován do volného prostoru se musejí vytvořit podpory, které zaručují správné podepření objektu a bezpečný výtisk modelu. Podpory lze vytvořit dvěma způsoby. U profesionálních tiskáren se využívá dvojitého extrudéru, kde se kromě stavěcího materiálu tiskne i materiál

podpurný. Tento materiál bývá křehký a rozpustný, což dopomáhá k následnému jednoduchému odstranění podpor z vytisknutého modelu. U tiskáren, které disponují pouze jednou tryskou, se podpory musejí vytvářet totožným stavěcím materiálem. Jednotlivé podpory pak musejí být vytvořeny tak, aby se zajistilo jejich bezproblémové odlomení od tištěného modelu. (10)

Na obr.4 je vidět velká výhoda možnosti tisku z podpurného materiálu, kdy je tištěný model složitějšího tvaru a vytvářet jednotlivé podpory pomocí stejného materiálu by bylo velmi pracné, následné odstranění velmi obtížné a mohlo by dojít k poškození modelu.

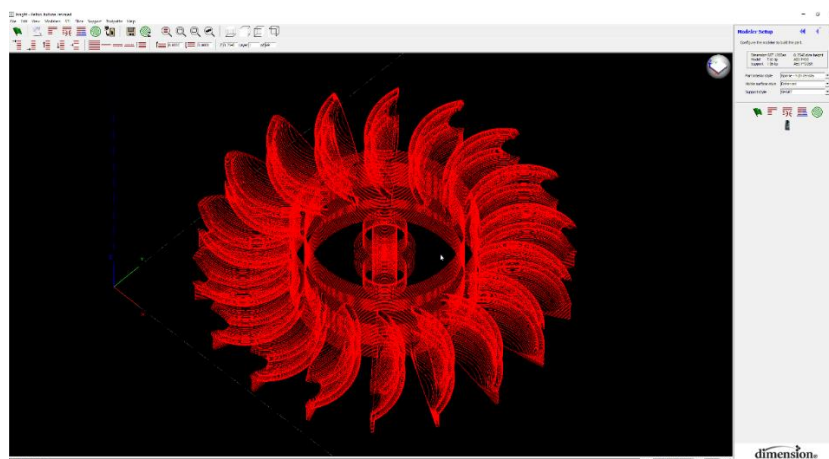
Obrázek 4 - Model s využitím podpurného materiálu (11)



G-kód

Podobně jako je tomu u CNC strojů, tak i u FDM tiskáren se k pohybu extrudéru využívá programovacího jazyka, tzv. G-kódu. Existuje několik variant, jak získat pro tisk potřebný G-kód. Nejběžnějším a zároveň nejjednodušším způsobem je použití sliceru, který nahráný model ve formátu STL rozkrájí na předem definované jednotlivé vrstvy a zároveň vypočítá trajektorie extrudéru. V zásadě platí že každá firma vyrábějící 3D tiskárny má svůj software na krájení a počítání trajektorie extrudéru. Ukázka rozkrájeného modelu v softwaru Insight od společnosti Stratasys je zobrazena na obrázku 5. (12)

Obrázek 5 - Prostředí v softwaru Insight

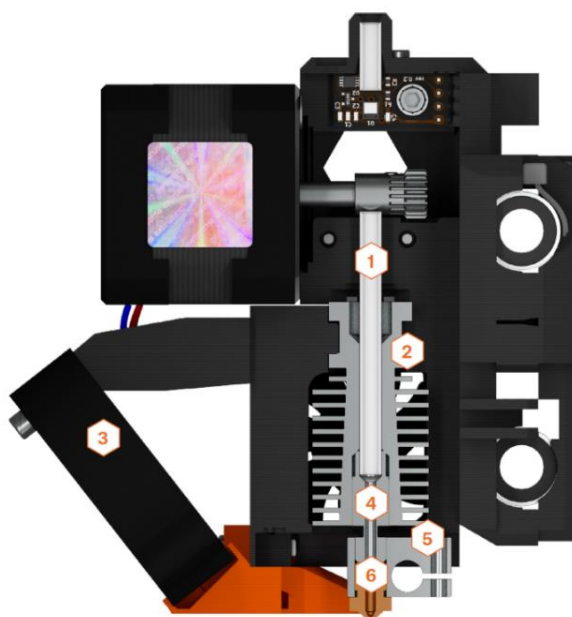


Důležité komponenty FDM tiskárny

Tisková platforma – deska, na kterou je tryskou vytlačován materiál a je zde tvořen výrobek. Výhodou je vyhřívaná platforma, která zabraňuje kroucení a odlepování materiálu s vysokou teplotní roztažností. Tisková plocha by měla mít dobré adhezivní schopnosti tak, aby byly jednotlivé vrstvy materiálu pevně přichyceny k tiskové desce a nedocházelo ke zmaření tisku. Na zlepšení adheze lze použít různé adhezivní spreje a laky. (3)

Extrudér – tisková hlava a nejdůležitější část 3D tiskárny. Zde dochází k tavení materiálu a následnému vytlačení na tiskovou plochu. Každý výrobce má svůj specifický extrudér, ale jeho vnitřní složení je zpravidla podobné. Skládá se z teflonové trubice, kterou se přivádí materiál, poháněného ozubeného kola, který zaručuje pohyb a vytlačování struny a dále ohříváčů a chladičů, které zabezpečují správné tavení materiálu. Na obr. 6 je popsán jednotryskový extrudér od českého výrobce Průša research. (3)

Obrázek 6 - Extrudér. 1-teflonová trubice, 2-chladič, 3-tiskový ventilátor, 4-izolátor, 5-ohřívací blok, 6-tryska (3)



Krokové motory – zajišťují veškeré pohyby extrudéru, platformy a zároveň zaručují podávání materiálu a jeho následné vytlačování. Výhodou krokových motorů je definování velikosti jednotlivých kroků. (3)

Řídicí jednotka – zabezpečuje plynulý chod celé 3D tiskárny. Hlavní funkcí řídicí jednotky je čtení, zpracování a správné vyhodnocení vstupního G-kódu, díky kterému se vypočítají pohyby krokových motorů a ovládají se teploty tiskového prostředí. Poté řídicí jednotka vyhodnocuje jednotlivé výstupy senzorů 3D tiskárny a reaguje na změny jejich stavů. (3)

Používané materiály

Materiál u FDM tiskáren je namotaný na cívce v podobě struny nejčastěji o průměru 1,75 mm nebo 2,5 mm. Na začátku 3D tisku se výhradně pracovalo s materiály ABS, ale dnes po velkém rozšíření 3D tisku i mezi neprofesionální uživatele se na trh dostávají stále nové materiály v nejrůznějších barevných provedeních (obr. 7) Každý materiál má své specifické vlastnosti a každý vyžaduje jiné tiskové nastavení, u kterého záleží především na teplotě a rychlosti tisku. Různé materiály se hodí pro tisk jiných modelů. Mezi nejběžnější materiály patří PLA, ABS, ASA, PC a PETG a mezi podpůrnými materiály BVOJ a PVA, které se využívají spolu s tiskem z PLA, kvůli podobné tiskové teplotě. Tyto materiály jsou rozpustitelné ve vodě. U ABS a ASA se využívá podpůrný materiál HIPS, který je rozpustitelný v limonesolu. (3)

Obrázek 7 - Barevné varianty filamentů pro tisk FDM (13)



PLA (polylaktid acid) – mezi neprofesionálními 3D tiskaři se jedná o nejpoužívanější filament. Jedná se o materiál s nízkou teplotní roztažností, což má za důsledek, že se při tisku nekrouťí, neohýbá a neodlepuje se od tiskové podložky. Je vhodný pro tisk detailních a menších modelů. Materiál je sice pevný, ale zároveň křehký a při vyšším zatížení může praskat a zároveň je nejméně odolný vůči povětrnostním podmínkám. Není tedy příliš vhodný pro tisk funkčních dílů. Patří k nejlevnějším materiálům a díky nízké teplotě tání není potřeba vysokých pracovních teplot, které se pohybují okolo 190 °C. Cena se pohybuje okolo 500 Kč za cívku. (4)

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) – jedná se o nejstarší tiskový materiál a zpočátku také dlouho jediný materiál, se kterým se v oblasti 3D tisku pracovalo. Vyniká svojí pevností, avšak i velkou teplotní roztažností, což má za následek odlepování modelu od tiskové podložky a kroucení modelu. Velkou výhodou ABS je následné vyhlazení vrstev výpary acetonu. Díky svým mechanickým vlastnostem se využívá při výrobě funkčních dílů. Nevýhodou je výrazný zápach a kvůli své tvrdosti i vyšší opotřebení trysek. Pracovní teplota je cca 220 – 250 °C. Jeho cena se pohybuje od 500 do 1 500 Kč za cívku. (4)

ASA – jde o nástupce ABS. Mechanické vlastnosti jsou velmi podobné, ale teplotní roztažnost není tak vysoká, tudíž tiskové vlastnosti jsou výrazně přívětivější. Cena je srovnatelná s ABS.

PC – neboli polykarbonát se řadí mezi nejodolnější materiály. Často je využíván ve spojení s ABS, které má velmi podobné vlastnosti. Je pevný a odolný vůči rázu a oděru, avšak jeho vysoká teplotní roztažnost velmi zneprůjemňuje samotný tisk. Dochází ke kroucení a odlupování od podložky. Pracovní teplota je 250 – 290 °C. (14)

FLEX (flexibilní filament na bázi polyuretanu) – materiály, které jsou částečně ohebné a chováním se podobají pryži. Dají se bez prasknutí ohýbat. Jsou dostupné v několika

stupních tvrdosti. Čím je struna měkčí, tím bývá tisk náročnější. Používají se při tisku kol na modely aut atd. (3)

Výhody FDM

- výrobky jsou pevné a konzistentní
- jsou vhodné pro funkční testování
- nákladově efektivní pro malé až středně velké díly v rychlém čase vyhotovení
- díly lze dále obrábět a povrchově upravovat

Nevýhody FDM

- žebrovaný vzhled v důsledku vytlačování jednotlivých vrstev
- může být pomalý proces pro velmi velké a geometricky složité díly
- tenkostěnné a duté díly se vyrábějí rychleji než pevné díly (15)

Využití FDM tiskáren

Díky velice nízkým pořizovacím nákladům a levným filamentům jsou tyto tiskárny využívány nejen v průmyslovém odvětví ale i v domácnostech u amatérských uživatelů. Tato technologie se využívá pro tisk nejrůznějších náhradních dílů, inovací, držáků, sběratelských sošek, či celých soch v životní velikosti. Když se zanedbá nižší kvalita tištěných výrobků, dá se tato technologie využít téměř na vše.

Z praxe lze konstatovat, že každý amatérský uživatel využívá právě FDM tiskárnu pro všelijaké vychytávky a praktické pomůcky do domácnosti, jako jsou např. držáky mobilů, flash disků atd. (viz obr.8)

Obrázek 8 - Příklad využití FDM tisku



3.1.4 Technologie SLA

Tiskárny tohoto typu nepoužívají materiál v podobě filamentu, jako je tomu u FDM tiskáren, ale pracují na principu vytvrzování tekuté světelně citlivé pryskyřice pomocí světelných paprsků. Tyto tiskárny vynikají vysokým rozlišením a přesností. Vytisknuté modely z těchto druhů tiskáren bývají velice detailní. Oproti FDM tiskárnám zde nejsou tolik viditelné jednotlivé vrstvy a samotný povrch je daleko hladší. Výška jedné vrstvy se pohybuje okolo 25 až 50 mikrony podle schopností a nastavení tiskárny, avšak tiskový objem je podstatně menší. Tisková platforma bývá o rozměrech cca 100 x 70 mm, tudíž je určená pro tisk velmi malých, ale detailních modelů jako jsou např. šperky, RC modely, zubní protézy apod. Tiskárny se dále rozlišují podle druhů osvitů, který vytvrzuje materiál. (7)

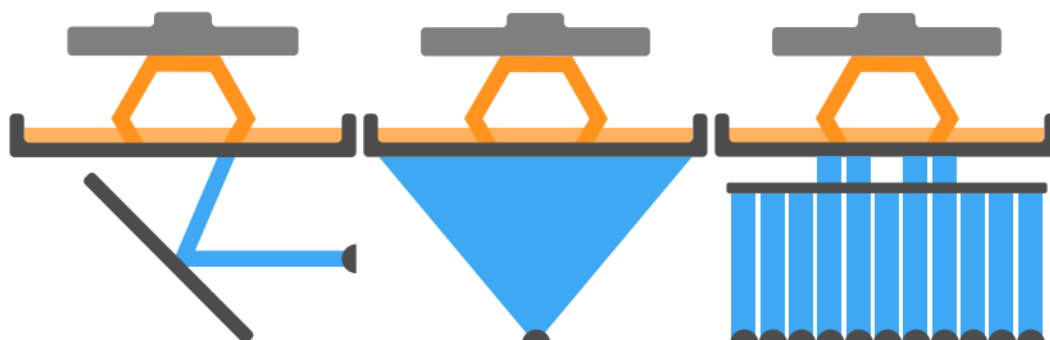
Druhy osvitů u SLA tiskáren

SLA-Laser – osvit zajišťuje UV laserový paprsek, který je směřovaný dvěma natočenými zrcadly. Tento paprsek kopíruje obrys jednotlivých vrstev modelu a vytvrzuje pryskyřici. Z tohoto důvodu je tisk tímto druhem osvitů značně pomalejší. (3)

DLP (Digital Light Processing) – u těchto tiskáren zaručuje vytvrzení materiálu paprsky z digitálního projektoru, jehož osvit celé vrstvy dopomáhá rychlejšímu tisku, než je tomu u osvitů laserem. Výhodou tohoto osvitů je stejná doba tisku jedné vrstvy bez ohledu na velikost osvitové plochy. Čas vytvrzení jedné vrstvy je fixní. (3)

MSLA (Mask Stereolithography) – osvit zaručuje LCD displej, který za pomoci UV LED vytvrzuje materiál. Přes LCD displej díky maskování prostoupí UV světlo pouze tam, kde jsou aktivovány jednotlivé pixely a tím se zaručí vytvrzení materiálu na konkrétním místě. LCD displej se skládá ze čtvercových pixelů, které mají pevně dané rozlišení, a i zde se vytvrzuje celá vrstva (viz obr.9). (3)

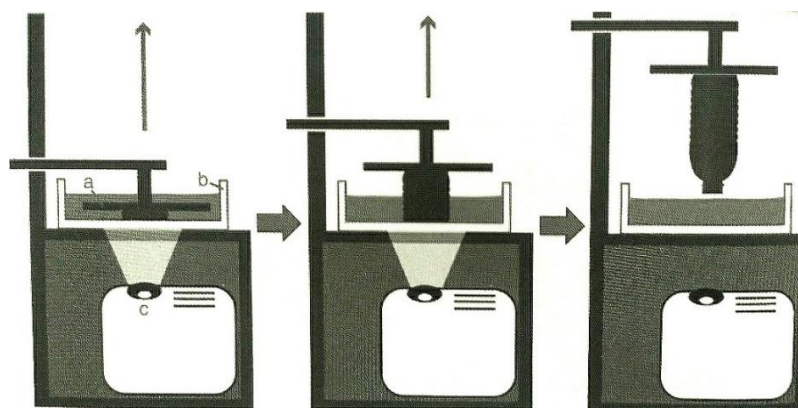
Obrázek 9 - Druhy osvitů SLA tiskáren – Laser, DLP, MSLA (3)



Proces tisku SLA tiskárny

Tekutá pryskyřice je uchovávána v nádrži, do které se postupně ponořuje tisková platforma. Mezi dnem vany a tiskovou platformou zůstává velmi malá vrstva materiálu, která se vytvrzuje dopadajícími paprsky ze zdroje světla. Po vytvrzení této vrstvy se tisková platforma posune o výšku jednotlivých vrstev směrem nahoru a znovu dochází k osvitů a následnému vytvrzování materiálu. Tento postup se opakuje až do vyhotovení celého modelu. Po vytištění celého modelu se výrobek musí očistit od nevytvrzené pryskyřice pomocí izopropylalkoholu, nejčastěji v ultrazvukovém čističi. Dále se doporučuje vytvrzení modelu záblesky UV světla. Princip tisku je vyobrazen na obr. 10. (7)

Obrázek 10 - Proces tisku SLA tiskárny



Komponenty SLA tiskárny

Konstrukce SLA tiskáren není nikterak složitá. Rozdíly v částech 3D tiskáren jsou pouze ve zdroji vytvrzovacího světla. Dalšími komponenty jsou:

Nádrž pryskyřice – slouží jako zdroj materiálu, jehož dno je průhledné, tak aby světelný paprsek mohl vytvrdit jednotlivé vrstvy materiálu. Nádrže bývají mechanicky naklápěny, jelikož vytištěné vrstvy modelu zůstávají přilepeny na dně a hrozí tak poškození nebo odlepení celého modelu od tiskové platformy. Díky naklápění nádrže se model odlepuje ode dna postupně a riziko poškození tisku se zmenšuje.

Krokový motor – zaručuje pohyb tiskové platformy v ose Z. To je také jediný mechanický pohyb u těchto tiskáren.

Zakrytování – zabraňuje přístupu nežádoucího světla, které by mohlo samovolně vytvrdit materiál, a zároveň zabraňuje kontaminaci materiálu v nádrži. (3)

Používané materiály u technologie SLA

U SLA tiskáren se používají tzv. resiny, které jsou tekuté a vytvrzují se světelným paprskem. Obecně se resiny skládají z jádra, fotoiniciátorů a přísad. Tyto resiny se nerozlišují podle typu materiálu, jako je to u filamentů k tisku FDM, ale rozlišují se podle účelu použití. Různé vlastnosti resinů vznikají přidáním vhodných příměsí a barviv, které zaručí požadované vlastnosti materiálu. Ceny materiálů pro SLA jsou výrazně vyšší, než je tomu u filamentů pro FDM tiskárny. Cena obyčejných resinů začíná na částce cca 700 Kč za litr materiálu, kdežto u speciálních resinů se ceny za 1 litr mohou vyšplhat až k částce 10 000 Kč. Nejpoužívanější typy resinů a jejich vlastnosti jsou popsány na obr. 11. (3)

Obrázek 11 - Typy resinů pro technologii SLA (3)

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

Výhody SLA

- schopnost realizace vysokých detailů a velmi tenkých stěn
- možnost další povrchové úprava součástí
- vysoká přesnost požadovaných rozměrů

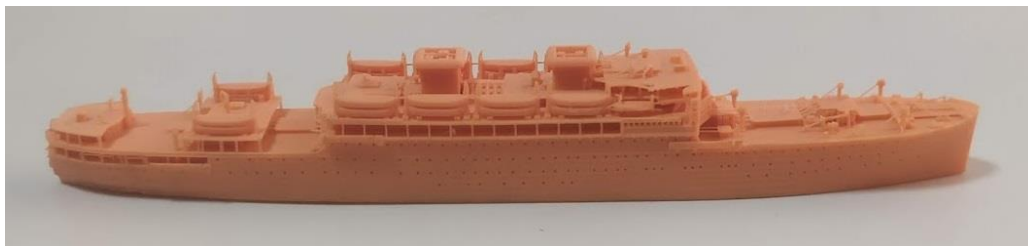
Nevýhody SLA

- absence podpůrného materiálu
- vytváření podpor manuálně v CAD modelu
- pracné odlamování podpor
- malý tiskový objem
- vyžaduje dodatečné vytvrzení
- omezené množství materiálů (15)

Využití SLA tisku

Technologie tisku SLA se používá především pro tisk velmi detailních modelů. Na těchto tiskárnách se nejčastěji tisknou přesné master modely pro následné odlévání. V praxi se tato technologie využívá pro tisk RC modelů, figurek, a nejrůznějších šperků (viz obr. 12).

Obrázek 12 - Příklad využití SLA tisku

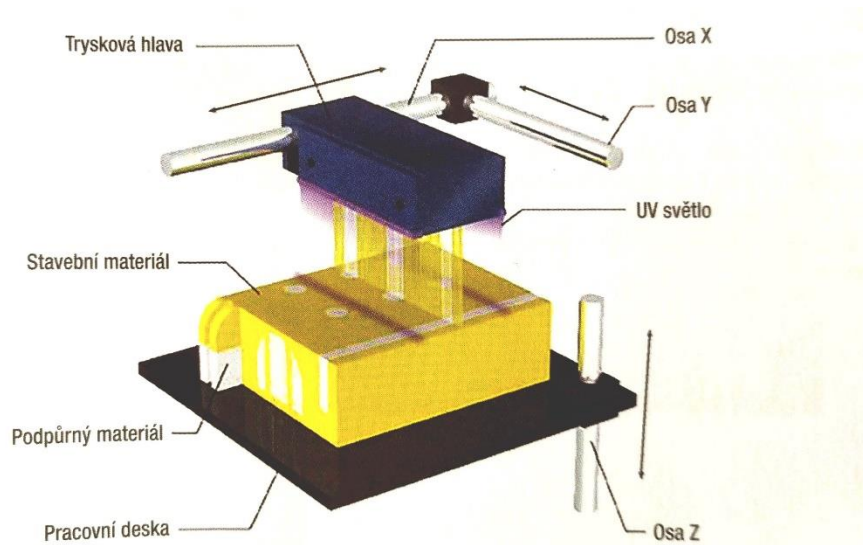


3.1.5 Technologie MJP

Technologie je patentována společností 3D Systems, která je jednou z největších výrobců 3D tiskáren na světě. MultiJet Printing Systém (MJP) byla dříve známa jako MultiJet Modeling (MJM), která byla na trh uvedena v roce 1996 jako koncepční tiskárna pro kancelářské objekty, doplňující sofistikovanější stroje typu SLA. (16)

MultiJet Printing, neboli MJP, je technologie založená na principu inkoustových tiskáren. K nanášení jednotlivých vrstev se využívá piezoelektrické tiskové hlavy. Na rozdíl od klasické inkoustové tiskárny, kde se tryská inkoust, se u MJP tiskáren na plochu tryskají kapičky tekutého fotopolymeru a pomocí UV záření je docíleno jeho vytvrzení. Tisková hlava se pohybuje v ose X a Y, a při každém průjezdu nad platformou vytváří vrstvu materiálu. Zároveň bliká UV lampa, která zajišťuje vytvrzení vrstvy materiálu. Platforma, na které je model stavěn se po každé vytvrzené vrstvě posune v ose Z dolů a celý proces se opakuje (viz obr. 13). (16)

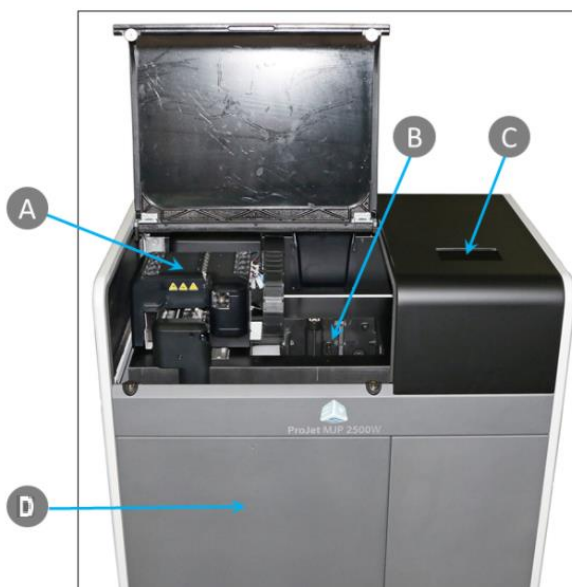
Obrázek 13 - Schéma MJP tisku (17)



MJP tiskárny tisknou zároveň i podpurný materiál, nejčastěji v podobě vosků, který zaručuje vytištění geometricky složitých tvarů, což je hlavní výhodou oproti tiskárnám s technologií SLA, kde se tyto podpory musejí ručně v modelu dodělat. Vyznačují se též vysokým rozlišením a kvalitou výtisku. (16)

Komponenty MJP tiskárny

Obrázek 14 - Popis MJP tiskárny (18)



A – Hlavní tiskové ústrojí. Obsahuje piezoelektrickou tiskovou hlavu, UV lampu a planarizér.

B – Tisková platforma, na které se vytvářejí všechny tiskové operace

C – Uživatelské rozhraní, které umožňuje uživateli kontrolovat stav tisku a množství materiálu

D – Zásobník materiálu a odpadní nádrž. Zde je umístěn modul MDM, kterým je materiál dopravován do tiskové hlavy.

Používané materiály

U technologie MJP se používají fotopolymerní pryskyřice, které při vystavení UV světlu dokážou tuhnout. Materiály se rozlišují podle použití následného tištěného výrobku na materiály používané v průmyslovém odvětví (VisiJet M3X), tuhé materiály (VisiJet M2R), elastomery (VisiJet M2 ENT), materiály s vysokou teplotní odolností (VisiJet M2S), bio materiály, více materiálové kompozity a vosk. Všechny materiály pro technologii MJP jsou označovány VisiJet. (19)

Výhody MJP

- vysoké rozlišení
- vysoká přesnost
- nahrání modelu STL bez dodatečných úprav
- ekonomicky efektivní

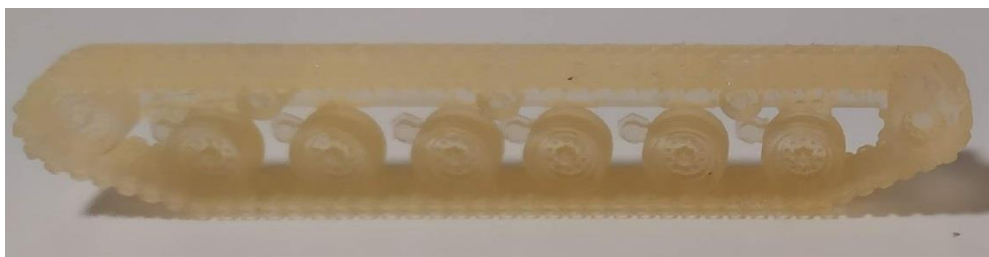
Nevýhody

- malý objem tiskové plochy
- velmi omezené materiály (fotopolymery a vosky)
- doba tisku (10)

Využití MJP tiskáren

MJP tiskárny se využívají především jako alternativa k technologii SLA. Na těchto tiskárnách se nejčastěji tisknou geometricky velmi složité modely, u kterých by bylo podpoření velmi obtížné až nemožné a zároveň se nepožaduje dokonale hladký povrch. Na obr. 15 je příklad tisku tankových pásů RC modelu, kdy by bylo obtížné model podpořit a zároveň u této součásti není požadavek na nejvyšší kvalitu tisku (viz obr 15.).

Obrázek 15 - Příklad využití MJP tisku



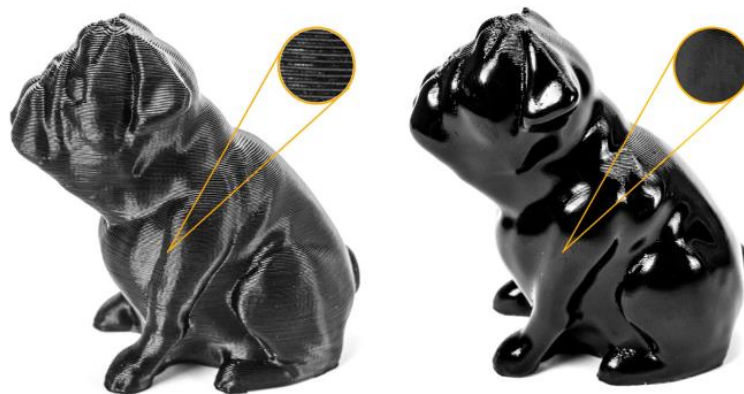
3.1.6 Postprocessing

Konečným úkonem v technologickém postupu je tzv. postprocessing. V těchto úkonech jsou obecně nutné některé ruční operace, což představuje značné riziko poškození součástí. Za postprocessing se považují práce s cílem získat hladký, pevný, barevný a obecně požadovaný povrch vytištěného modelu.

Po vytištění modelu následuje čištění součástí. Hlavně u technologie SLA a MJP je nutné model očistit od přebývající pryskyřice, respektive od fotopolymeru. K odstranění přebytečné pryskyřice se využívá ponoření modelu do isopropylalkoholu a následného vyčištění v ultrazvuku. Následně je nutné odstranit podpěry a model vytvrdit ve vytvrzovací UV lampě. U výtisků z fotopolymeru dochází k roztavení podpůrného materiálu v olejové lázni či v tepelné peci přehřáté na teplotu okolo 80°. Zde se musí brát zřetel na možné deformace tvaru způsobené působením tepla. Jelikož u modelů vytištěných z FDM tiskáren se nepracuje s tekutým materiálem, nemusí tento úkon čištění podstupovat.

U modelů vytištěných na tiskárnách FDM, které mají vyšší nároky na vzhled, se používá následné vyhlazení jednotlivých vrstev pomocí chemických rozpouštědel. U materiálů ASA a ABS se využívá rozpustnosti materiálu v acetonu. Pomocí výparů acetonu lze dosáhnout vyhlazení povrchu modelu (viz obr. 16). Dalším způsobem vyhlazení povrchu materiálu je pomocí ethylmethyleketonu, který plastový materiál leptá, a díky štětcí se jednotlivé vrstvy sjednotí.

Obrázek 16 - Ukázka chemicky vyhlazeného modelu (3)



U všech modelů lze použít běžné dokončovací procesy, jako je broušení, lakování, tmelení a obráběcí procesy např. vrtání, frézování nebo řezání závitů.

3.1.7 Průša research

Za zmínku jistě stojí česká firma Průša research, založená v roce 2012 Josefem Průšou, která pod značkou Original Prusa dodává 3D tiskárny do všech koutů světa a stala se druhým největším výrobcem FDM tiskáren na světě.

Celá výroba vychází z vize Adriana Bowyera, jenž v roce 2005 založil projekt RepRap. Jeho podstatou bylo navrhnout 3D tiskárnu, která by byla tvořena z co nejvíce součástek vytištěných na jiných 3D tiskárnách. Od začátku tohoto projektu se pracovalo pod licenci open source, což znamená, že všechny zdrojové kódy, návrhy, tištěné spoje a veškeré tištěné části jsou volně přístupné veřejnosti a jsou dále inovativní. (1)

To, že byl tento projekt RepRap veřejně přístupný znamenalo, že každý kutil z celého světa mohl z těchto dat čerpat a dále inovovat díly. Tohoto projektu využil i Josef Průša a jeho firma se této idey drží dodnes, proto je k vidění velké množství podobných tiskáren od jiných výrobců. Tyto tiskárny jsou oproti profesionálním 3D tiskárnám mnohonásobně levnější. Nejlevnější tiskárny lze koupit od cca 5 tisíc korun.

Průša research disponuje svojí tiskovou farmou, ve které se nachází přes 600 tiskáren vyrábějící díly na nové tiskárny (viz obr. 17).

Obrázek 17 - Tisková farma Průša research (20)



V loňském roce dostala společnost příležitost reprezentovat Českou republiku v Dubaji na EXPO 2020 s plně automatizovanou 3D farmou, čítající 34 nových tiskáren COREXY Original Prusa, spolu s vyvinutým softwarem pro správu farmy a automatickými sběrnými a dávkovacími systémy. Aby se zajistila prostorová úspornost, je použitý rám ve tvaru krychle připomínající stojan počítačového serveru, zajišťující snadnou opravu, či výměnu případně porouchané tiskárny za provozu (viz obr. 18).

Obrázek 18 - Automatizovaná farma Průša research (21)



3.1.8 Využití 3D tisku

V začátcích 3D tisk sloužil především k výrobě prototypů, ale postupným vývojem se stal součástí i dalších využití. V dnešní době se využívá k malosériové výrobě, kdy se firmám pro nízký počet plánovaných výrobků ekonomicky nevyplatí výroba, např. forem na vstřikování plastů. V těchto případech sahají po rychlé a levné technologii 3D tisku. Výhodou 3D tisku je bezpochyby i nízká pracnost při úpravách výrobků, kdy se model pouze upraví v CAD softwaru a následně vytiskne, bez nutnosti nákladné úpravy, či nové

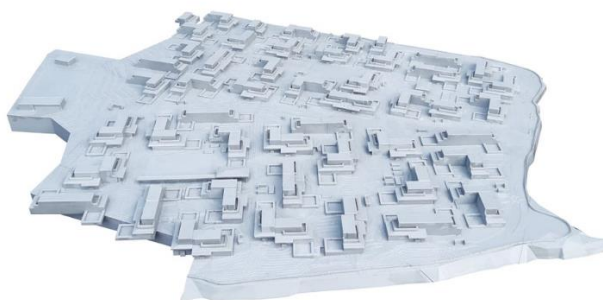
výroby vstřikovací formy. Možnost rychlé inovace tištěných výrobků je obrovskou výhodou 3D tisku.

3D tisk se velmi často využívá i pro výrobu nedostupných náhradních dílů. V praxi jsou často k vidění příklady, kdy pomocí technologie 3D tisku navrátí provozuschopný stav nefungujícího spotřebiče či odlomené části nábytku, pomocí vytištění chybějícího náhradního dílu.

Další výhodou je možnost vyrábět nejrůznější a jedinečné výrobky na jakémkoliv přání zákazníka. Zároveň se na různých internetových webech nachází velké množství již nakreslených modelů, které jsou volně přístupné veřejnosti. Z těchto webů jistě stojí za zmínku GrabCad, či Thinkgiverse.

3D tisk se využívá ve všech různých odvětvích. Důležitou roli plní v automobilovém průmyslu, při tvorbě prototypů. Velmi oblíbený se stává v architektuře a stavebnictví. K vytvoření fyzického modelu plánované výstavby domů, či celých čtvrtí se užívá ručně lepených často papírových částí, které jsou velmi pracné a náročné. S uvědoměním, že každý architekt už tento model má nakreslený v CAD softwaru, není nic jednoduššího, než tento model ve formátu STL nahrát do 3D tiskárny a model jednoduše, levně a rychle vytisknout. Příklad vytištěné vesnice je ukázán na obr. 19. (3)

Obrázek 19 - Vytištěný model vesnice pomocí FDM



Další odvětví, ke kterému 3D tisk neodmyslitelně patří je bezpochyby šperkařství a modelářství, kde vytištěný model slouží jako model k následnému odlévání. Především ve šperkařství je 3D tisk velmi oblíbenou pomůckou k odlití jedinečných šperků a modelářům k vytištění přesných RC modelů (viz obr. 20)

Obrázek 20 - RC Modely pomocí SLA



3D tisk je velmi oblíbený i v oboru sochařství. Z praxe vyplývá, že majitelé soch, ať už to jsou církve či muzea chtějí nahradit původní sochy věrnými kopiemi a to z důvodu stáří, poškození, či z obavy z odcizení vysoce cenných kusů a chtějí originální kusy uschovat. Vedle drahých a tradičních způsobů výroby jako je lití nebo vyřezání sochy ze dřeva, je výroba pomocí 3D tisku méně pracná, levnější a s přispěním 3D skeneru se zachovávají přesné rozměry původní sochy (viz obr. 21).

Obrázek 21 - Vytisknuté sochy pomocí FDM



3.1.9 Budoucnost 3D tisku

Co se týká výroby dělů pomocí 3D tisku, tak automatizace tiskáren je velkou budoucností. Tiskárny poté vyžadují pouze základní údržbu a obsluha tiskáren je minimální. Většinu práce za obsluhu vykoná software pro správu tiskové farmy a zároveň udrží náklady na nízké úrovni. (3)

Velká budoucnost v oboru 3D tisku souvisí s výzkumem nových materiálů. Vědci nejsou daleko od toho, aby bylo možné vytisknout biologické materiály, a tím tak nahradit jednotlivé orgány. Společnost Collplant se snaží vyvinout bio inkoust na bázi kolagenu,

který tvoří pojivo lidského těla. Dnes se již tisknou různé tělní implantáty, kosti, klouby a vývoj v této oblasti jde stále kupředu. Dále se stále více rozvíjí tisk potravin. (4)

Nejsou to ovšem jen medicínské materiály, které se vyvíjejí v oblasti 3D tisku. V současné době se firmy vysoce zaměřují na recyklovatelné plasty a bio plasty, které jsou šetrné k životnímu prostředí. Dále se velice rozvíjí tisk kovových materiálů. Dá se předpokládat, že v budoucnosti se 3D tisk bude využívat v každodenním životě, a 3D tiskárna bude součástí každé domácnosti. (16)

3.1.10 Volba technologie a materiálu

Volba technologie 3D tisku a druhu jeho materiálu závisí v první řadě na vlastnostech navrhovaného výrobku, který musí odpovídat funkčním požadavkům, ať už se jedná o kvalitu výrobku, přesnost, či mechanickou pevnost. Jelikož je sortiment materiálů široký, často se stává, že pro stejný účel může odpovídat více druhů materiálu i jednotlivých technologií 3D tisku. Rozhodujícím faktorem je v mnoha případech ekonomická náročnost výroby součásti, která je z velké části ovlivněná provozními náklady 3D tiskárny, dostupností a cenami materiálů. (22)

Při volbě materiálu se musí zvažovat všech provozních podmínek, ve které bude výrobek plnit svoji funkci. Téměř ve všech aplikacích je důležitá mechanická pevnost. Podle způsobu namáhání součásti se uvažuje dlouhodobá statická nebo dynamická (únarová) pevnost, rázová a vrubová houževnatost a konstrukční modul pružnosti materiálu. Pro krátkodobé velké namáhání je rozhodující mez kluzu nebo mez pružnosti, kdy ještě nenastanou trvalé deformace. Důležitým faktorem u mechanických vlastností materiálů je teplota. S vyšší teplotou klesá jejich pevnost a roste houževnatost. Také stárí materiálu, působení chemikálií na součást a povětrnostní podmínky zhoršují mechanické vlastnosti materiálů. (22)

3.2 Fyzikální vlastnosti polymerů

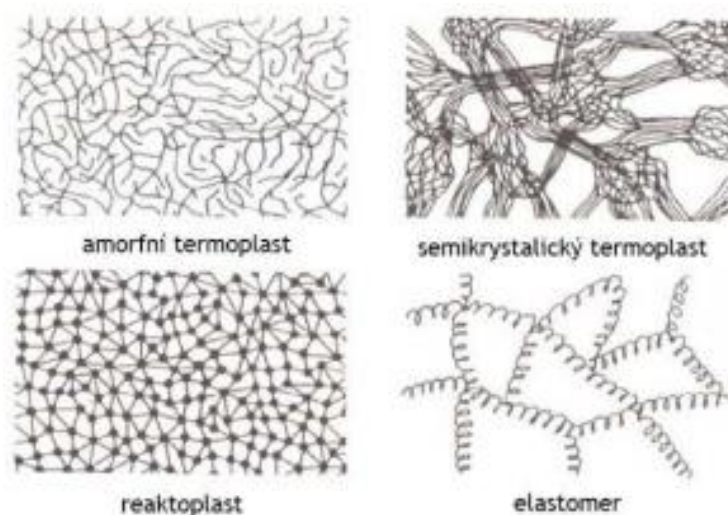
Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, které jsou tvořeny makromolekulami, skládajícími se z opakujících se monomerů a rozdělují se podle seřazení jednotlivých monomerů. Polymery, které jsou za běžných podmínek tvrdé, ale při zvýšené teplotě se stávají plastickými, lze označit jako plasty. (23)

Plasty jsou polymery, jenž lze za konkrétních podmínek tvarovat. V ustáleném stavu mají vlastnosti tuhých těles. Při jejich zpracování se většinou přidávají různá aditiva (maziva, změkčovadla, stabilizátory atd.), tak aby splňovaly požadované vlastnosti. Plasty lze dle základního členění, rozdělit do tří skupin. (24)

3.2.1 Termoplasty

Jedná se o plasty, které jsou teplem tavitelné. Působením tepla měknou až do stavu viskózního tečení. V tomto stavu se mohou dále tvarovat, bez ztráty původních vlastností a po ochlazení opět ztuhnou. Tento proces je opakovatelný. Termoplasty se dále dělí podle struktury na amorfní, které jsou charakteristické zcela nahodilou a neuspořádanou makromolekulární strukturou a semikrystalické, které se vyznačují částečně uspořádanou makromolekulární strukturou (viz obr. 22). (25)

Obrázek 22 - Struktury polymerů (26)



Tyto materiály využívá technologie FDM, kdy je materiál ve formě struny v extrudéru taven a tryskou vytlačován na tiskovou plochu, kde tuhne.

3.2.2 Reaktoplasty

Na rozdíl od termoplastů nejsou reaktoplasty teplem tavitelné, ale naopak tvrditelné. Po přivedení tepla tyto plasty přecházejí do tuhého a nerozpustitelného stavu a jejich makromolekulární struktura je síťovaná. Tyto síťované řetězce nelze teplem rozpojit, což znamená že je tento stav nevratný. (27)

Typickými reaktoplasty jsou tekuté pryskyřice, které jsou používány u SLA tiskáren a jim podobným, které pracují na principu vytvrzování materiálu pomocí světelných paprsků.

3.2.3 Elastomery

Tyto materiály se vyznačují velice nízkou tuhostí. Lze je lehce deformovat, aniž by došlo k porušení či trvalé deformaci. Spoje mezi řetězci v makromolekulární struktuře jsou přivedením tepla aktivovány a mohou se mezi sebou pohybovat. Hlavním představitelem elastomeru je kaučuk, ze kterého se pomocí vulkanizace vyrábí pryž. (28)

3.3 Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušky

Materiály mohou být při zpracování a používání vystaveny namáhání na tah, tlak, krut, střih a ohyb. Aby materiál mohl odolávat těmto namáháním, musí mít určité vlastnosti jako je pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost apod. Tyto vlastnosti lze měřit pomocí různých zkoušek, které se rozdělují na zkoušky statické a dynamické. Statické zkoušky jsou základem mechanického zkoušení materiálů, kde se zkoušený materiál zatěžuje postupně vzrůstající silou. U dynamických zkouškách síla působí nárazově, a proto se tyto zkoušky označují také jako rázové. (22)

Tvrdost lze definovat jako odpor, který klade daný materiál proti vnikání cizího tělesa. U těchto zkoušek se do zkušebního materiálu zatlačuje velmi tvrdé těleso ve formě kuličky, kuželu či jehlanu, podle typu prováděné zkoušky. Tvrdost se měří velikostí vtisku tělesa. Hodnotí se průměr, hloubka nebo úhlopříčka vtisku vzniklého po vtažení tělesa. První stupnice tvrdosti byla sestavena Friedrichem Mohsem v roce 1822, podle kterého je tato stupnice i pojmenována (viz tab. 1). Nejčastějšími zkouškami tvrdosti u plastů jsou zkoušky vtačováním kuličky, podle Rockwella nebo Shoreho. (29)

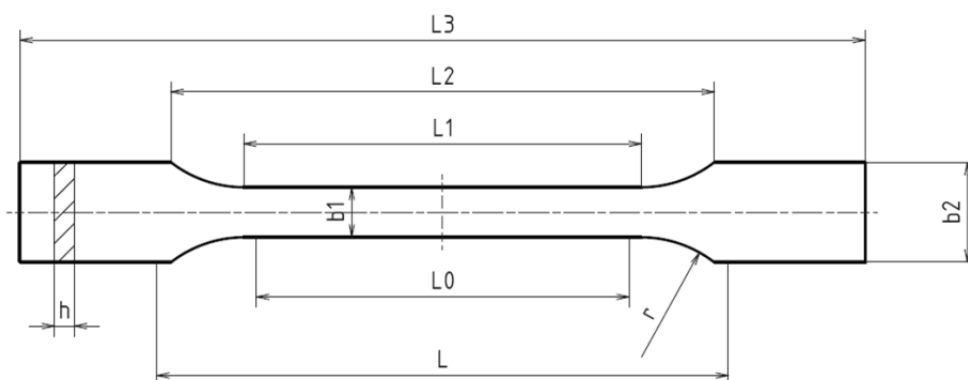
Tabulka 1 - Mohsova stupnice tvrdosti (30)

Mohsova stupnice tvrdosti	Látka / minerál
1	Mastek
2	sůl kamenná
3	Kalcit
4	Fluorit
5	Apatit
6	Živec
7	Křemen
8	Topaz
9	Korund
10	Diamant

3.3.1 Zkouška tahem

Jedná se o nejrozšířenější statickou zkoušku, při které se zjišťuje pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce materiálu. U plastových materiálů je zkouška tahem popsána normou ČSN EN ISO 527-1. Princip této zkoušky spočívá v protahování zkušební tělesa ve směru podélné osy za konstantní rychlosti až do jeho porušení nebo do předem zvolené hodnoty protažení či napětí v tahu. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a jeho prodloužení. Zkouška se z pravidla neuskutečňuje na již vyrobené součásti, nýbrž na zkušebním tělesu, jehož rozměry jsou dány podle normy, která dále uvádí, že minimálně počet těchto vzorků pro vykonání tahové zkoušky je 5 zkušebních těles. Normou předepsané rozměry zkušební tělesa lze odečíst z obr. 23 a tab. 2. (31)

Obrázek 23 - Zkušební těleso na zkoušku tahem (31)



Tabulka 2 - Normou předepsané rozměry zkušební vzorku na zkoušku tahem (31)

Značka	Rozměr	1A	1B	1BA	1BB
l_3	Celková délka	≥ 150		≥ 75	≥ 30
l_1	Délka zúžené části	80 ± 2	$60 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r	Poloměr	20 až 25	≥ 60	≥ 30	≥ 12
l_2	Rozpětí mezi širokým částmi	104 až 113	106 až 120	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Šířka konců	$20 \pm 0,2$		$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Šířka zúžené části	$10 \pm 0,2$		$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h	Tloušťka	$4 \pm 0,2$		≥ 2	≥ 2
L_0	Počáteční měřená délka	$50 \pm 0,5$		$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L	Počáteční vzdálenost čelistí	115 ± 1	$l_2 + 5$	$l_2 + 2$	$l_2 + 1$

Při statických zkouškách vzniká ve zkušebním tělese napětí, které lze definovat jako míra vnitřních sil, které vznikají působením vnějších sil. Napětí se rozděluje na dvě složky, normálové a tečné. Podíl síly a skutečné plochy průřezu zkoušeného tělesa se označuje jako skutečné napětí. V praxi se však užívá hodnota smluvního napětí z důvodu zanedbání změny průřezu tělesa, a proto se napětí vztahuje na původní průřez S_0 . Toto smluvní napětí představuje pevnost v tahu neboli mez pevnosti v tahu vyjádřeného vztahem 1. (22)

Mez pevnosti v tahu – představuje maximální napětí, vyjádřené poměrem maximální síly F_m , která působí během zkoušky na zkušební těleso a plochy průřezu zkušební tyče S_0 . Napětí meze pevnosti může být odlišné než napětí při přetržení zkušební tyče.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad [1]$$

Poměrné prodloužení – je vyjádřeno poměrem změny délky zkušební tyče ΔL , která vychází ze vztahu rozdílu délky po přetržení a původní délky zkušební tyče, a počáteční délky tyče L_0 .

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [mm] \quad [2]$$

Tažnost – jedná se o poměrné prodloužení vyjádřené v procentech.

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad [3]$$

Kontrakce – neboli zúžení, je dáno poměrem rozdílu počáteční plochy příčného průřezu zkušební tělesa S_0 a nejmenší plochy průřezu po přetržení zkušební tyče S_u k počáteční ploše průřezu S_0 . Kontrakce je uváděna v procentech.

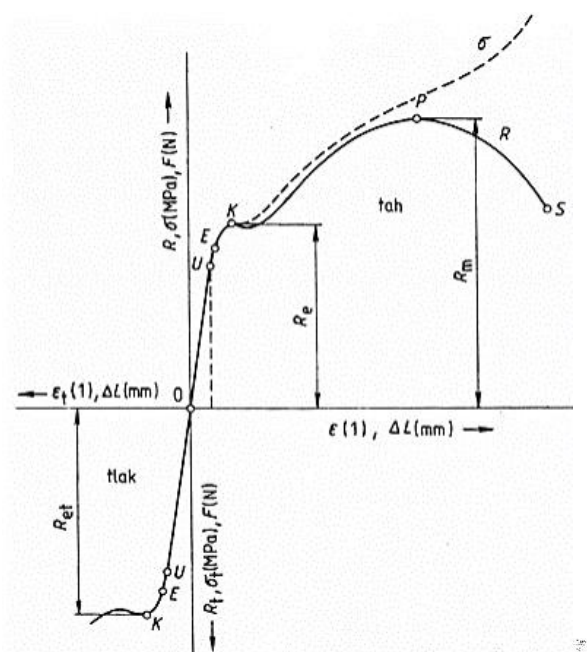
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad [4]$$

Při zkoušce tahový stroj zaznamenává tahový diagram, který udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí R (viz obr. 24). Z kraje diagramu je vývoj prodloužení zkušební tyče přímo úměrný vzrůstajícímu zatížení, kde lze průběh znázornit přímkou až do bodu U, který představuje velikost napětí, při kterém je prodloužení tyče ještě přímo úměrné napětí, vycházejícího z Hookova zákona (vztah 5). (22)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [MPa] \quad [5]$$

V dalším průběhu zkoušky přestává být prodloužení zkušební tyče přímo úměrné napětí. Mezi body U a E se jedná o deformaci pružnou, kdy se po odlehčení zkušební tyč navrátí do počáteční délky L_0 . Jestliže se však namáhání stále zvětšuje, dochází u materiálu k plastické deformaci, ze kterého se tyč nevrátí do počáteční délky. Napětí na bodu K lze definovat, jako mez kluzu v tahu, označované jako R_e . Při tomto napětí se zkušební tyč začne výrazně deformovat, aniž by se zvětšovala zatěžující síla. (22)

Obrázek 24 – Tahový diagram



3.3.2 Metoda vtlačování kuličky

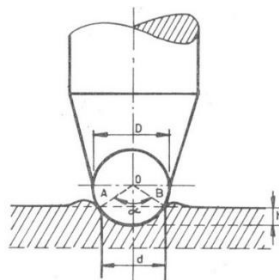
Zkouška je od roku 2000 popsána pro kovové materiály normou ČSN EN ISO 6506. Do té doby se zkouška prováděla pomocí ocelové kuličky, která však byla nahrazena tvrdokovovou kuličkou z důvodů menší zbytkové deformace, což se projevuje na vyšší spolehlivosti kuličky při měření a tím i možnost většího počtu zkoušek na jednu kuličku. Stanovení tvrdosti plastových materiálů metodou vtlačování kuličky popisuje norma ČSN EN ISO 2039-1.

Zkouška spočívá ve vtlačování tvrdokovové kuličky o průměru D do zkušebnímu materiálu zatěžovací silou, která směřuje kolmo k povrchu zkušebnímu tělesa po stanovenou dobu (viz obr. 25). Vnikající kulička vytvoří plastickou deformaci na zkoušeném materiálu o vtisku kruhového průřezu. Poté se po odlehčení změří průměr vtisku. Tvrdost dle Brinella označovaná jako HBW lze určit ze vztahu jako poměr zkušebnímu zatížení F k povrchu vtisku, kde D představuje průměr kuličky a d průměr vtisku. (32)

$$HBW = 1,02 \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [6]$$

Zkouška se provádí přímo na povrchu zkoušeného materiálu nebo součásti, která musí být čistá, rovná a hladká. Tloušťka materiálu musí být alespoň osminásobek hodnoty vtisku a teplota, při níž je zkouška prováděna, musí být v rozmezí 10 až 35°C. Doba plného zatížení by měla být mezi 10 až 15 s. Podmínkou pro přesnost zkoušky je správné proměření vtisku, což bývá u této zkoušky častým problémem z důvodu mnohdy nezřetelného a nesouměrného vtisku. Další nepřesnosti zaručují možné deformace kuličky z tvrdokovu. Pro měření vtisku se v dnešní době využívají přesné optické měřicí zařízení. (22)

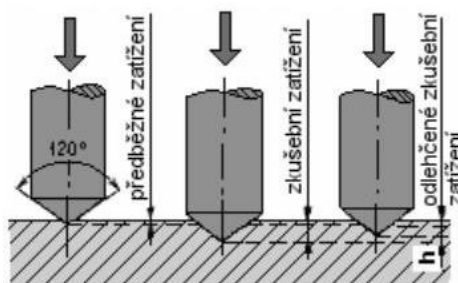
Obrázek 25 - Schéma metody vtlačování kuličky



3.3.3 Tvrlost podle Rockwela

Tato zkouška je u plastových materiálů dána normou ČSN EN ISO 2039-2 a spočívá ve vtlačování vnikajícího tělesa v podobě diamantového kuželu o vrcholovém úhlu 120° či tvrdokovové kuličky o průměru 1,5875 nebo 3,175 mm a následném měření hloubky vtisku (viz obr. 26). Vtlačování tělesa probíhá ve dvou fázích. V první fázi se těleso vtlačuje do zkušebnímu materiálu předběžnou silou F_0 o velikosti 98,07 N. V té druhé se vtlačuje přídatnou silou F_1 , která se liší podle stupnice tvrdosti, která je dána normou. Celková velikost zkušebnímu zatížení je součet těchto dílčích zatížení. Diamantový kužel vytvoří ve zkušném materiálu vtisk, u kterého se dále měří jeho hloubka.

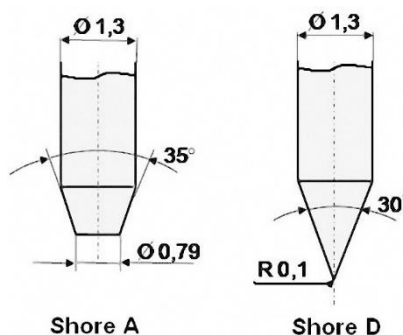
Obrázek 26 - Schéma tvrdosti dle Rockwella



3.3.4 Shore

Tato zkušební metoda patří mezi dynamické zkoušky tvrdosti. Její princip je založen na pružném odrazu tělesa komolého kužele (SHORE – A), nebo tělesa ve tvaru kužele s kulatým vrchlíkem (SHORE – D). Při nárazu tělesa do zkušebnímu materiálu se část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu a část energie se projeví v odrazu tělesa. Metoda SHORE – A se využívá pro měkké polymery, kdy velikost přítláčné síly odpovídá 10 N, kdežto metoda SHORE – D se používá pro tvrdé polymery s přítláčnou silou 50 N (viz obr. 27).

Obrázek 27 – Hroty dle Shoreho



3.4 SEM – Skenovací elektronová mikroskopie

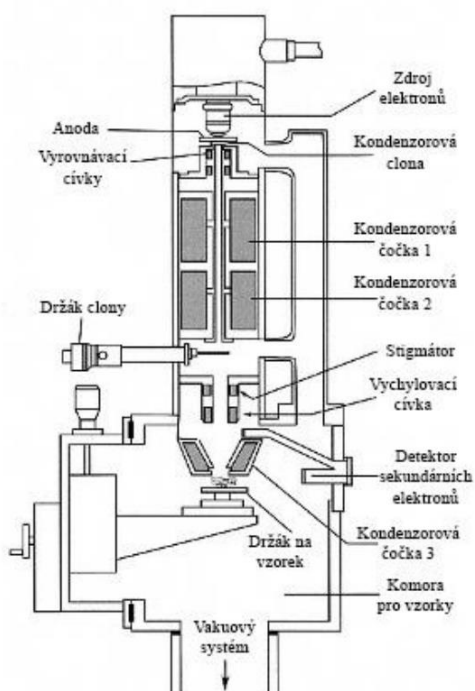
Skenovací nebo také rastrovací elektronová mikroskopie slouží k pozorování a detailní charakteristice organických i neorganických materiálů. Za určitých předpokladů lze konstatovat, že je tato metoda analogií světelného mikroskopu. Avšak možné rozlišení SEM je oproti světelnému mikroskopu a možné zvětšení je mnohonásobně vyšší. (33)

Principem metody SEM je detekování sekundárních elektronů emitovaných preparátem po vzájemném působení s primárním uskupením elektronů. Toto primární uskupení elektronů je koncentrován do velice malého bodu, označovaného jako křížičště, a skenuje (rastruje) povrch bod po bodu. (34)

Elektrony jsou částice se záporným nábojem. Přijímat či vyzařovat energii mohou pouze za daného množství. Mají duální charakter, což znamená, že mají vlastnosti vln a také částic. Elektronová vlnová délka je výrazně kratší, než je tomu u světelného paprsku. Díky tomu je možné za využití proudu elektronů docílit kvalitnějšího rozlišení a přiblížení, než je tomu u proudu světla. (33)

SEM disponuje různými detektory jako je detektor sekundárních elektronů, zpětně odražených elektronů, katodoluminiscence a polovodičový detektor. Schéma SEM je na obr. 28.

Obrázek 28 - Schéma SEM



3.4.1 Příprava vzorků

Vzorky, které jsou pozorovány skenovacím elektronovým mikroskopem je předem nutné speciálně připravit. Příprava je velmi pracná a časově náročná. Je nutné, aby vzorek byl pod svazkem elektronů stabilní. Vzorek musí být dokonale vysušen a odmaštěn. Podstatné je, aby vzorek byl elektricky vodivý, proto u nevodivých či biologických materiálů nejprve dochází k pokovování. Nejčastěji se pro pokování používá zlato, které se nanese ve speciálním zařízení ve velmi tenké vrstvě z pravidla 10-20 nm. (33)

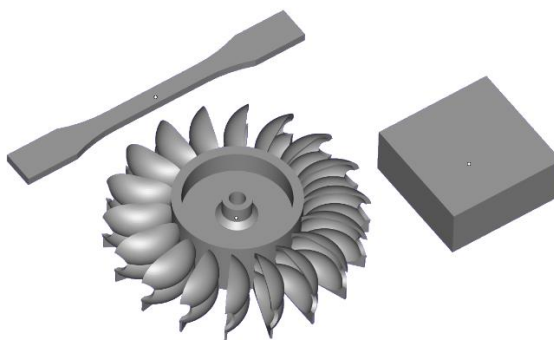
4 PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci této diplomové práce jsou zkoumány mechanické vlastnosti materiálů u různých technologií 3D tisku a jejich následné porovnání z pohledu kvality tisku. Mezi vybranými technologiemi pro výzkum jsou FDM, využívající roztaveného materiálu ve formě filamentu, SLA, vytvrzující materiál v podobě tekuté pryskyřice pomocí světelných paprsků a technologie MJP, pracující na principu piezoelektrické tiskové hlavy. Mechanické vlastnosti jsou zkoumány pomocí zkoušky tahem a zkoušky tvrdosti metodou vlačování kuličky. Kvalita vytištěných částí z různých 3D tiskáren je porovnávána vizuálně, pomocí mikroskopu a vnitřní struktura vzorků je porovnávána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Nejprve však bylo nutné zkoušené vzorky nakreslit v CAD softwaru a následně vytisknout na různých 3D tiskárnách.

4.1 Příprava a tisk

Nejprve bylo zapotřebí jednotlivé zkušební vzorky vymodelovat. Zde bylo nutné držet se doporučených rozměrů, které stanovují jednotlivé normy zkoušek. Na zkoušku tahem dle normy ČSN EN ISO 527-1 byl zvolen zkušební vzorek BA a pro zkoušku tvrdosti kvádr o rozměrech 35 x 35 x 15 mm (viz obr. 29). Tyto zkušební vzorky byly vymodelovány pomocí softwaru SolidWorks 2017. Pro porovnání kvality jednotlivých technologií 3D tisku byl zvolený model Peltonovy turbíny, z důvodu nízkého stoupání lopatek turbíny. Toto nízké stoupání je ideální pro porovnání kvality tisku. Model Peltonovy turbíny byl převzat z webu thingiverse.com, kde se vyskytuje celá řada již vymodelovaných součástí, které jsou vhodné k využití 3D tisku.

Obrázek 29 - Vytištěná tělesa pro praktickou část



Dále bylo zapotřebí připravit modely k tisku na jednotlivých 3D tiskárnách, avšak u každé technologie se příprava modelů zásadně liší.

4.1.1 FDM

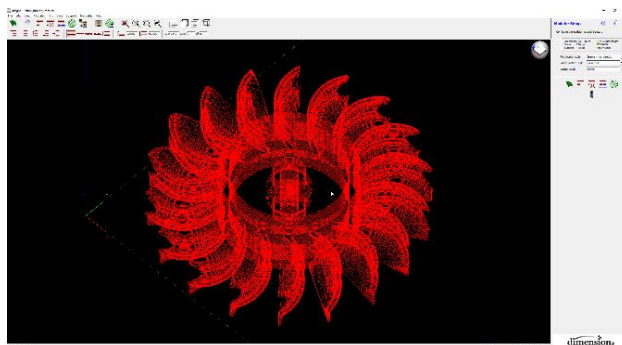
K výzkumu byla použita profesionální 3D tiskárna od společnosti Stratasys s modelovým označením Dimension BST 1200es (viz obr 30), která disponuje dvojitým extrudérem, zaručující tisk nejen stavěcího materiálu, ale zároveň i materiálu podpurného, který je využíván pro tisk modelů složitých tvarů. Tiskárna o tiskovém objemu 254x254x305mm je primárně určena pro tisk z materiálu PC, ABS a jím podobných.

Obrázek 30 - Dimension BST 1200es



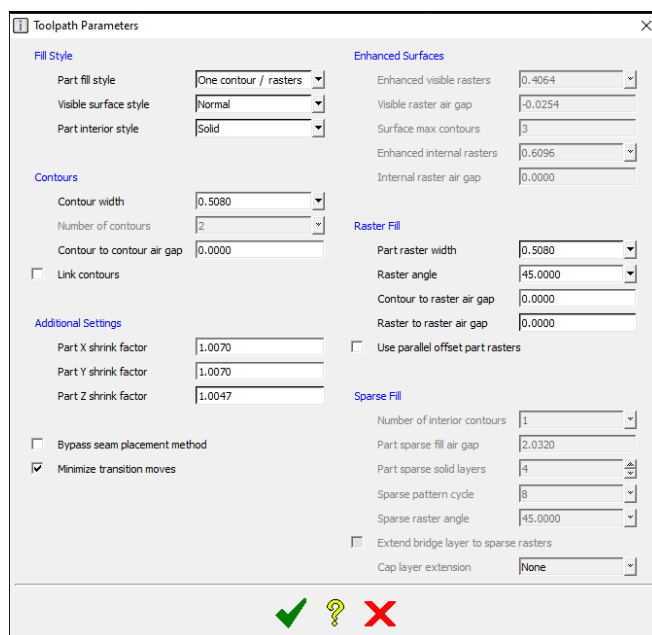
Tyto tiskárny od společnosti Stratasys využívají k tvorbě automatických podpor a následného získání G-kódu, který zaručuje pohyby extrudéru, software Insight. V tomto programu byly modely zkušebních těles nakrájeny na jednotlivé vrstvy. Standartně se zvolila vrstva krájení 0,254 mm, avšak u jedné sady zkušebních vzorků se zvolila tlustší vrstva nakrájení 0,3302 mm, a to z důvodu následného porovnání mechanických vlastností.

Obrázek 31 – Nakrájení modelu v Insight



Tloušťka nakrájení 0,3302 mm se využívá pro tisk objemnějších modelů a oproti tloušťce 0,254 mm urychlí celý proces tisku až o 30 %. Po nakrájení jednotlivých vrstev se nastavily parametry tisku. Tloušťky jednotlivých kontur může být u této 3D tiskárny v rozmezí od 0,3658 mm do 0,9408. Použita byla tloušťka kontury 0,5158 mm, rastr 0,4064 mm a ostatní parametry viz obr. 32. K tisku zkušebních těles se použil tiskový styl Solid, který by měl mít hustší a pevnější strukturu tisku.

Obrázek 32 - Parametry tisku FDM



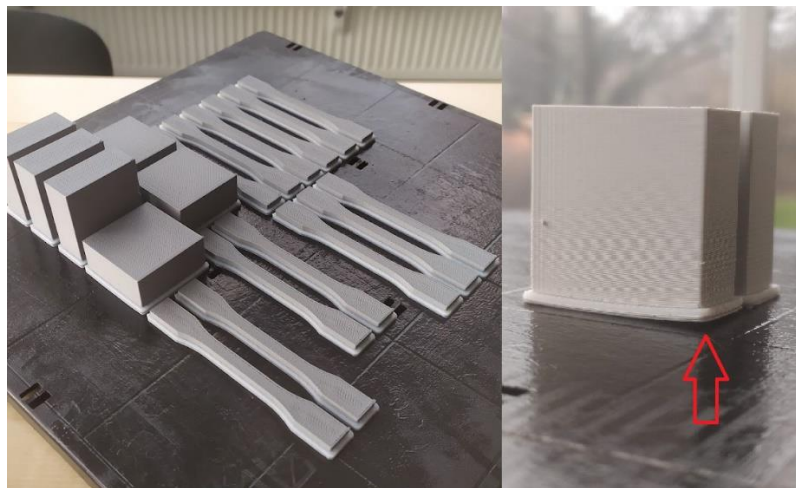
Po vypočítání jednotlivých vrstev a drah extrudéru se pro odeslání tisku do 3D tiskárny a následné nastavení pozice tisku využívá software Control Center. Zde se zobrazuje plánovaný čas tisku, spotřebovaný materiál, zbývající materiál, teploty v 3D tiskárně atd.

U tisku touto technologií se použily materiály od českého výrobce Fillamentum, a to materiál ASA – white aluminium, ASA – metallic grey, ABS – green a kombinace materiálů PC/ABS. Dva materiály ASA s rozdílem barvy se použily z důvodu porovnání mechanických vlastností těchto barev, protože se občas stává, že mechanické vlastnosti stejných druhů materiálu se liší při odlišné barvě.

Následný tisk z materiálů ABS a ASA proběhl bez problémů, avšak u materiálu PC/ABS, který má vysokou teplotní roztažnost, se podle očekávání tištěné modely

ohýbaly, kroutily a odlupovaly se od tiskové podložky (viz obr.33). Tento jev je pro tento materiál typický, a proto je také méně oblíbeným materiálem v oblasti 3D tisku.

Obrázek 33 - Problém u tisku FDM

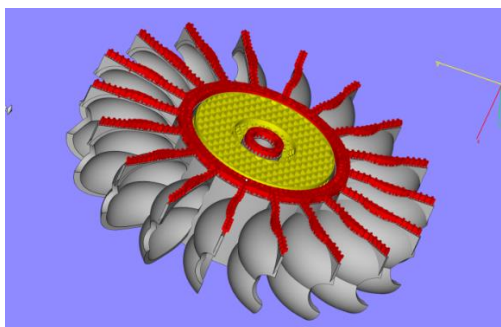


Po vytištění zkušebních vzorků, byla část vzorků z materiálu ASA smáčena do ethylmethylketonu, který zaručí vyhlazení jednotlivých vrstev a následný povrch je hladký a lesklý, avšak nebylo jisté, zda se po tomto úkonu také nezmění mechanické vlastnosti.

4.1.2 SLA

Příprava modelů na tisk touto technologií je ze všech nejsložitější a nejpracnější. Podpory se zde musejí vytvářet manuálně a doporučuje se zde podporovat nejen části, které jsou v převisu, ale i celé základny modelů. Pro tvoření podpor byl využit software Materialize Magic 21, který je pro tvorbu podpor a následných úprav modelů pro 3D tisk ideální. U tělesa pro zkoušku tahem byla vytvořena tzv. linková podpora, pro kvádr ke zkoušce tvrdosti využita bloková podpora a k podpoření Peltonovy turbíny byla zvolena kombinace obou těchto druhů podpor (viz obr. 34).

Obrázek 34 - Podpory u tisku SLA



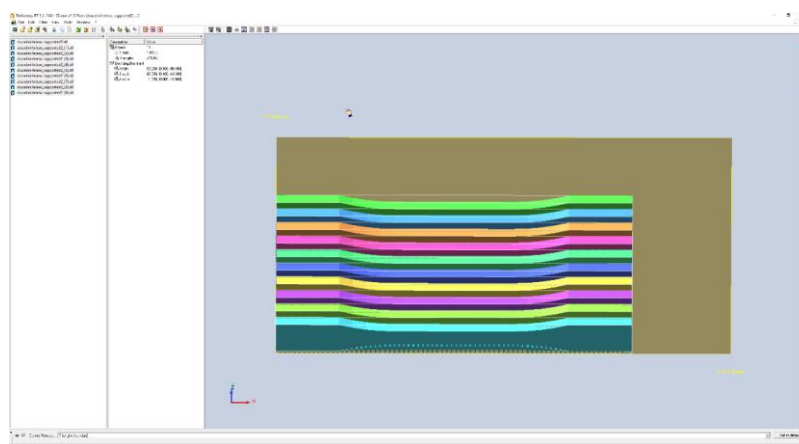
K tisku byla využita tiskárna EnvisionTec Perfactory 4 (viz obr. 35), která využívá k vytvrzení tekuté pryskyřice osvit pomocí projektoru. Tato tiskárna disponuje tiskovou platformou o velikosti 114 x 72 mm, rozlišením 900 DPI a možností tisknout vrstvy až 25 μ m tenké.

Obrázek 35 - EnvisionTec Perfactory 4



K vypočtení jednotlivých vrstev slouží software Perfactory RP. V tomto programu je dále nutné nadefinovat jednotlivé časy osvitů. Toto nastavení se nazývá Buildstyle a je pro každý materiál odlišný. Zde se také jednotlivé modely rozmístí na platformu (viz obr. 36). Po vypočtení jednotlivých vrstev se k poslání tohoto souboru do 3D tiskárny využívá softwaru Perfactory Direct.

Obrázek 36 - Perfactory RP



Před samotným tiskem je důležité tiskárnu kalibrovat na předepsanou sílu osvitů. Této kalibrace je docíleno pomocí senzoru, který je postupně umísťován na kalibrační desce

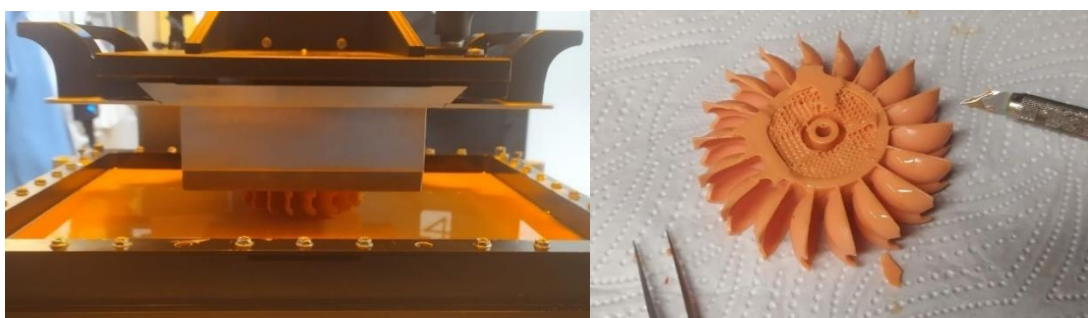
přesně tam, kam projektor promítá jednotlivé kalibrační skvrny. U každého materiálu se tato kalibrace provádí na odlišnou sílu osvitu.

K tisku byl použit originální materiál Envisiontech RCP30, což je teplotně odolný keramický materiál oranžové barvy, který se hodí na master modely pro odlévané a vstříkované formy, avšak je velmi drahý. Cena tohoto materiálu se pohybuje nad 10 000 Kč za 1 litr. Jako druhý materiál byl použit M70, který není tolik teplotně odolný, když při cca 80 °C měkne a dá se mírně tvarovat, ale má velmi podobné kvalitativní vlastnosti a lze také využít pro master modely pro odlévání. Jedná se o neoriginální materiál dovážený z Číny a cena tohoto materiálu je mnohonásobně nižší (okolo 1 000 Kč za 1 litr), a proto je velice zajímavý k porovnání mechanických vlastností při následných zkouškách.

U obou materiálů byla tloušťka jedné vrstvy nastavena na 25 μm . U materiálu M70 byla nastavena doba osvitu na 4 s, pauzu před expozicí 3 s a síla osvitu na 750 mV. U materiálu RCP 30 byla určena doba osvitu na 5 s, pauza před expozicí 8 s a síla osvitu 650 mV.

Čas tisku Peltonovy turbíny na tiskárně EnvisionTech byl 4 hodiny a 54 minut a samotný tisk nebyl ovlivněn žádnými problémy, avšak po vytištění je vždy zapotřebí odstranit přebytečné podpory, což je mnohdy velice náročné a vyskytuje se zde vysoké riziko následného poškození vytištěného modelu (viz obr. 37).

Obrázek 37 - Průběh tisku a odstranění podpor SLA

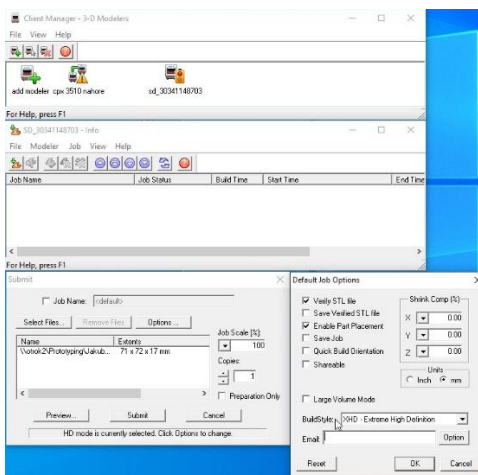


Po vytištění modelů běžně následuje proces tzv. vytvrzení, které se provádí ve speciálním přístroji za pomoci záblesků UV lampy. Toto vytvrzení má za cíl zlepšit teplotní odolnost materiálu a zároveň jeho tvrdost. K výzkumu toho, jak se změní tvrdost po tomto procesu se jedna sada zkušebních vzorků z tohoto vytvrzení vynechala, aby byla možnost následného porovnání.

4.1.3 MJP

Zde na rozdíl od předešlých technologií 3D tisku, není zapotřebí žádná příprava 3D modelů. Do tiskového programu Client Manager se pouze nahrají 3D modely ve formátu STL, vybere se požadované rozlišení a následně se data odešlou do 3D tiskárny (viz obr. 38). Potřebné podpory se vypočítají automaticky, bez nutnosti zásahu obsluhy.

Obrázek 38 - Client Manager pro MJP tisk



K tisku touto technologií se využila tiskárna ProJet 3510 SD (viz obr. 39), disponující zásobníkem až pro 4 různé materiály. Tisková platforma je o rozměrech 275x150mm. Je možné volit ze tří různých rozlišení tisku – HD (375 x 375 x 790 DPI), UHD (750 x 750 x 890 DPI) a XHD (750 x 750 x 1600 DPI) s tloušťkami 32, 29 a 16 μ m.

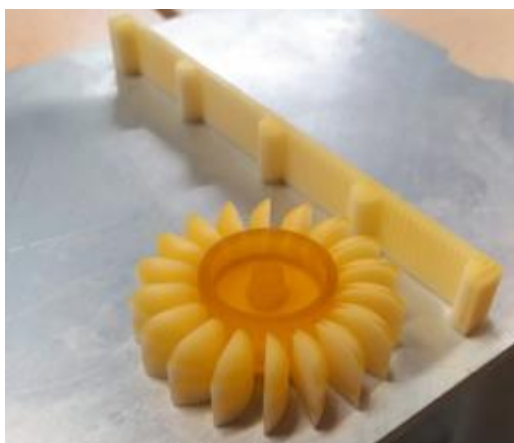
Obrázek 39 - ProJet 3510 SD



K tisku byl použit stavěcí materiál VisiJet M5 MX, což je odolný plastový materiál ideální pro funkční testování s typicky plastovým vzhledem a podpůrný voskový materiál VisiJet S300. Tisk byl nastaven na nejvyšší rozlišení XHD (750 x 750 x 1600 DPI).

Tisk Peltonovy turbíny byl ze všech technologií časově nejnáročnější. Doba tisku byla 17 hodin a 16 minut. Samotný tisk všech zkušebních vzorků i Peltonovy turbíny se obešel bez problémů. Jak je na obr. vidět, tak s tištěným modelem se tiskne i mřížka, která se vkládá automaticky při každém tisku (viz obr. 40). Na této mřížce se následně zkoumá, zda piezoelektrická hlava tiskne na všech místech stejně a nedochází například k ucpání jednotlivých trysek, což je častý problém u těchto tiskáren.

Obrázek 40 - Vytištěný model MJP



Po vytištění modelů, je nutné odstranit přebytečný podpůrný materiál. Toho se docílí v tepelné peci nastavené na cca 80 °C, kdy při této teplotě podpůrný materiál roztaje, avšak v této peci se nedocílí úplného odstranění podpůrného materiálu z modelu. Proto se dále model ponořuje do rozehřáté olejové lázně, kde se podpůrný materiál definitivně oddělí od modelu. Nevýhodou tohoto postupu je výskyt možné deformace modelů vlivem působícího tepla a zároveň jsou modely po máčení v olejové lázni mastné, proto je vhodné ještě vytištěné modely odmastit.

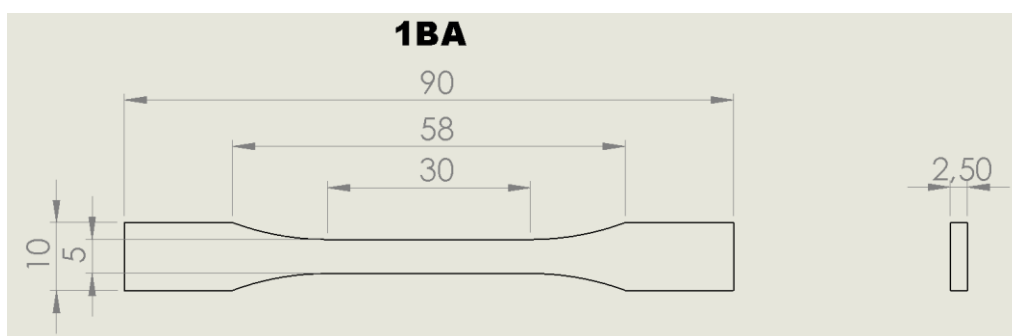
4.2 Zkouška tahem

U zkoušky tahem bylo postupováno dle normy ČSN EN ISO 527, která detailně popisuje tuto zkoušku, která je jednou z nejpoužívanějších statických zkoušek všech druhů materiálů. Za cíl je získat tahové diagramy, stanovit a porovnat mezi sebou mez pevnosti materiálů různých technologií a jejich tažnost.

4.2.1 Zkušební těleso

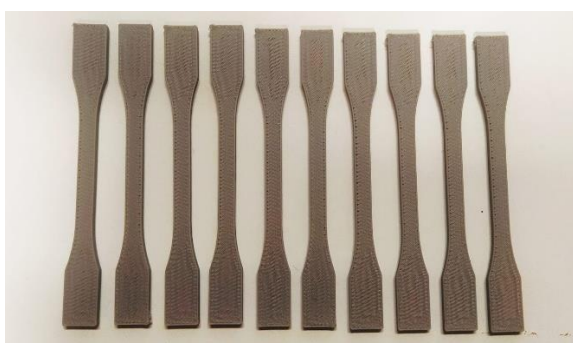
Pro zkoušku tahem jsou rozměry zkušebního tělesa dány normou ČSN EN ISO 572-2. Ideálními rozměry pro zkoušku tahem jsou rozměry zkušebního tělesa typu A nebo B, avšak u těchto typů zkušebních těles by nastal u SLA tiskárny problém, kdy by se zkušební těleso nevešlo na tiskovou platformu. Proto bylo zvoleno zkušební těleso typu BA (viz obr. 41)

Obrázek 41 - Rozměry zkušební vzorku zkoušky tahem



Z každého materiálu bylo vytištěno deset zkušebních vzorků (viz obr. 42). Celkem bylo zkoušeno 11 sad zkušebních vzorků, které tvořily pouze různé materiály z různých technologií 3D tisku, ale i různá nastavení tisku, následné úpravy (vytvrzení či vyhlazení) nebo různé geometrie tisku.

Obrázek 42 - Vytištěné vzorky pro zkoušku tahem

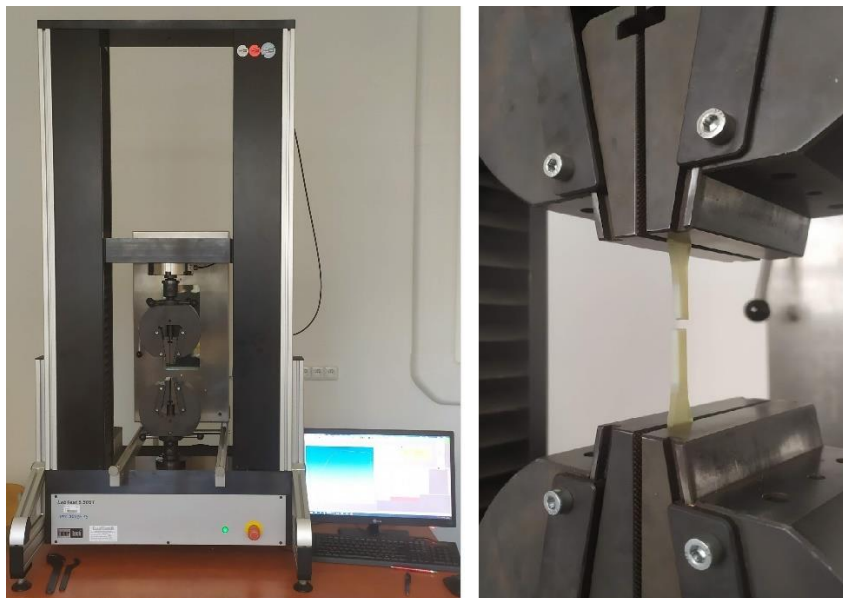


4.2.2 Universální zkušební stroj

K provedení zkoušky tahem byl použit universální zkušební stroj od společnosti LaborTech (viz obr. 43). Zkouška se prováděla při pokojové teplotě cca 23 °C a vlhkosti přibližně 55 %. Pro zkoušku se použily dvě různé rychlosti zatížení. Nejprve se postupovalo s rychlostí zatěžování 1 mm/min a poté pro srovnání výsledků s rychlostí 10

mm/min. Počet zkušebních vzorků v jedné sadě prováděných zkoušek se určil na 5 kusů, což odpovídá dané normě.

Obrázek 43 - Trhací stroj LaborTech



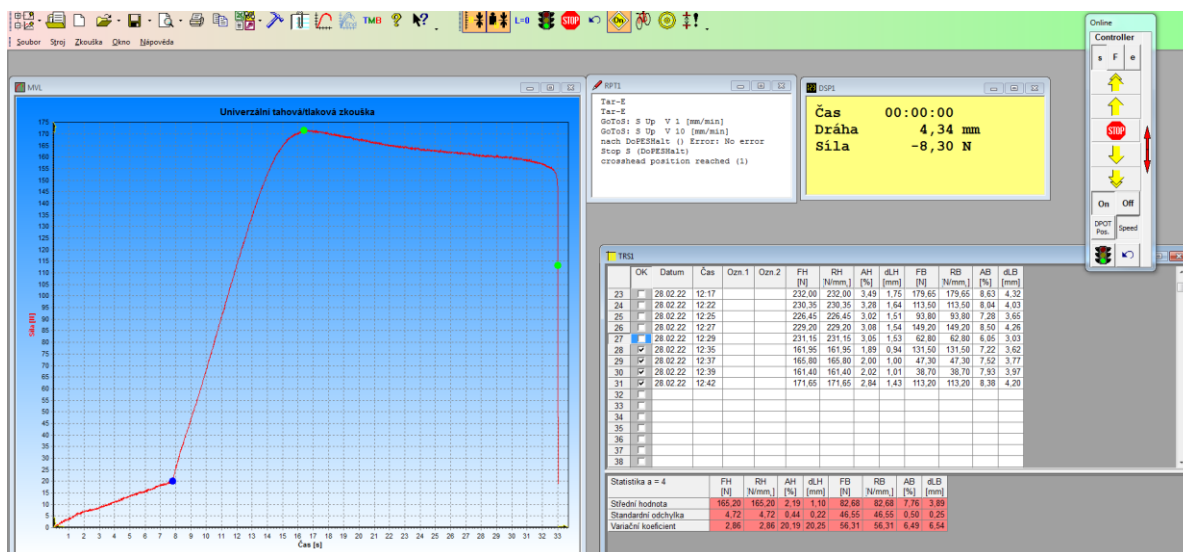
Zkušební vzorky se upevňují mezi čelistmi zkušebního stroje a následné oddalování těchto čelistí zaručí přetržení zkušebního vzorku. Přetržení zkušební tyče musí nastat v oblasti mezi krčky zkušebních vzorků (viz obr. 44).

Obrázek 44 - Přetrhané vzorky



Výsledné hodnoty zkoušky tahem se zapisují do informačního zařízení s příslušným softwarem (v tomto případě se jedná o software Test & Motion), kde se vytvoří tahový diagram (viz obr. 45).

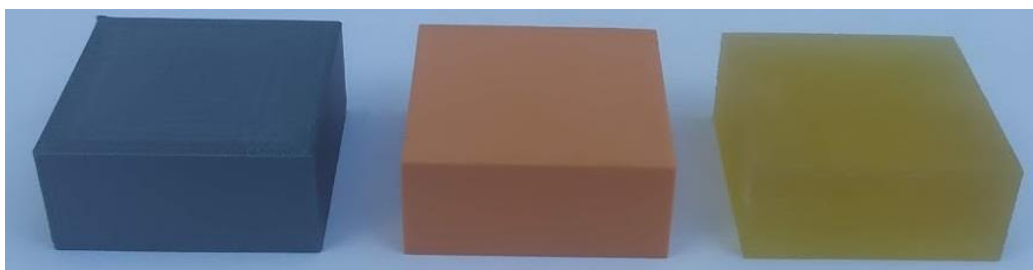
Obrázek 45 - Test & Motion - Tahová zkouška



4.3 Zkouška tvrdosti vnikáním kuličky

K určení tvrdosti se užila metoda vnikání kuličky, která je popsána normou ČSN EN ISO 6506. Jako zkušební těleso byl zvolen kvádr o rozměrech 35 x 35 x 15 mm (viz obr.46).

Obrázek 46 - Kvádry pro zkoušku tvrdosti



4.3.1 Tvrdoměr

K této zkoušce se využil stolní tvrdoměr DuraJet G5 od společnosti EmcoTest (viz obr.47). Jedná se o univerzální tvrdoměr s možností měření dle Brinella, Rockwella i Vickerse s rozsahem zkušebních zatížení od 9,8 N do 2 450 N. Tvrdoměr po vtisknutí tělesa automaticky vyhodnocuje průměr vtisku a tím tak urychluje celý proces měření.

Obrázek 47 - Tvrdoměr DuraJet



Jako vnikající těleso se použila diamantová kulička o průměru 5 mm, zkušební zatížení o velikosti 132 N a času zatížení 37 s. Počet zkušebních měření jednoho materiálu se stanovilo na deset.

4.4 Zkoušené materiály

U technologie FDM byly porovnávány velice podobné materiály. Byly jimi ABS, ASA a kombinace PC/ABS. Zajímavé bylo sledovat, jak se změní výsledky provedených zkoušek při zvolení tlustší vrstvy tisku, a především při vyhlazení vrstev ethylmethylketonem. Dále se u materiálu ASA zvolily dvě barevné varianty, u kterých bylo zkoumáno, zda mají stejné mechanické vlastnosti.

U technologie SLA byly porovnávány materiály M70 a RCP30. Materiál M70 je neoriginální velice levný materiál, avšak jeho tiskové a kvalitativní vlastnosti jsou velice přívětivé. Materiál RCP30 je originální keramický materiál od společnosti EnvisionTech, avšak jeho cena je mnohonásobně vyšší než u materiálu M70. Je tedy zajímavé zkoumat, zda levný materiál M70 bude mít podobné mechanické vlastnosti jako drahý originální RCP30. Dále se porovnává vliv následného vytvrzení a poloha tisku na výšku od polohy na plocho.

U technologie MJP se použil k porovnání s materiály z ostatních technologií materiál VisiJet M5 MX. Zásadní porovnání mechanických vlastností zde přichází s technologií

SLA, kterou MJP alternativně při tisku velmi složitých modelů na podpoření, které by bylo složité až nemožné.

4.5 Výzkum kvality povrchu

Porovnání jednotlivých technologií 3D tisku z hlediska kvality tisku bylo provedeno pomocí mikroskopu Zeiss Stemi 508 na modelu Peltonovy turbíny, která byla vytištěna z materiálů ASA, M70 a VisiJet M5 MX, představující každý jednu technologii 3D tisku (viz obr. 48).

Obrázek 48 - Vytištěná Peltonova turbína



Již po vytištění je patrný rozdíl v kvalitě povrchu jednotlivých turbín, avšak pro detailnější porovnání povrchu bylo využito mikroskopu Zeiss Stemi 508 s možností zvětšení od 0,63x do 5x (viz obr. 49).

Obrázek 49 - Mikroskop Zeiss 508



Pro porovnání na Peltonově turbíně pomocí mikroskopu byly využity lopatky turbíny, kde je velmi nízké stoupání, tudíž je příkladně viditelný rozdíl mezi vrstvami. Na mikroskopu se použilo zvětšení 0,63x, tak aby byly patrné jednotlivé vrstvy materiálu.

4.6 Výzkum vnitřní struktury pomocí SEM

Z přetřhnutých vzorků ze zkoušky tahem se zkoumala vnitřní struktura vytisknutých vzorků z různých technologií. Nejprve však bylo nutné vzorky důkladně očistit, odmastit a zlatem pokovovat. To proběhlo ve speciálním přístroji Quorum Q150Res, který je přímo určený pro pokovování vzorků pro metodu SEM (viz obr. 50).

Obrázek 50 - Pokovovací přístroj Quorum Q150Res



Parametry pokovování byly nastaveny takto:

Tabulka 3 - Parametry pokovování

Material	Gold	Gas Bleed Time	15s
Sputter Current	20mA	Stage Rotated Speed	60
Sputter Time	60s	Pump Hold Time	2
Tooling Factor	1,00	Vent Time	70
Pump Hole	NO	Bleed Gas Flush Cycles	0

Pozlacené vzorky se poté upevnilý na hliníkové destičky, připevnili vodící páskou a byly vsunuty do komory SEMu. K obrazové analýze vnitřní struktury vzorků se využil systém SEM TESCAN MIRA3 GTX (viz obr 51).

Obrázek 51 - SEM TESCAN MIRA3 GTX



Parametry zvětšení u jednotlivých snímků byly nastaveny takto:

Tabulka 4 - Parametry zvětšení SEM

	Snímek 1	Snímek 2
SEM HV	10 kV	10 kV
SEM MAG	55x	4 000x
View field	4,99 mm	69,2 μ m

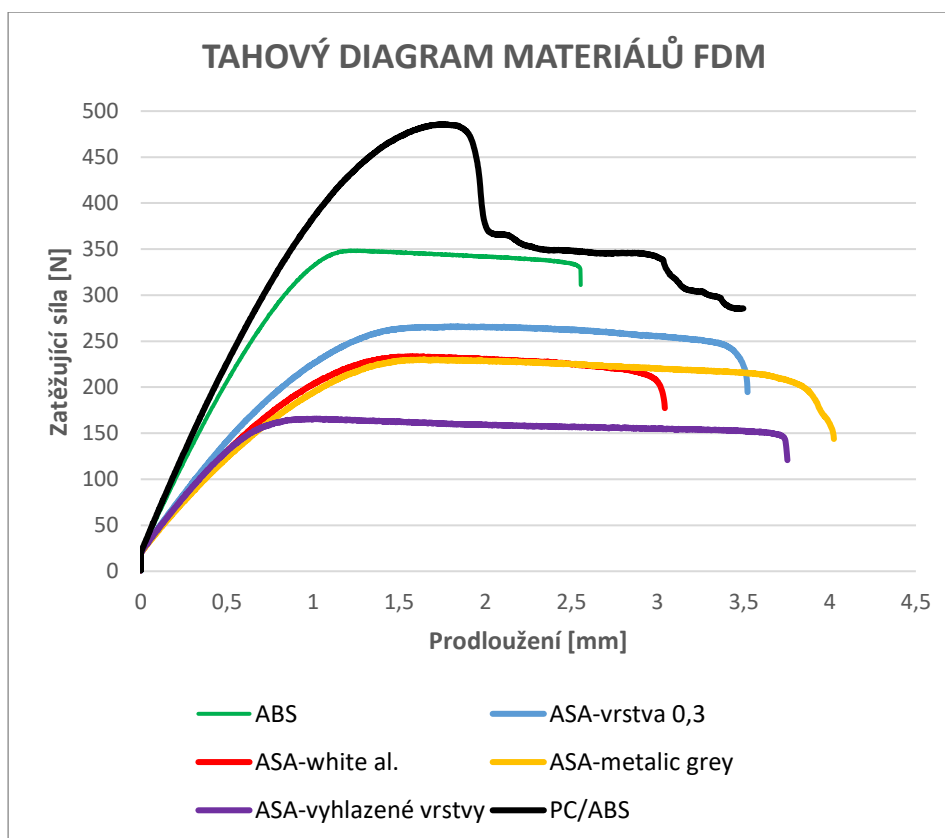
5 VÝSLEDKY A DISKUSE

Tato část diplomové práce se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot ze zkoušky tahem, zkoušky tvrdosti metodou vlačováním kuličky a výzkumu kvality povrchu a vnitřní struktury. Z naměřených a vypočtených hodnot se dále vypočítal aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Všechny výsledky se následně zahrnuly do grafů v Microsoft Excel.

5.1 Vyhodnocení zkoušky tahem

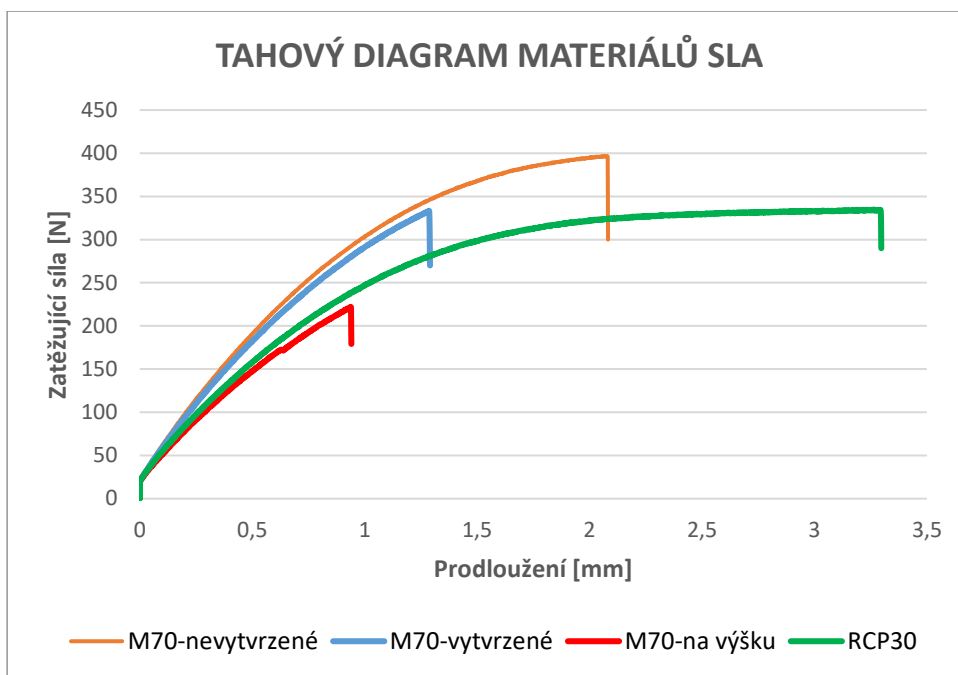
Výsledkem tahové zkoušky je tahový diagram, ze kterého lze odečíst maximální zatěžující sílu při přetržení zkušebního vzorku a jeho prodloužení. Dále se z průměrných hodnot vypočítala mez pevnosti a procentuální tažnost materiálů. Výsledky se dále porovnávají v jednotlivých grafech.

Graf 1 - Tahový diagram materiálů FDM



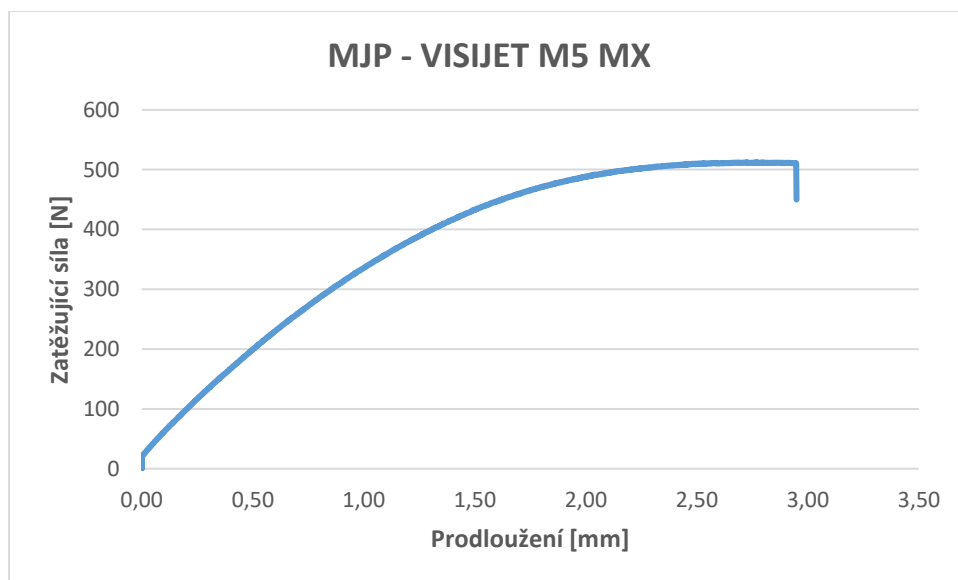
Graf 1. vykazuje průběh tahových zkoušek u materiálů tisknutých technologií FDM. U materiálů ASA a ABS došlo k úplnému přetržení, avšak u materiálu PC/ABS došlo k přetržení jen vnitřních vláken a obvodová vlákna byla dále protahována.

Graf 2 - Tahový diagram materiálů SLA



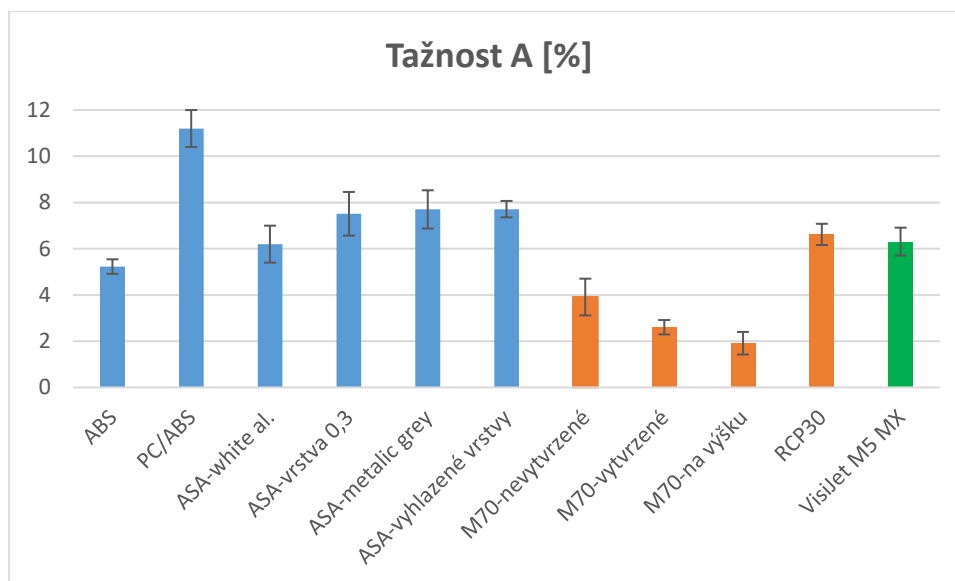
Z grafu 2 lze odečíst tahové diagramy materiálů z tekutých pryskyřic technologie SLA. U materiálu RCP30 lze spatřit přetržení až po zploštění křivky, kdežto u materiálu M70 dochází k přetržení okamžitě při dosažení maximálního zatížení. Oproti strunným materiálům FDM zde absentuje zaoblení křivky před přetržením vzorků.

Graf 3 - Tahový diagram materiálu MJP – VisiJet M5 MX



Z grafu 3 znázorňující průběh tahové zkoušky materiálu VisiJet M5 MX je patrné, že k přetržení zkušební vzorku dochází po zploštění křivky. I zde dochází k přetržení bez zaoblení křivky na konci diagramu.

Graf 4 - Tažnost materiálů 3D tisku

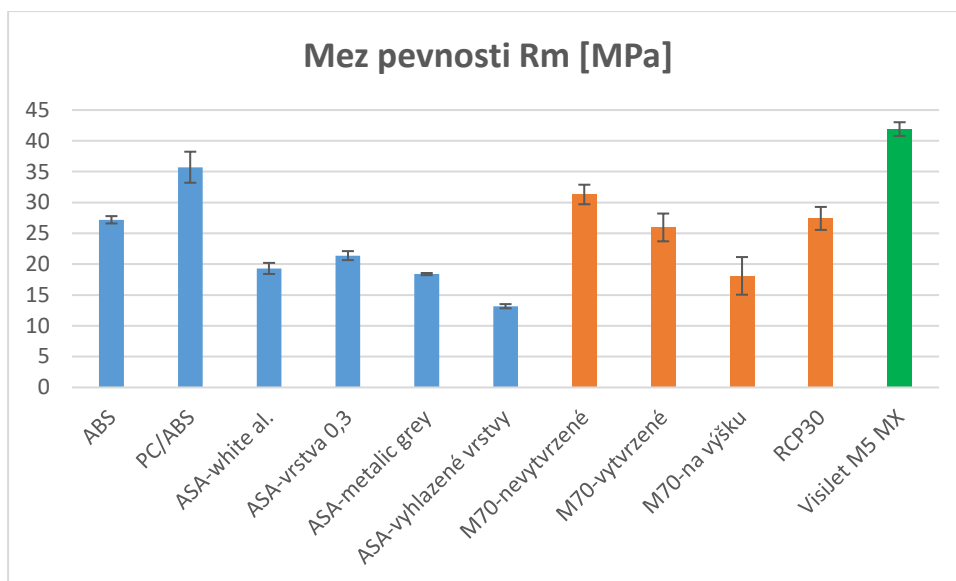


Z Grafu 4 je možné porovnat tažnost všech průměrných hodnot zkušebních vzorků se směrodatnou odchylkou. Lze z něho vyčíst, že daleko nejvyšší tažnost představuje materiál PC/ABS z technologie FDM, kdy k přetržení došlo pouze u vnitřních vláken, natož obvodová vlákna se dále protahovala. Materiál ASA, který vychází z původního ABS vykazuje asi o 3 % vyšší tažnost než materiál ABS. U materiálů ASA došlo k zajímavému zjištění, kdy barevná varianta white aluminium má o cca 1,5 % nižší tažnost oproti barevnému provedení metallic grey. U vyhlazených vrstev materiálu ASA pomocí ethylmethylketonu se tažnost oproti původnímu materiálu nijak výrazně nezměnila.

U technologie SLA vykazuje originální materiál RCP30 v průměru asi o 4 % vyšší tažnost než materiál M70 a je v tomto ohledu srovnatelný s materiály ASA u technologie FDM. U vytvrzených vzorků materiálu M70 pomocí UV světla je značný pokles tažnosti oproti původním vzorkům, a to téměř o 2 %. Ještě větší pokles je zaznamenán u vzorků vytištěných na výšku, což odpovídá logickým předpokladům.

U technologie MJP vzorky z materiálu VisiJet M5 MX zaznamenaly podobnou tažnost jako u materiálu RCP 30 technologie SLA a materiály ASA technologie FDM.

Graf 5 - Mez pevnosti materiálů 3D tisku



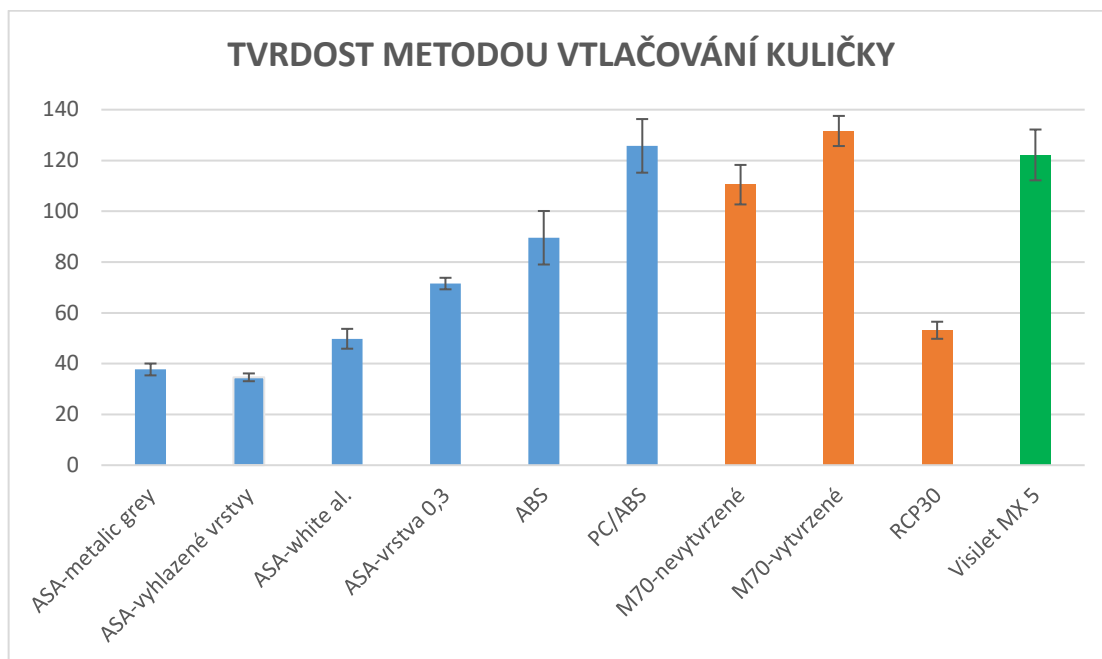
Na grafu 5 jsou zobrazeny průměrné meze pevnosti zkušebních vzorků a jejich směrodatné odchylky. Mezi materiály technologie FDM zde podle předpokladů vykazuje nejvyšší mez pevnosti materiál PC/ABS. Materiál ABS vykazuje mez pevnosti o cca 7 MPa vyšší než u materiálu ASA, který z tohoto materiálu vychází. Tlustší vrstva nakrájení vzorků u materiálu ASA zapříčinila nepatrně vyšší mez pevnosti, nopak u vzorků s vyhlazenými vrstvami pomocí ethylmethylnketonu se prokazuje o cca 10 MPa nižší mez pevnosti, než je tomu u vzorků bez provedení této úpravy. Meze pevnosti u různých barevných variant jsou v tomto případě na rozdíl od jejich tažností podobné.

U technologie SLA je z grafu patrné, že mez pevnosti u materiálu RCP30 je srovnatelná s materiálem M70. Následné vytvrzení však snížilo mez pevnosti v tahu o cca 5 MPa, než je tomu u nevytvrzených vzorků z materiálu M70. Také u vzorků, které byly vytištěny na výšku se mez pevnosti výrazně zmenšila. Rozdíl těchto hodnot je téměř 10 MPa. Materiály tekutých pryskyřic u technologie SLA celkově vykazují vyšší meze pevnosti než běžné materiály ASA používané u technologie FDM.

Nejvyšší mez pevnosti vykazuje materiál VisiJet 5 MX z technologie MJP, který má oproti materiálů z pryskyřice mez pevnosti v tahu až o 30 MPa vyšší a od běžných materiálů ASA dokonce o 40 MPa vyšší.

5.2 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Graf 6 - Tvrdost materiálů 3D tisku



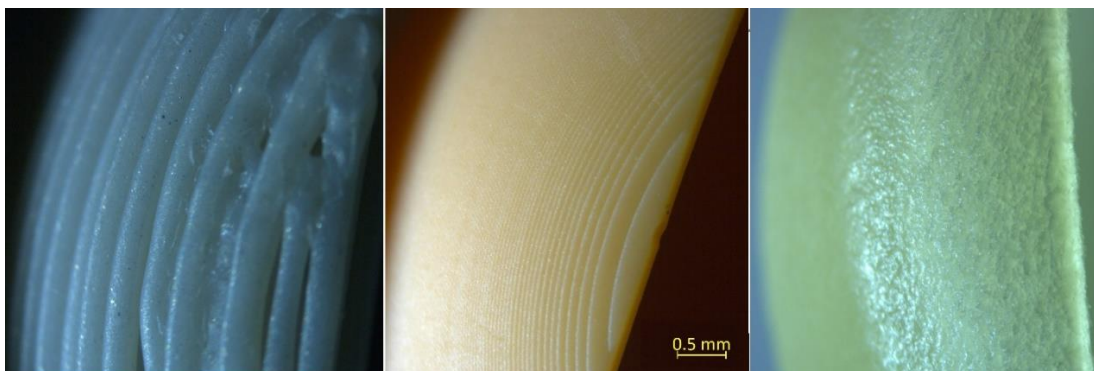
Z grafu vyplývá, že nejvyšší tvrdost má materiál PC/ABS z technologie FDM, M70 z SLA a materiál Polyjet z technologie MJP. Co se týká porovnání jednotlivých úprav materiálů u technologie FDM, tak vyhlazení vrstev ethylmethyketonem nemá zásadnější vliv na tvrdost materiálu. Zajímavé zjištění je dále u rozdílu tvrdosti jednotlivých barev materiálu ASA. Z tohoto výzkumu vyplývá, že materiál ASA v barevné variantě white aluminium je cca o 10 N tvrdší než varianta metallic grey. Tloušťka jednotlivých vrstev má také zásadní vliv na tvrdost tištěných materiálů. Vytiskovaný kvádr s tloušťkou vrstvy 0,3302 mm má větší tvrdost cca o 20 N, než kvádr s vrstvami 0,254. Co se týká porovnání materiálů ASA a ABS, tak materiál ASA má nižší tvrdost, ale jeho tiskové vlastnosti oproti ABS nebo i PC/ABS jsou o poznání lepší.

Co se týká materiálů pryskyřic u technologie SLA, tak zde došlo k velice zajímavému zjištění, kdy levný materiál M70 má daleko větší tvrdost než originální materiál RCP30. Dále se zjistilo, že vytvrzení modelů z materiálu M70, pomocí světelných záblesků UV lampy, zvýší jejich tvrdost o cca 20 N, což zůstalo mírně za očekáváním. Dá se předpokládat, že vytvrzení slouží především k dosažení větších teplotních odolností než ke zvýšení tvrdosti materiálu.

5.3 Vyhodnocení kvality povrchu

Pod mikroskopem Zeiss Stemi 508 se pod zvětšením 0,63x zkoumal povrch lopatek Peltonovy turbíny. Na obr. 52 je vidět rozdíl v nanášení vrstev materiálu a jejich kvality mezi jednotlivými technologiemi 3D tisku FDM, SLA a MJP. U technologie FDM jsou velmi výrazně vidět jednotlivé vrstvy a zároveň lze pozorovat občasné nedoléhání materiálu. S porovnáním s ostatními technologiemi lze právě tento obrázek posoudit jako nejméně kvalitní povrch. U technologie SLA lze pozorovat velmi tenké linky vrstev, které jsou bez přiblížení pomocí mikroskopu běžným okem zcela neviditelné. U MJP tisku se na rozdíl od předešlých technologií nedají přesně určit jednotlivé vrstvy, a to především v důsledku velmi pórovitého povrchu, avšak oproti technologii FDM je tento povrch jednodušší a daleko hladší.

Obrázek 52 - Výzkum kvality povrchu FDM, SLA a MJP

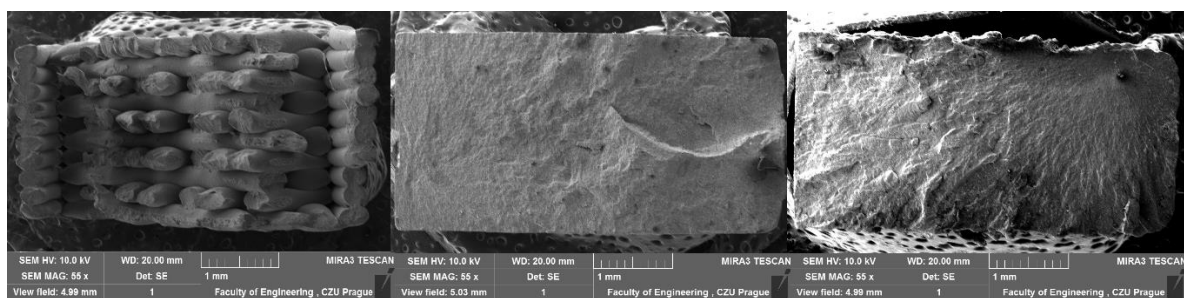


Z tohoto výzkumu lze určit, že nejvíce kvalitní povrch výtisku je u technologie SLA, kdy je povrch velmi hladký. U výtisku z MJP tiskárny je značná pórovitost a nejméně kvalitní povrch je u modelu z FDM tiskárny. Detailnější výsledky však vyplynou z porovnání vnitřní struktury pomocí SEM.

5.4 Vyhodnocení vnitřní struktury pomocí SEM

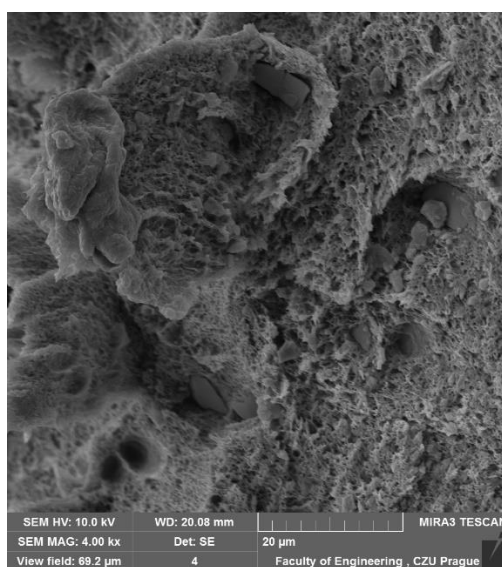
Již z menšího přiblížení (MAG 55x) je patrný velký rozdíl ve struktuře jednotlivých technologií 3D tisku. U metody FDM jsou vidět velmi silné vrstvy nanášené struny a lom je nepravidelný. Podle očekávání má tato technologie kvalitativně nejhorší vnitřní strukturu oproti technologiím SLA a MJP (viz obr. 53).

Obrázek 53 - Pohled na vnitřní strukturu technologií FDM, SLA a MJP



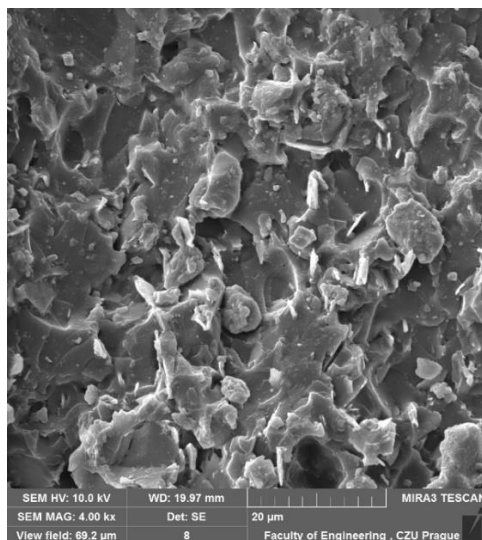
Při detailnějším zkoumání a mnohonásobně větším přiblížení (MAG 4000x) lze u technologie FDM a materiálu ASA, který vychází z původního materiálu ABS, vidět přísady, které zaručují lepší tiskové vlastnosti tohoto materiálu oproti ABS. Struktura je velmi členitá a pórovitá. Oproti ostatním technologiím zde zcela absentují hladká místa, což dokazuje předešlé tvrzení o nejhorší kvalitě mezi technologiemi (viz obr. 54).

Obrázek 54 - Vnitřní struktura technologie FDM



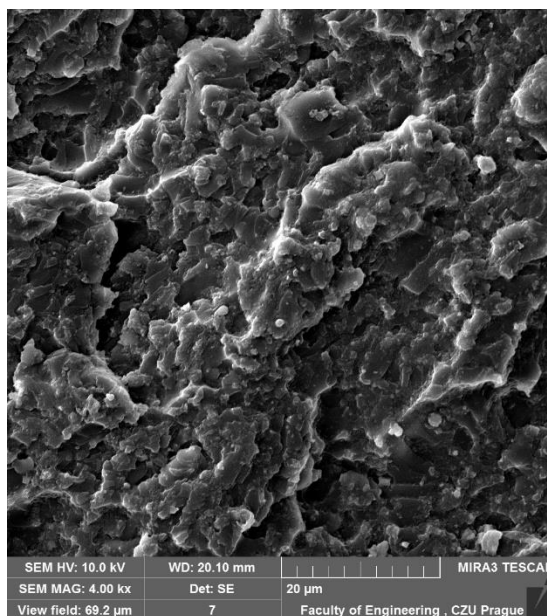
V detailu u technologie SLA a materiálu M70 je vidět velké množství hladkých ploch, které jsou zároveň větších rozměrů. Také se u této technologie vyskytuje jen malé množství trhlin, což potvrzuje předpoklad, že tato technologie je z pohledu kvality tisku nejkvalitnější (viz obr. 55).

Obrázek 55 - Vnitřní struktura technologie SLA



U technologie MJP a materiálu VisiJet M5 MX je patrné větší množství trhlin. Struktura je z velké části hladká, avšak tyto hladké části jsou oproti technologii SLA menších rozměrů a zároveň se zde vyskytuje značné množství trhlin, což staví tuto technologii a materiál kvalitativně za technologii SLA. (viz obr. 56).

Obrázek 56 - Vnitřní struktura technologie MJP



Z tohoto výzkumu je možné konstatovat, že po porovnání jednotlivých snímků vnitřních struktur sledovaných vzorků je nejkvalitnější technologie 3D tisku metoda SLA. Podobných výsledků, avšak o něco méně kvalitních se dosáhlo u vzorku z technologie MJP. Porovnávaný vzorek technologie FDM z tohoto výzkumu vyšel podle předpokladu jako nejméně kvalitní, když strukturu tvoří jednotlivé tlusté vrstvy nanášeného filamentu.

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem mechanických vlastností různých technologií 3D tisku a následného porovnání z pohledu kvality tisku. U technologie FDM byly zkoumány materiály ABS, ASA a PC/ABS. U materiálu ASA se dále porovnával vliv vyhlazení jednotlivých vrstev na změnu mechanických vlastností. U tohoto výzkumu došlo k závěru, že vyhlazení vrstev pomocí ethylmethylketonu nemá zásadní vliv na změnu mechanických vlastností oproti původnímu materiálu. Dále se zjistilo, že materiál PC/ABS má horší tiskové vlastnosti oproti materiálům ASA nebo ABS, ale jejich mez pevnosti v tahu a tažnost je daleko větší. Materiál ASA, který vychází z původního ABS, ale je upraven tak aby jeho tiskové vlastnosti byly lepší, vychází v tomto výzkumu jako materiál s nejnižší pevností, avšak s vyšší tažností než u materiálu ABS.

U technologie SLA se porovnával originální materiál RCP30 od společnosti EnvisionTec s neoriginálním a podstatně levnějším materiálem M70. Výzkum prokázal, že neoriginální materiál M70 vykazuje vyšší tvrdost i pevnost než materiál RCP 30, což se před zkoušením nepředpokládalo, avšak materiál RCP30 je více tažný. Dále se zkoumal vliv následného vytvrzení pomocí UV záblesků na jeho tvrdost. Z výzkumu plyne, že se tvrdost po tomto procesu zvýší, avšak původní předpoklad počítal s ještě větším zvýšením. Dá se předpokládat, že vytvrzení modelů slouží spíše pro zvýšení teplotní odolnosti tištěných master modelů pro následné odlévání. Při porovnání s materiály z FDM technologie zde vykazují tekuté pryskyřice daleko nižší tažnost.

U technologie MJP s materiálem VisiJet M5 MX došlo ke zjištění vysoké tvrdosti, pevnosti v tahu a podobné hodnoty tažnosti jako u materiálu RCP30 a ASA.

U výzkumu kvality povrchu a vnitřní struktury se prokázal původní předpoklad a technologie SLA zde dosáhla nejlepších výsledků. Technologie MJP, která často alternuje technologii SLA, nepatrně za technologií SLA kvalitativně zaostala. Technologie FDM vzešla z tohoto výzkumu kvality jako nejméně kvalitní technologie tisku, avšak pro tisk funkčních prototypů a tisku větších modelů, které nevyžadují vysokou kvalitu detailů naprosto dostačující.

Teoretické poznatky doplněné praktickou částí, ve které se uskutečnily zkoušky mechanických vlastností a kvality tisku, přispěli ke splnění cíle této práce.

7 CITOVANÁ LITERATURA

1. GIBSON, Ian. *Additive Manufacturing Technologies*. New York : Springer Science+Business Media New York, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
2. KOVÁČIK, Miroslav. *3D TISK VŠEOBECNĚ*. 3dfactory. [Online] 27. Říjen 2017. [Citace: 11. březen 2020.] <https://3dfactory.cz/2017/10/27/3d-tisk-vseobecne/>.
3. STRŽÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha : Prusa Research a.s., 2019.
4. NOORANI, Rafig. *3D printing; Technology, applications, and selection*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2018. ISBN-13: 978-1-4987-8375.
5. DAW, David. *Nastal čas pro 3D tisk*. Computerworld. 2011, Sv. XXII, 7.
6. *3D printed house. Milestone project*. 3dprintedhouse. [Online] 3. Květen 2021. [Citace: 23. Březen 2022.] <https://www.3dprintedhouse.nl/en/news/5397/images-and-videos/>.
7. KLOSKI, Nick a KLOSKI, Liza. *Getting Started with 3D printing*. Gravenstein : Maker Media, Inc, 2016. ISBN 978-80-251-4876-1.
8. *DK metal prominent s.r.o. Přehled technologií 3D tisku*. [Online] 9. Leden 2018. [Citace: 26. Březen 2022.] <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>.
9. MARTELartel, Alexandre. *The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar)*. 3D Natives. [Online] 3D Natives, 15. Prosinec 2017. [Citace: 3. Březen 2022.] <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#1>.
10. ČERNÝ, Michal. *3D tisk v amatérské praxi*. Praktická elektronika. 2018, 9.
11. KREMEL, Tomáš. *Slovníček pojmů pro 3D tisk*. tomaskremel. [Online] 6. Únor 2021. [Citace: 23. Březen 2022.] <https://tomaskremel.cz/slovnicek-pojmu-pro-3d-tisk/>.
12. *RepRap. G-code*. Reprap. [Online] 26. únor 2022. [Citace: 3. Březen 2022.] <https://reprap.org/wiki/G-code>.
13. *3dformed. Materiale utilizate in procesule de printare 3D*. talkingabout. [Online] [Citace: 23. Březen 2022.] <https://talkingabout.ro/3dformed/materiale-utilizate/>.
14. *Materialpro3D. Materialový slovník*. materialpro3D. [Online] [Citace: 3. Březen 2022.] www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník.

15. HLOUŠEK, Petr. *3D printing: a prospective challenge for manufacturing*. Saarbrücken : OmniScriptum GmbH & Co. KG, 2015. ISBN: 978-3-639-86523-3.
16. CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. *3D printing and additive manufacturing*. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2015. ISBN 978-9814571401.
17. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk / teorie a praxe*. Praha : Grada Publishing, 2021. ISBN 9788027112944.
18. 3D Systems. *ProJet MJP 2500W*. [Online] [Citace: 26. Březen 2022.] <http://infocenter.3dsystems.com/projetmjp2500w/user-guide/glance>.
19. 3D Systems. *Materials*. [Online] [Citace: 26. Březen 2022.] <http://infocenter.3dsystems.com/materials/>.
20. PRŮŠA, Josef. *Three hundred 3D printers in one room: A quick look to our printing farm*. [Online] 9. Únor 2018. [Citace: 26. Březen 2020.] https://blog.prusaprinters.org/a-quick-look-to-our-printing-farm_7474/.
21. Prusa research. *O Průša pro AFS*. expo.prusa3d. [Online] [Citace: 23. Březen 2022.] <https://expo.prusa3d.com/cs/info/o-expozici>.
22. HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie 1*. Praha : Scientia, spol s.r.o, 2002. ISBN 80-7183262-6.
23. VALÁŠEK, Petr. *Polymerní materiály*. Praha : ČZU, 2014. ISBN 878-80-213-2489-3.
24. MILLS, Nigel. *Plastics microstructure and engineering applications*. Amsterdam : Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-5148-2.
25. LENFELD, Petr. *Zpracování plastů, část 2*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 9788073720377.
26. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. [Online] [Citace: 26. Březen 2022.] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
27. DLUHOŠ, Jindřich. *Materiály a technologie, Plasty a vybrané nekovové materiály*. Ostrava : Pedagogická fakulta Ostravské univerzity, 1998. ISBN 8070421312.
28. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů, Teorie a praxe*. Praha : Grada Publishing a.s., 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

29. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy : Střední odborné učiliště Svitavy, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
30. MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha : SPS Praha, 1988.
31. ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností*. místo neznámé : Český normalizační institut, 1997.
32. ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty-Stanovení tvrdosti-Část 1: Metoda vtlačení kuličky*. místo neznámé : Český normalizační institut, 2003.
33. GOODHEW, Peter. *Practical methods in electron microscopy vol. 11: Thin foil preparation for electron microscopy*. New York : A.M. Glauert Elsevier Science Publishing, 1985. ISBN 0-444-806-997.
34. GOLDSTEIN, Josef. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. New York : Plenum publishers, 2003. ISBN 0-306-47292-9.
35. BIEHLER, John. *3D Printing with Autodesk*. Indianapolis : Que Publishing, 2014. ISBN-13: 978-0-7897-5328-1.
36. Henkel s.r.o. *Jak řešit problémy*. Praha : autor neznámý, 2020.
37. ZUZA, Mikoláš. *Tři stovky 3D tiskáren v jedné místnosti: Nová tisková farma Prusa Research*. josefprusa.cz. [Online] 9. Únor 2018. [Citace: 23. Březen 2020.] <https://josefprusa.cz/nova-tiskova-farma-prusa-research/>.
38. PEDAGOGICKÁ FAKULTA MU. *Keramika, kompozity, polymery*. ped.muni. [Online] [Citace: 5. Březen 2022.] <https://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>.

Seznam použitých zkratek

Symbol / Zkratka	Jednotka	Popis
A	%	tažnost
D	mm	průměr kuličky
d	mm	průměr vtisku
F	N	zatížení
F _m	N	maximální zatěžující síla
F _o	N	předběžná síla zatížení
L _o	mm	počáteční délka tyče
ΔL	mm	změna délky tyče
R _e	MPa	mez kluzu v tahu
R _m	MPa	mez pevnosti v tahu
S _o	mm ²	původní plocha průřezu
S _u	mm ²	nejmenší plocha průřezu
Z	%	kontrakce
ε	mm	poměrné prodloužení
RP		Rapid Prototyping
FDM		Fused Deposition Modeling
MJP		MujiJet Printing
SLA		Stereolithography
ABS		akrylonitril butadien styren
ASA		akrylonitril styren akryl
PC		polykarbonát
SEM		Scanning electron microscope

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vytisknutý dům pomocí 3D tisku.....	4
Obrázek 2 - Technologie FDM	5
Obrázek 3 - Schéma konstrukcí FDM tiskáren	6
Obrázek 4 - Model s využitím podpůrného materiálu.....	7
Obrázek 5 - Prostředí v softwaru Insight	8
Obrázek 6 - Extrudér.....	9
Obrázek 7 - Barevné varianty filamentů pro tisk FDM	10
Obrázek 8 - Příklad využití FDM tisku.....	11
Obrázek 9 - Druhy osvětlení SLA tiskáren	13
Obrázek 10 - Proces tisku SLA tiskárny	13
Obrázek 11 - Typy resinů pro technologii SLA.....	15
Obrázek 12 - Příklad využití SLA tisku.....	16
Obrázek 13 - Schéma MJP tisku	17
Obrázek 14 - Popis MJP tiskárny	17
Obrázek 15 - Příklad využití MJP tisku	19
Obrázek 16 - Ukázka chemicky vyhlazeného modelu	20
Obrázek 17 - Tisková farma Průša research	21
Obrázek 18 - Automatizovaná farma Průša research.....	21
Obrázek 19 - Vytisknutý model vesnice pomocí FDM.....	22
Obrázek 20 - RC Modely pomocí SLA.....	23
Obrázek 21 - Vytisknuté sochy pomocí FDM.....	23
Obrázek 22 - Struktury polymerů.....	25
Obrázek 23 - Zkušební těleso na zkoušku tahem	27
Obrázek 24 – Tahový diagram.....	29
Obrázek 25 - Schéma metody vtlačování kuličky.....	30
Obrázek 26 - Schéma tvrdosti dle Rockwella	31
Obrázek 27 –Hroty dle Shoreho.....	31
Obrázek 28 - Schéma SEM	32
Obrázek 29 - Vytisknutá tělesa pro praktickou část.....	34
Obrázek 30 - Dimension BST 1200es.....	35
Obrázek 31 – Nakrájení modelu v Insight	35
Obrázek 32 - Parametry tisku FDM	36
Obrázek 33 - Problém u tisku FDM.....	37

Obrázek 34 - Podpory u tisku SLA	37
Obrázek 35 - EnvisionTec Perfactory 4	38
Obrázek 36 - Perfactory RP	38
Obrázek 37 - Průběh tisku a odstranění podpor SLA.....	39
Obrázek 38 - Client Manager pro MJP tisk.....	40
Obrázek 39 - ProJet 3510 SD	40
Obrázek 40 - Vytisknutý model MJP	41
Obrázek 41 - Rozměry zkušební vzorku zkoušky tahem.....	42
Obrázek 42 - Vytisknuté vzorky pro zkoušku tahem	42
Obrázek 43 - Trhací stroj LaborTech	43
Obrázek 44 - Přetrhané vzorky.....	43
Obrázek 45 - Test & Motion - Tahová zkouška.....	44
Obrázek 46 - Kvádry pro zkoušku tvrdosti	44
Obrázek 47 - Tvrdoměr DuraJet.....	45
Obrázek 48 - Vytisknutá Peltonova turbína	46
Obrázek 49 - Mikroskop Zeiss 508	46
Obrázek 50 - Pokovovací přístroj Quorum Q150Res	47
Obrázek 51 - SEM TESCAN MIRA3 GTX.....	48
Obrázek 52 - Výzkum kvality povrchu	54
Obrázek 53 - Pohled na vnitřní strukturu technologií FDM, SLA a MJP.....	55
Obrázek 54 - Vnitřní struktura technologie FDM.....	55
Obrázek 55 - Vnitřní struktura technologie SLA	56
Obrázek 56 - Vnitřní struktura technologie MJP	56

Seznam grafů

Graf 1 - Tahový diagram materiálů FDM	49
Graf 2 - Tahový diagram materiálů SLA	50
Graf 3 - Tahový diagram materiálu MJP – VisiJet M5 MX	50
Graf 4 - Tažnost materiálů 3D tisku.....	51
Graf 5 - Mez pevnosti materiálů 3D tisku.....	52
Graf 6 - Tvrdost materiálů 3D tisku	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Mohsova stupnice tvrdosti	27
Tabulka 2 - Normou předepsané rozměry zkušebního vzorku na zkoušku tahem.....	28
Tabulka 3 - Parametry pokovování	47
Tabulka 4 - Parametry přiblížení SEM	48